

مقاله پژوهشی

DOR: 20.1001.1.24767131.1399.6.2.9.5

درصد همانندی: ۱۱٪

مطالعه تجربی ساخت سطوح دنداندار کاهنده  
نیروی پسا با استفاده از روش پردازش نور دیجیتال (DLP)  
مصطفی منفرد مسقانی<sup>۱</sup>، محمدعلی علیدوستان<sup>۲</sup>، علیرضا پینش<sup>۳\*</sup>

mmonfared@mut.ac.ir

mdoostan@mut.ac.ir

binesh@mut.ac.ir

<sup>۱</sup> استادیار، مجتمع دانشگاهی هوادریا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

<sup>۲</sup> پژوهشگر، مجتمع دانشگاهی هوادریا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

<sup>۳\*</sup> نویسنده مسئول، استادیار، مجتمع دانشگاهی هوادریا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۱۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۱۸

چکیده

طبیعت زنده یک منبع اصلی برای ارائه طرح‌های خلاقانه برای حل مشکلات فنی است. پوست بدن کوسه‌های سریع به دلیل وجود ساختارهای دندان‌های با نیروی پسای پایین، منبعی برای الهام از طبیعت برای بسیاری از کاربردهای مهندسی است. هدف اصلی در این پژوهش بررسی توانایی روش‌های ساخت افزایشی و به‌کارگیری تکنیک پرینت سه‌بعدی در ساخت سطوح دنداندار کاهنده نیروی پسا است. در این مطالعه سطوح دنداندار الگو گرفته شده از پوست کوسه‌های سریع طراحی شده و با استفاده از روش پرینت سه‌بعدی پردازش نور دیجیتال (DLP) در ابعاد میکرون از رزین زرد رنگ ساخته شده است. سپس یک کانال بسته از جنس پلکسی گلاس که سطح پایینی آن شامل سطح دنداندار است، برای ارزیابی قابلیت این سطوح در کاهش افت فشار طراحی و ساخته شده است. یک سامانه مهندسی شامل پمپ، روتامتر، مخزن آب، اتصالات، مبدل فشاری، منبع تغذیه و نمایشگر برای اندازه‌گیری میزان افت فشار درون کانال از سطوح مختلف ساخته شده است. آزمون‌ها برای رینولدزهای مختلف برای سطوح دنداندار گوناگون ساخته شده انجام و نتایج مربوط به مقادیر افت فشار با داده‌های تجربی نمونه شاهد مقایسه شده است. نتایج بیانگر توانمندی سطوح دنداندار ساخته شده در کاهش افت فشار درون کانال است.

واژه‌های کلیدی: نیروی پسا، افت فشار، سطح دنداندار، پرینت سه‌بعدی، پردازش نور دیجیتال (DLP)، کانال بسته

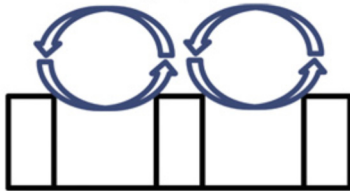
## ۱. مقدمه

در طول تاریخ علم، محققان با الهام گیری از دنیای گیاهان و جانوران و طراحی به روش مهندسی معکوس، به دنبال حل مسائل مختلف مهندسی بوده‌اند. در این حوزه، الهام گیری از ساختارها و مواد موجود در طبیعت از اهمیت بیشتری برخوردار بوده و طراحی‌های مبتکرانه زیادی با استفاده از آن‌ها برای حل مسائل گوناگون ارائه شده است. از نمونه نوآوری‌های برگرفته شده از طبیعت می‌توان به مواردی مانند سامانه‌های هیدرودینامیکی الهام گرفته از پوست دلفین‌ها و کوسه‌ها، پنجره‌های خودتمیز شونده الهام گرفته شده از برگ ابرآبگریز نیلوفر آبی و ربات‌های بالارونده از دیوار که از پای چسبیