



## بررسی آزمایشگاهی اثر آماده‌سازی اولیه سطوح ابرآبگریز بر میزان کاهش نیروی پسا اصطکاکی در جریان های آرام

نوروز محمد نوری<sup>۱</sup>، ستاره سخاوت<sup>۲\*</sup>، سعید فسحت<sup>۳</sup> و شهاب بیانی آهنگر<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup>استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

<sup>۲</sup>استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد تهران شرق، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

<sup>۳</sup>دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

<sup>۴</sup>دانشجوی دکتری، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی میشیگان، آمریکا

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۲/۲۶؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۰۴/۱۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۲/۰۴

### چکیده

در این مقاله اثر زبری بر کاهش نیروی اصطکاک هیدرودینامیکی سطوح ابرآبگریز بطور تجربی بررسی شده است. به این منظور، میکروکانالی طراحی و ساخته شد و سپس سطوح آن با روش‌های مختلف آبگریز شدند و مقدار کاهش افت فشار در جریان آرام روی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. جنس سطوح کانال، آلومینیوم در نظر گرفته شد و ۴ روش مختلف برای آزمایشات انتخاب گردید. با توجه به نتایج بدست آمده، در حالی که سطوح ابرآبگریز با زبری سلسله‌ای منجر به کاهش قابل ملاحظه‌ای در اصطکاک سطحی (حدود ۲۰٪) گردید، سطح آبگریز صاف و بدون زبری کاهش قابل توجهی در نیروی مماسی نشان نداد. علاوه بر این برای مطالعه اثر روش آماده‌سازی، فرآیند جوش نیز به آماده‌سازی سطح اضافه شد. نتایج نشان داد که فرآیند جوش، به عنوان بخشی از آماده‌سازی سطوح ابرآبگریز، با ایجاد زبری روی زیرلایه‌ها، باعث افزایش دوام لایه‌های آبگریز و افزایش میزان کاهش نیروی نیروی پسا (تا ۴۵٪) می‌شود. سطوحی که با اضافه شدن فرآیند جوش آماده شدند، پایداری بیشتری در برابر جریان از خود نشان دادند.

**کلمات کلیدی:** سطوح ابرآبگریز؛ میکروکانال؛ کاهش نیروی پسا؛ زمان پایداری.

## Experimental Investigation on the Effect of Preprocessing in Fabrication of Superhydrophobic Surfaces on Laminar Drag Reduction

N. M. Nouri<sup>1</sup>, S. Sekhavat<sup>2,\*</sup>, S. Foshat<sup>3</sup>, S. Bayani Ahangar<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Prof., Mech. Eng., Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

<sup>2</sup> Asst. Prof., Department of Mech. Eng., East Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

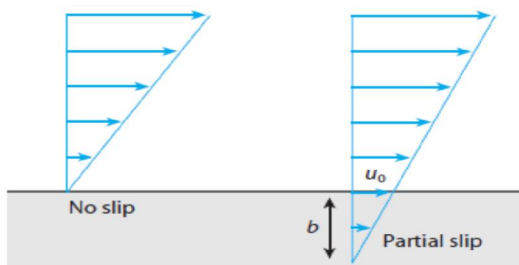
<sup>3</sup> Ph.D. Student, Mech. Eng., Shiraz Univ., Shiraz, Iran.

<sup>4</sup> Ph.D. Student, Mech. Eng., Michigan Tech. Univ., USA.

### Abstract

In this paper the effect of roughness on hydrodynamical friction reduction of superhydrophobic surfaces were studied. For this purpose, different non-wettable microchannel with various processing method was fabricated and then the amount of drag reduction in laminar flow was investigated on them. The surfaces were from Aluminum and the four different methods were used to fabricate superhydrophobic surfaces. According to the results, whereas superhydrophobic surfaces with hierarchical roughness could lead to a significant skin friction reduction (about 20 %), non-wettable smooth surface did not show a tangible reduction in drag force. Beside this for study the effect of preprocessing method the boiling process was added to the fabrication method. the results indicated that boiling process alongside roughening the substrates as a part of preparation of superhydrophobic surfaces intensified durability of the coated layer and drag reduction (up to 45 %). In addition surfaces which was prepared by adding boiling process were more stable in flow field.

**Keywords:** Superhydrophobic Surfaces; Microchannel; Drag Reduction; Durability.



شکل ۱- طول لغزش b

میکرومتری و نانومتری را با مواد دارای انرژی سطحی پایین ترکیب کردند تا سطوح ابر آبگریز ایجاد کنند [۴]. نوری و همکاران، روی سطح آلومینیوم با روش سندبلاست زبری ایجاد کرده و سپس با کمک ماده آبگریز، لایه نشانی انجام دادند آنها نشان دادند که روش خشک کردن نهایی نمونه‌ها می‌تواند در پایداری آنها تاثیرگذار باشد [۵]. ژونگ<sup>۴</sup> و همکاران، با الهام گرفتن از سطح برگ نیلوفر آبی با روش شیمیایی و کمک گرفتن از موادی مانند سیلیکا زبری در ابعاد میکرومتر ایجاد کرده و سپس با استفاده از ماده با سطح انرژی پایین مانند فلوروالکیل سیلان<sup>۵</sup>، روی سطح را لایه نشانی کردند. آنها نشان دادند که زبری با ابعاد میکرو و نانو می‌تواند زاویه تماسی را بطور قابل توجهی افزایش دهد [۶]. چن<sup>۶</sup> و همکاران، از روش جوشش برای ایجاد زبری نانومتری روی سطح آلومینیوم ۲۰۲۴ استفاده کردند و سپس با ماده آبگریز بر پایه سیلان لایه نشانی انجام دادند. نتایج آنها بیانگر زاویه‌تماسی حدود ۱۶۲ درجه بود [۷]. چینی<sup>۷</sup> و همکارانش نیز، دو عامل اصلی را برای ایجاد سطوح آبگریز معرفی کردند. آنها اعلام کردند که استفاده از مواد فلوردار به دلیل انرژی سطحی پایین و ایجاد زبری روی سطح در ایجاد سطح آبگریز تاثیر گذار است. آنها همچنین نشان دادند که سطح با زبری ترکیبی از ابعاد میکرو و نانو می‌تواند بسیار موثرتر باشد [۸].

در حالیکه تاکنون اعلام نشده است که آبگریزی بیشتر منجر به طول لغزش موثرتر می‌شود که نتیجه آن کاهش افت

## ۱- مقدمه

تنش برشی بین مواد جامد و مایع، سبب ایجاد نیروی مقاوم یا افت فشار در کانال‌ها می‌شود. این شرایط در محل برخورد جامد-مایع ایجاد می‌شود که بطور معمول به عنوان شرط مرزی عدم لغزش پذیرفته شده است؛ اما در دهه‌های اخیر با توجه به پیشرفت تکنولوژی و گسترش تکنیک‌های اندازه‌گیری دقیق و مشاهده جریان نزدیک به دیوار، دانشمندان پدیده جدیدی به نام لغزش را معرفی کرده‌اند که نشان می‌دهد، سرعت سیال روی دیوار صفر نیست و این شرایط باعث کاهش قابل توجهی در نیروی پسا یا افت فشار می‌شود.

شرط لغزش عمدتاً در سطوحی به نام سطوح ابرآبگریز وجود دارد. به علت زاویه لغزش کم و زاویه تماسی بسیار زیاد (بیشتر از ۱۵۰ درجه) بین این سطوح و قطره آب، این سطوح به طور کلی به عنوان سطوح خود-تمیز شونده شناخته می‌شوند. سطوح خود-تمیز شونده در کاربردهای مختلفی از جمله، پنجره‌های خود-تمیز شونده، پنل‌های خورشیدی و کاهش افت فشار جریان سیال، به عنوان مثال در میکرو/نانوکانال‌ها، مورد توجه هستند.

مفهوم شرط مرزی لغزش برای اولین بار توسط ناویر<sup>۱</sup> پیشنهاد شد. در این نظریه، مقدار سرعت روی دیوار، با نرخ برش سیال روی دیوار، متناسب است [۱]:

$$u = b \frac{\partial u}{\partial y} \quad (1)$$

در این رابطه b طول لغزش است. طول لغزش نشان دهنده، فاصله برون‌یابی شده درون دیوار است که در آن سرعت سیال به صفر می‌رسد. این طول در شکل ۱ مشخص است؛ بنابراین، شرط مرزی عدم لغزش با طول لغزش صفر مشخص می‌شود [۲].

بهترین نمونه شناخته شده از سطوح ابرآبگریز، برگ نیلوفر آبی<sup>۲</sup> است که دارای ساختار زبری سلسله مراتبی<sup>۳</sup> است. این ساختار از برجستگی‌های ۲۰-۴۰ میکرومتری ایجاد شده است که توسط ماده‌ای مومی شکل با زبری کمتر پوشیده شده است [۳]؛ بنابراین محققان بسیاری زبری

<sup>4</sup> Zhong

<sup>5</sup> Fluoroalkyl Silane

<sup>6</sup> Chen

<sup>7</sup> Chien-Te

<sup>1</sup> Navier

<sup>2</sup> Lotus

<sup>3</sup> Hierarchical

توانستند، ضریب اصطکاک داخلی لوله را تا ۱۹٪ کاهش دهند [۱۷]. بوشان<sup>۸</sup> افت ضریب اصطکاک را به ترتیب برای جریان‌های آشفته و آرام ۳۰٪ و ۱۲٪ در کانال ابر آگریز سیلیکونی نشان داد [۴]. از جمله کارهای که روی سطوح خارجی انجام شده است، می‌توان به بررسی تجربی کاهش نیروی مقاوم یک زیردریایی در ابعاد بزرگ اشاره کرد که توسط ژانگ<sup>۹</sup> و همکارانش صورت گرفته است. آنها ۱۵٪ کاهش نیروی پسا را گزارش کردند. پوشش آگریزی آنها حدود ۲۰ دقیقه در آب پایدار می‌ماند [۱۸].

با توجه به قابلیت‌های سطوح آگریز مطالعات عددی بسیاری نیز در این زمینه صورت گرفته است.

امیدوار و همکاران، اثر ساختارهای مختلف سطوح فوق آگریز در رژیم جریان آرام و آشفته را بر میزان کاهش پسا با روش‌های عددی مطالعه کردند [۱۹]. نجفی و همکاران نیز با مدلسازی سطوح آگریز روی یک هیدروفویل اثر طول‌های لغزش مختلف را بررسی کردند [۲۰]. مین<sup>۱۰</sup> و همکاران نیز، اثر آگریزی را بر کاهش افت فشار داخل یک میکروکانال بررسی کردند. نتایج آنها بیانگر آن بود که لغزش در راستای جریان باعث کاهش نیروی اصطکاکی می‌شود؛ در حالی که در راستای عرضی جریان می‌تواند افزایش نیروی اصطکاکی را نیز به همراه داشته باشد [۲۱]. راستان و همکاران نیز، به بررسی اثر آبدوستی و آگریز روی یک کانال نیم موج پرداختند و نشان دادند که طول لغزش‌های مشخصی می‌تواند نیروی پسی اصطکاکی و فشاری را کاهش دهد [۲۲]. معین<sup>۱۱</sup> و همکاران نیز با مدلسازی نوارهای آب دوست و آگریز روی یک سیلندر چرخان نشان دادند که سطح آب دوست می‌تواند روی نیروهای برا و پسی یک استوانه تاثیر گذار باشد [۲۳].

همانطور که در مقالات به وضوح نشان داده شده، سطوح ابر آگریز به ویژه سطوح در دو اندازه زبری که سبب آگریزی بیشتر می‌شوند، در سال‌های اخیر توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. تحقیقات عددی و تجربی نشان می‌دهند که زبری منظم که در جهت جریان در سطوح آگریز ایجاد

فشار یا کاهش پسی بیشتری است؛ اما سطوح ابر آگریز به طور گسترده در دستگاه‌های میکروسیال مورد استفاده قرار می‌گیرند تا افت فشار یا نیروی اصطکاک سطحی را کاهش دهند؛ همچنین مطالعات عددی نشان می‌دهد که طول لغزش تاثیر چشمگیری در کاهش نیروی اصطکاک سطحی دارد.

لی<sup>۱</sup> و همکارانش در مروری که بر فعالیت‌های تجربی و عددی صورت گرفته در زمینه سطوح آگریز انجام دادند، بیان کردند که ساختار سطح برای رسیدن به کاهش نیروی پسا بسیار موثر است و ساختار و زبری منظم می‌تواند تا ۷۵٪ نیروی مقاوم را کاهش دهد [۹].

اوو<sup>۲</sup> و همکارانش تایید کردند که می‌توان تا ۴۰ درصد کاهش افت فشار را با استفاده از سطوح سیلیکون فوق آگریز در میکروکانال ایجاد کرد، در حالی که هیچ کاهش در سطوح آگریز صاف مشاهده نمی‌شود [۱۰].

واتانابا<sup>۳</sup> و همکارانش، ۱۴٪ کاهش نیروی پسا در جریان آرام را در یک لوله دایره‌ای ساخته شده از رزین اکریلیک با یک جدار بسیار مقاوم در برابر آب ثبت کردند [۱۱]. نتایج مشابهی توسط یو<sup>۴</sup> و همکارانش گزارش شده است. آزمایشات آنها شامل، صفحاتی با قابلیت ترشوندگی مختلف مانند سطوح آگریز صاف و زبر بود. نتایج آنها نشان داد که کاهش نیروی پسا در سطوح آگریز زبر نسبت به موارد هموار و صاف بسیار محسوس تر است [۱۲]. محققان دیگری نیز نشان داده‌اند که طول لغزش در سطوح آگریز زبر بزرگتر است [۱۳-۱۵]. یاو<sup>۵</sup> و همکارانش با کمک PIV، تغییرات سرعت نزدیک لایه مرزی را بررسی کرده و نشان دادند که سطوح آگریز به دلیل ایجاد تغییر در ساختار لایه مرزی آشفته می‌تواند باعث کاهش نیروی پسا گردد. آنها در اعداد رینولدز مختلف تا ۲۴٪ کاهش نیروی پسا را گزارش کردند [۱۶].

جیرالدی<sup>۷</sup> و همکارانش توانستند، جریان داخل یک لوله آگریز را بصورت تجربی بررسی کنند. آنها در شرایط مختلف

<sup>1</sup> Lee

<sup>2</sup> Ou

<sup>3</sup> Watanaba

<sup>4</sup> Yu

<sup>5</sup> Yao

<sup>6</sup> Particle Image Velocimetry

<sup>7</sup> Gerardi

<sup>8</sup> Bhushan

<sup>9</sup> Zhang

<sup>10</sup> Min

<sup>11</sup> Moin

در نهایت اثر سطوح ابرآبگریز و شرط لغزش را می‌توان در رابطه با کاهش افت فشار نشان داد:

$$DR \% = \frac{\frac{\Delta P}{L} \Big|_{no\ slip} - \frac{\Delta P}{L} \Big|_{slip}}{\frac{\Delta P}{L} \Big|_{no\ slip}} \quad (4)$$

### ۳- روش آزمایش

در این مقاله اندازه‌گیری افت فشار در جریان آرام داخل میکروکانال با جداره‌های ابرآبگریزی رایج شده است که دارای زبری و روش‌های آماده‌سازی متفاوتی هستند.

دو صفحه آلومینیومی به عنوان جداره‌های پایینی و بالایی هر کانال انتخاب شدند. لازم به ذکر است که برای هر میکروکانال، جداره‌های پایینی و بالایی در فرآیندی مشابه آماده می‌شوند.

فرآیند آماده‌سازی به شرح زیر است: ۸ ورق Al7075 (200 \* 100 \* 10 میلی‌متر) توسط دی اکسید سیلیکون در ابعاد ۰/۳±۱/۲ میلی‌متر تحت فشار حدود ۴ بار سند بلاست شدند. به منظور داشتن سطحی با زبری کم فاصله بین نازل و صفحات حدود ۲۵ سانتی‌متر و برای صفحات دیگر و به منظور ایجاد سطح زبر این فاصله ۵ سانتی‌متر تنظیم شده‌است.

سند بلاست توسط دی اکسید سیلیکون، باعث ایجاد زبری در ابعاد میکرومتری می‌شود؛ در حالیکه پوشش تری کلرومتیل سیلان روی سطح یک لایه نانومتری را ایجاد می‌کند. علاوه بر این، فرآیند، جوشش برای ایجاد اتصال قوی‌تر بین سطح و گروه‌های آبگریز انجام می‌شود.

پوشش‌دهی در فاز بخار انجام شده و جزئیات آن را می‌توان در [۵] یافت. در اندازه‌گیری کاهش نیروی پسا، چهار نمونه کانال مورد مطالعه قرار می‌گیرند؛ نمونه اول: سطح آبگریز صاف که از فاصله ۲۵ سانتی‌متری سند بلاست می‌شود و نمونه دوم: سطح آبگریز زبر که از فاصله ۵ سانتی‌متری سند بلاست می‌شود. برای دو نمونه دیگر (نمونه سوم و چهارم)، فرآیند جوشش به ترتیب به نمونه اول و دوم اضافه می‌شود. شکل ۲a تصویر یک نمونه سطح سند بلاست شده را نشان می‌دهد و شکل ۲b تصویر گرفته شده توسط

می‌شود، نسبت به زبری غیرمنظم و تصادفی سبب کاهش بیشتر در اصطکاک سطحی می‌گردد [۲۱ و ۲۴]؛ اما با توجه به روش‌های گران ساخت زبری منظم روی سطح، بسیاری از محققان با استفاده از روش‌های ساده‌ای مثل سندبلاست و اچ‌کاری، ساختارهای تصادفی در ابعاد میکرو می‌سازند [۷ و ۲۵].

در این مقاله اثرات اندازه‌های مختلف زبری بر کاهش نیروی پسا و پایداری پوشش ابرآبگریز در جریان آرام داخل کانال بررسی شده‌است. سطوح ابرآبگریز با ترکیب روش سندبلاست با جوشش و استفاده از گروه‌های آبگریز با انرژی سطحی پایین (تری کلرومتیل سیلان<sup>۱</sup>) آماده شده‌است. با استفاده از این تکنیک‌ها، زبری تصادفی با ابعاد مختلف - از جمله ابعاد میکرو و نانو - ایجاد گردید. به سبب استفاده خاص از آلیاژ آلومینیوم در صنعت، آلیاژ Al7075، به عنوان زیرلایه مدنظر قرار گرفت. علاوه بر آن، دوام پوشش در تنش‌های برشی مختلف مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج ثابت می‌کنند، زبری سلسله‌ای در سطوح آبگریز سبب کاهش بیشتر افت فشار و دوام بیشتر خاصیت آبگریزی سطح می‌شود.

### ۲- بررسی تحلیلی

با فرض سیال تراکم ناپذیر در کانالی به ارتفاع 2h، عرض w و طول L بطوریکه ارتفاع نسبت به عرض و طول بسیار کوچک باشد، حل معادلات ناویر استوکس برای جریان آرام با شرط مرزی لغزش به صورت رابطه (۲) نوشته می‌شود:

$$Q = \frac{2}{3} \frac{w h^3}{\mu} \frac{\Delta P}{L} + \underbrace{2 h w u_{slip}}_{Q_{slip}} \quad (2)$$

که سرعت لغزش  $u_{slip}$  نامشخص،  $\mu$  لزجت دینامیکی سیال و  $Q$ ،  $\Delta p$  به ترتیب، نشان دهنده افت فشار و دبی جریان است. با استفاده از فرضیه ناویر که در معادله (۱) نشان داده شده‌است، می‌توان طول لغزش را محاسبه کرد:

$$b = \frac{Q L \mu}{2 h^2 w \Delta P} - \frac{h}{3} \quad (3)$$

<sup>1</sup> Trichloromethylsilane

اندازه‌گیری افت فشار در میکروکانال مستطیلی شکل با تجهیزاتی صورت می‌گیرد که بطور شماتیک در شکل ۴ نشان داده شده‌است. عرض میکروکانال برابر  $W=10\text{cm}$ ، ارتفاع آن  $h=500\ \mu\text{m}$  و طول آن برابر  $L=20\text{cm}$  است.

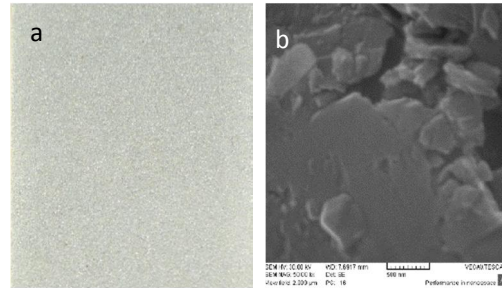
به منظور اطمینان از جریان آرام در کانال، دو کلکتور در ورودی و خروجی کانال تعبیه شد. برای اندازه‌گیری دبی از روش توزین جرم جریان در دوره‌ای از زمان استفاده شده است و نرخ هر جریان بوسیله شیر سوزنی که قبل از ورودی تعبیه شده کنترل می‌شود. اندازه‌گیری وزنی توسط ترازوی دیجیتال با دقت  $0.001\text{g}$  صورت گرفته است.

افت فشار توسط سنسورهای فشار از سه سری  $163, 162$  و  $164$  شرکت Honeywell اندازه‌گیری شد که دقتی تا  $9\text{mmH}_2\text{O}$  دارند؛ در نتیجه عدم قطعیت آنها  $\pm 9\text{mmH}_2\text{O}$  است. به منظور حذف اثرات ورودی و اطمینان از وجود جریان کاملا توسعه یافته، اندازه‌گیری‌ها در  $4$  الی  $5$  سانتی‌متری ورودی صورت گرفت.

برای انجام آزمایشات ۴ نوع میکروکانال همانطور که قبلا معرفی شدند، در طیف وسیعی از عدد رینولدز  $150 < \text{Re} = qD_h / \nu A < 1000$  قرار گرفتند. در رابطه رینولدز  $q$  دبی جریان است که توسط اندازه‌گیری به دست می‌آید و  $\nu$  لزجت سینماتیک است. از آنجا که لزجت آب تحت تاثیر دما است، برای دقت بیشتر، درجه حرارت آب در هر آزمون ثبت شده است. اندازه‌گیری دما توسط ترموکوپل از نوع PT100 صورت گرفته است که عدم قطعیت آن  $\pm 0.05^\circ\text{C}$  است.

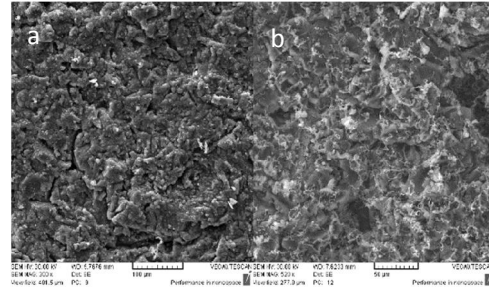
جدار پایینی و بالای میکروکانال به شکلی طراحی شده که به راحتی قابل تعویض باشد و همین مسئله امکان اندازه‌گیری فشار را برای سطوح مختلف فراهم می‌کند. ارتفاع کانال توسط ورق‌های فلزی مرجع<sup>۲</sup> تنظیم شده که در شکل ۵ نشان داده شده است. پس از هر آزمون، ورق‌های مرجع با نمونه جدیدی جایگزین شدند تا اطمینان حاصل شود که ضخامت ورق در اثر تحمل تنش تغییر نکرده و ثابت باقی می‌ماند و سپس جداره‌های میکروکانال با استفاده از آچارگشتاوری<sup>۳</sup> به مقدار مشخصی محکم شدند.

میکروسکوپ الکترونی<sup>۱</sup> را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است، زبری های نامنظمی روی سطح توسط سندبلاست ایجاد شده است.



شکل ۲- (a) تصویر واقعی از نمونه سندبلاست شده و (b) تصویر با بزرگنمایی  $50000\times$  برابر از نمونه اول

در شکل ۳a تصویر سطح بعد از فرایند جوشش و شکل ۳b تصویر سطح بعد از فرایند پوشش دهی را نشان می‌دهند. در تصویر رشته‌های شکل گرفته از ماده آبریز مشخص است.



شکل ۳- (a) تصویر نمونه آماده شده بعد از فرایند جوشش و (b) تصویر نمونه آماده شده بعد از فرایند آبریزی

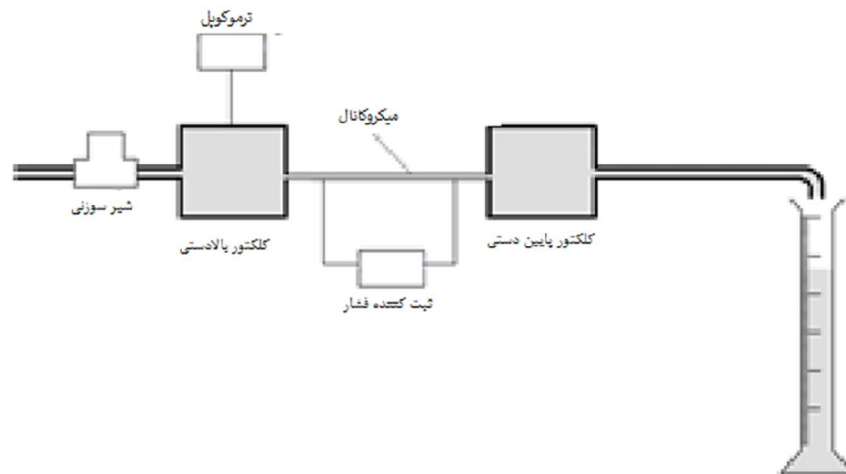
لازم به ذکر است که این مطالعه شامل دو بخش کلی است: (۱) اندازه‌گیری کاهش نیروی پسا و (۲) بهبود دوام و پایداری پوشش آبریز.

بنابراین در برخی آزمون‌ها، فرآیند جوشش به منظور مقایسه تاثیر آن بر نتایج، حذف شده است.

<sup>2</sup> Filler

<sup>3</sup> Torque Wrench

<sup>1</sup> Sem



شکل ۴- تجهیزات و ابزار آزمایش

#### ۴- نتایج و ارزیابی آزمایشات

در بخش قبل اشاره شد که آزمایشات در حالات کاهش و افزایش نرخ جریان تکرار شدند تا از درستی کارکرد تجهیزات آزمایش اطمینان حاصل گردد. شکل ۷ نتایج آزمایشات در حالت رفت و برگشت را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است، نتایج نشان از تکرار پذیری آزمایشات دارد.

همانطور که قبلاً اشاره شد، سطوح میکروکانال به دو روش مختلف سند بلاست شدند. نتایج سطوح صاف در شکل ۸ نشان داده شده است. همانطور که انتظار می‌رفت، هیچ تغییر محسوسی برای این نمونه در مقایسه با شرایط مرزی بدون لغزش مشاهده نشد. این موضوع به اندازه زبری سطح وابسته است و نشان می‌دهد که بین تحقیقات محققین قبلی و آزمایش صورت گرفته در این پژوهش تطابق وجود دارد. [۱۰ و ۱۲-۲۰ و ۲۲ و ۲۵].

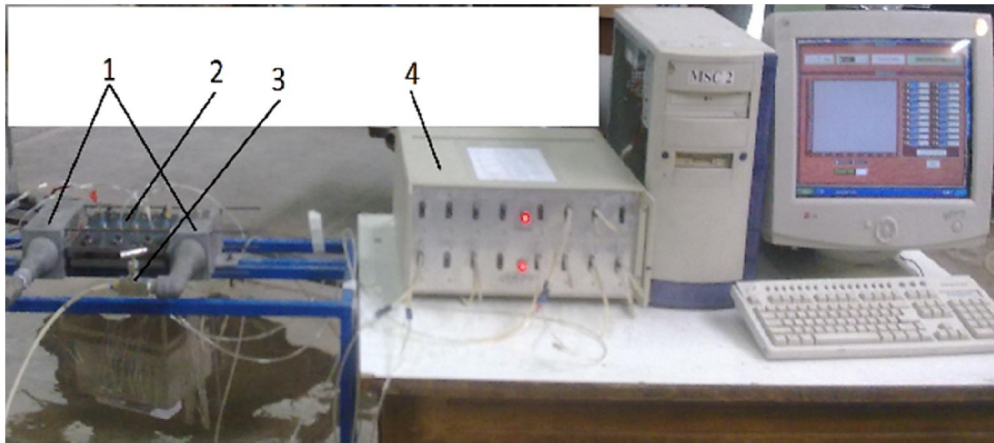
شکل ۹ نتایج سندبلاست زبر را نشان می‌دهد. مشخص است که افت فشار در طول کانال از شرایط عدم لغزش فاصله زیادی گرفته است. این تفاوت و کاهش ثابت می‌کند که ابعاد زبری، اثر مهمی بر کارایی پوشش ابرآبگریز دارد. به عبارت دیگر، وقتی زبری در ابعاد میکرو روی سطحی با پوشش مواد با انرژی سطحی پایین ترکیب می‌شود، زبری سلسله مراتبی ایجاد می‌کند. این لایه‌ها قادرند، حباب‌های هوا را گیر انداخته و آن‌ها را برای مدت زمان طولانی نگه دارند؛ بنابراین، این مساله منجر به سرعت لغزش ظاهری روی سطح و کاهش افت فشار در کانال می‌گردد.



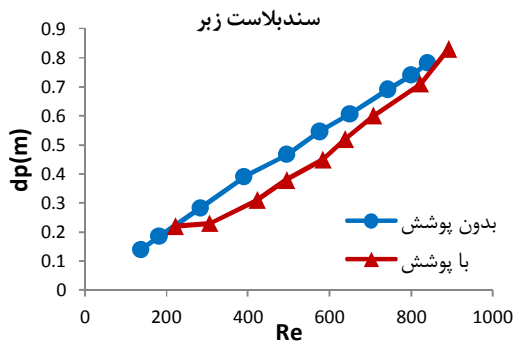
شکل ۵- برش عرضی کانال

اندازه‌گیری ارتفاع کانال، یکی از مهم‌ترین مسائل در میکروکانال بوده و عدم قطعیت، منجر به پیش‌بینی غلط کاهش افت فشار می‌شود. برای حل این مشکل، آزمایشات برای هر وضعیت و نرخ‌های دبی جریان متفاوت در شرایط عدم لغزش انجام شد. با توجه به حل تحلیلی، ارتفاع کانال را می‌توان از اولین بخش معادله (۲) محاسبه کرد. علاوه بر آن، آزمایشات و جمع‌آوری اطلاعات چندین بار انجام شد و در هر بار، میکروکانال در شرایطی تنظیم شد که عدم قطعیت در اندازه‌گیری‌ها کمینه شود. در نهایت، آزمایشات و داده‌ها در حالی انجام گرفت که نرخ جریان افزایش و کاهش می‌یابد تا از دقت اندازه‌گیری و تکرارپذیری آزمایش اطمینان حاصل شود. عدم قطعیت در میزان کاهش نیروی پسی اندازه‌گیری شده با توجه به محاسبات و ابزارهای مورد استفاده در بیشترین مقدار خود حدود  $\pm 0.0056$  است.

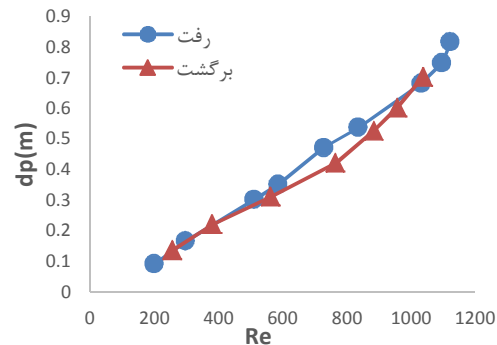
شکل ۶ نمایی از سیستم مورد نظر و اجزا آن را نشان می‌دهد.



شکل ۶- نمایی از اجزای آزمایش: ۱- کلکتورها، ۲- میکروکانال، ۳- شیر سوزنی و ۴- سیستم اندازه‌گیری فشار



شکل ۹- افت فشار در طول کانال در نمونه ۲

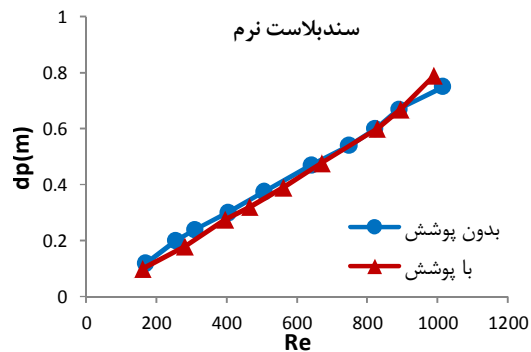


شکل ۷- نتایج آزمایشات برای اطمینان از تکرارپذیری

زبری مشابه است، حدود ۲۰ درصد کاهش رخ داده است. لازم به ذکر است که در بسیاری از تحقیقات، میکرو حباب‌های روی سطوح ابرآبگریز مشاهده شده‌اند و بخشی از افت فشار کلی که در سطوح آبگریز دیده می‌شود، مربوط به تولید این حباب‌های هوا روی سطح است [۱۱، ۱۲].

یونگ و همکارانش گزارش دادند که هر حبابی که روی سطح ظاهر می‌شود، رشد می‌کند و در نهایت توسط جریان شسته می‌شود [۱۲]. علت کم شدن کاهش افت فشار در شکل ۵ نیز مربوط به همین پدیده است. به عبارت دیگر در تنش برشی بالا، حباب‌های ماکروسکوپی با جریان شسته می‌شوند و لغزش ظاهری روی سطوح به آرامی به صفر می‌رسد.

در شکل های ۱۱ و ۱۲ اثر فرایند جوشش بر تولید سطوح آبگریز نشان داده شده است. مشخص است که افزودن

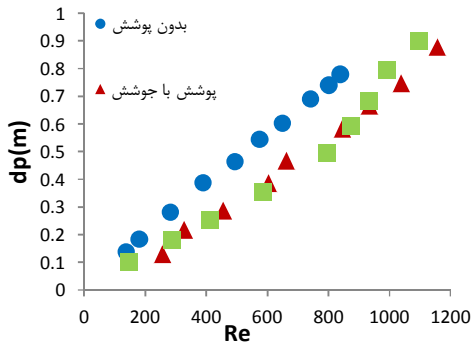


شکل ۸- افت فشار در طول کانال در نمونه ۱

میزان کاهشی که در اثر زبری میکرو / نانو ایجاد شده‌است، توسط معادله (۴) محاسبه و در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. در قیاس با شرایط بدون لغزش که دارای

علاوه بر این نتایج نشان می‌دهد که فرآیند جوشش قادر است، دوام پوشش در جریان آب را بهبود بخشد. زمان دوام یک لایه پوشش آبرگریز بدون فرآیند جوشش در جریان آب حدود ۲۰ دقیقه گزارش شده است [۱۲ و ۱۸]؛ در حالیکه در این تحقیق دوام سطوح تولید شده با روش جوشش در آب ساکن، ۳۶ ساعت و در آب جاری ۳۰ دقیقه است.

شکل ۱۳ نتیجه آزمایش در شرایط جوشش پس از ۳۰ دقیقه را نشان می‌دهد. نتایج بیان می‌کند که کاهش افت فشار در طول آزمایش ثابت باقی مانده است که در اثر چسبندگی قوی بین گروه‌ها با موادی با انرژی سطحی پایین و زیر پایه است که به علت افزودن فرآیند جوشش در ساخت سطوح رخ می‌دهد.

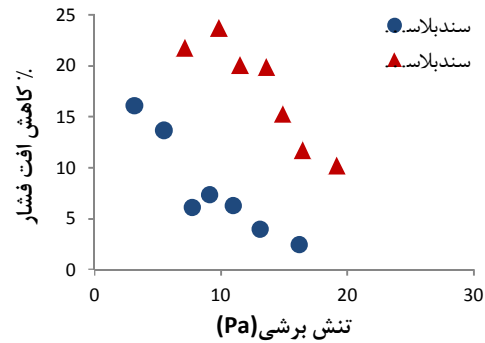


شکل ۱۳- تاثیر جوشش بر پایداری پوشش و کاهش افت فشار

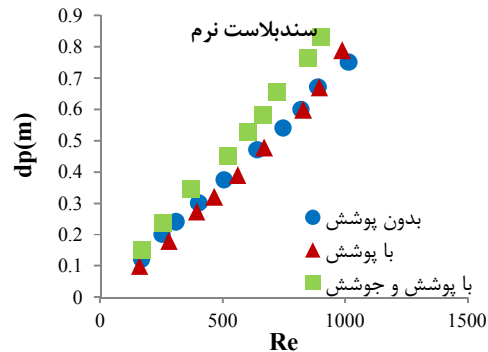
علاوه بر این، طول لغزش را می‌توان از معادله (۳) بدست آورد که در شکل ۱۴ در تنش‌های برشی مختلف رسم شده است. همانطور که انتظار می‌رفت، طول لغزش برای سطح آبرگریز صاف بسیار کوچکتر از آن است که بتوان اندازه‌گیری انجام داد، اما طول لغزش بزرگتری را می‌توان در سطوح آبرگریز زبر مشاهده کرد. همانطور که در شکل مشخص است، این طول با اضافه کردن فرآیند جوشش به طور قابل توجهی بهبود یافته است.

در نهایت داده‌های تجربی در جدول ۱ بطور خلاصه آورده شده است. واضح است که در نمونه ۴ که دارای زبری سلسله مراتبی است، افت فشار به شکل قابل توجهی کاهش و طول لغزش افزایش یافته است.

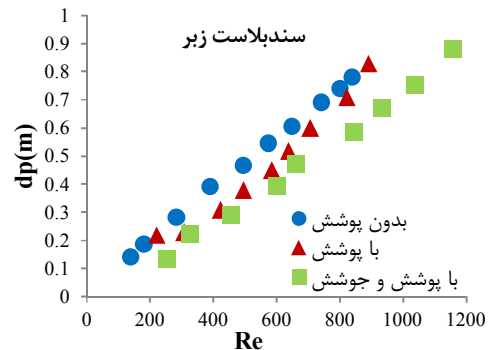
فرآیند جوشش در سطوح آبرگریز زبر، باعث کاهش افت فشار در میکروکانال شده است؛ در حالیکه در سطح صاف تغییری ایجاد نکرده و در بعضی موارد افزایش کمی نیز مشاهده می‌شود.



شکل ۱۰- کاهش افت فشار در کانال ۱ و ۲



شکل ۱۱- مقایسه افت فشار در نمونه‌های ۱ و ۳



شکل ۱۲- مقایسه افت فشار در نمونه‌های ۲ و ۴



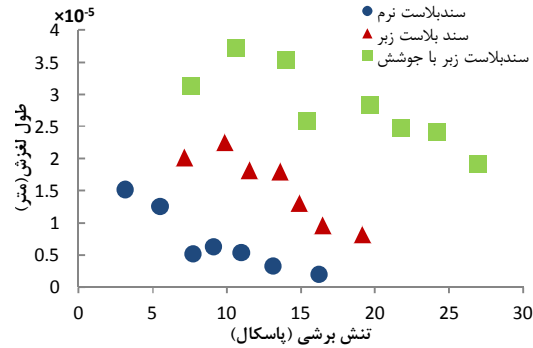
حالی که این کاهش در میکروکانال صاف محسوس نیست. در بخش دوم آزمایشات، فرآیند جوشش به روش ساخت سطوح ابرآبگریز افزوده شد. با اندازه‌گیری افت فشار در میکروکانال‌ها که توسط فرآیند جدید تهیه شدند، مشخص شد که فرآیند جوشش، دوام سطوح در آب ساکن و آب جاری را بهبود می‌بخشد و کاهش افت فشار سطوح را افزایش می‌دهد؛ بنابراین، فرآیند جوشش سطح در کنار ایجاد زبری مناسب قبل از فرآیند پوشش‌دهی، روشی بسیار ساده و ارزان قیمت برای ساخت سطوح ابرآبگریز است و می‌تواند در کاربردهای عملی و صنعتی، مورد استفاده قرار گیرد.

#### ۶- تقدیر و سپاسگزاری

این کار توسط آزمایشگاه هیدرودینامیک کاربردی گروه مهندسی مکانیک دانشگاه علم و صنعت ایران تامین مالی شد.

#### ۷- مراجع

- [1] Rothstein JP (2010) Slip on Superhydrophobic Surfaces. *Annu Rev Fluid Mech* 42: 89-109.
- [2] Cho JHJ, Law BM, Rieutord F (2004) Dipole-dependent slip of newtonian liquids at smooth solid hydrophobic surfaces. *Phys Rev Lett* 92(16): 166102-1-166102-4.
- [3] Ma M, Hill RM (2006) Superhydrophobic surfaces. *Curr Opin Colloid IN*.11(4): 193-202.
- [4] Yong CJ, Bhushan B (2010) Biomimetic structures for fluid drag reduction in laminar and turbulent flows. *J Phys Condens Matter* 22: 035104-035113.
- [5] Nouri NM, Sekhvat S, Bayani Ahangar S, Faal Nazari N (2012) Effect of curing condition on superhydrophobic surface for 7075Al. *J Disper Sci Technol* 33(6): 771-774
- [6] Cheng S, Li-Qin G, Zhong-Ze Gu (2007) Fabrication of super-hydrophobic film with dual-size roughness by silica sphere assembly. *Thin Solid Films* 515(11): 4686-4690
- [7] Chen L, Miao C, Huidi Z, Jianmin C (2009) Preparation of a 2024Al-based super-hydrophobic surface. *J Disper Sci Technol* 30(1): 48-50.
- [8] Chien-Te H, Fang-L Wu, Wei-Yu C (2010) Superhydrophobicity and superoleophobicity from hierarchical silica sphere stacking layers. *Mater Che Phys* 121(1): 14-21.
- [9] Lee C, Choi CH, Kim CJ (2016) Superhydrophobic drag reduction in laminar flows: a critical review. *Exp Fluids* 57(176): 1-20
- [10] Jia O, Blair P, Jonathan PR (2004) Laminar drag reduction in microchannels using ultrahydrophobic surfaces. *Phys Fluids* 16(12): 4635-4643



شکل ۱۴- مقدار طول لغزش در نمونه‌های مختلف

جدول ۱- نتایج تجربی برای همه نمونه‌ها

کاهش افت فشار (%)	طول لغزش (متر) × ۱۰ <sup>-۶</sup>	تنش برشی (پاسکال)	حداکثر		حداقل	
			حداکثر	حداقل	حداکثر	حداقل
۱۶	۲/۳	۱۵	۱/۹	۱۶/۲	۳/۱۴	نمونه ۱
۲۱/۷۸	۱۰/۲۱	۲۰	۸	۱۹/۱	۷/۱	نمونه ۲
۱۸/۵	۳/۵	۱۶	۲/۷	۲۰/۳	۴/۱	نمونه ۳
۴۶/۲	۲۰/۸	۶۲	۱۹	۲۶/۹	۵/۹	نمونه ۴

#### ۵- نتیجه گیری

در این مقاله اثر پیش پردازش سطوح آبرگریز و تأثیر آن بر عملکرد این سطوح بررسی شده است.

در بخش اول این کار، دو میکروکانال از سطوح ابرآبرگریز با روش پوشش دهی یکسان ساخته شدند با این تفاوت که یکی از سطوح نسبت به دیگری زبری بیشتری روی سطح داشت. سپس افت فشار در یک جریان آرام برای این میکروکانال‌ها اندازه‌گیری شد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که آب برای حرکت روی مرز با سطوح ابرآبرگریز زبر نسبت به سطوح ابرآبرگریز صاف نیروی مقاوم کمتری را تجربه می‌کند. همانطور که در نتایج نشان داده شده، کاهش اصطکاک پوسته‌ای در میکروکانال زبر تقریباً ۲۰٪ است، در

- superhydrophobic submarine model. *Langmuir* 31(1): 587-593
- [۱۹] امیدوار ا (۱۳۹۱) مقایسه اثر کاهش درگ برای ساختارهای مختلف سطوح فوق آبگریز در رژیم جریان آرام و متلاطم دانشگاه صنعتی شیراز. پایان نامه کارشناسی ارشد.
- [۲۰] نجفی ا، نجات ا، چینی ف (۱۳۹۶) ارزیابی پسای هیدروفویل ۷۰۰۳SD با سطح فوق آبگریز به کمک شبیه‌سازی عددی. *مهندسی مکانیک مدرس* ۱۳۴-۱۲۶: ۱۱۷(۲).
- [21] Min T, Kim J (2004) Effects of hydrophobic surface on skin-friction drag. *Phys Fluids* 16(7): L55-L58.
- [۲۲] راستان م، سوهانکار ا. (۱۳۹۶) شبیه‌سازی عددی جریان آشفته کانال نیم موج با سطوح آبدوست و آبگریز. روش‌های عددی در مهندسی ۳۶(۲).
- [23] Youa D, Moin P (2007) Effects of hydrophobic surfaces on the drag and lift of a circular Cylinder. *Phys fluid* 19: 081701-1-4.
- [24] Chang HH, Umberto U, Kim J, Ho CM, Kim CH (2006) Effective slip and friction reduction in nanograted superhydrophobic microchannels. *Phys Fluids* 18: 087105-1-087105-8
- [25] Salil G, Peter V, Richard T, Andrea M, Frank van Swol, Pratik S, Jeffrey CB (2005) Effective slip on textured superhydrophobic surfaces. *Phys Fluids* 17: 051701-1-051701-4.
- [11] Watanabe K, Yanuar K, Udagawa H (1999) Drag reduction of Newtonian fluid in a circular pipe with a highly water-repellent wall. *J Fluid Mech* 381: 225-238.
- [12] Yu YC, Wei QD (2006) Experimental study on physical mechanism of drag reduction of hydrophobic materials in laminar flow. *Chinese Phys Lett* 23 :1634.
- [13] Daniello RJ, Waterhouse NE, Rothstein JP (2009) Drag reduction in turbulent flows over superhydrophobic surfaces. *Phys Fluids* 21: 085103-085112.
- [14] Tretheway DC, Meinhart CD (2002) Apparent fluid slip at hydrophobic microchannel walls. *Phys Fluids* 14(3): L10-L12.
- [15] Christophe Y, Catherine B, Cécile CB, Pierre J, Lydéric B (2007) Achieving large slip with superhydrophobic surfaces: Scaling laws for generic geometries. *Phys Fluids* 19: 123601-1-123610
- [16] Zhang J, Tian H, Yao Zh, Hao P, Jian N (2015) Mechanisms of drag reduction of superhydrophobic surfaces in a turbulent boundary layer flow. *Exp Fluids* 56(179).
- [17] Gerald NR, Dodd LE, Xu BB, Wells GG, Wood D, Newton MI, McHal G (2017) Drag reduction properties of superhydrophobic mesh pipes. *Surf Topogr Metrol Prop* 5(034001).
- [18] Zhang S, Ouyang X, Li J, Gao S, Han S, Liu L, Wei H (2015) Underwater drag-reducing effect of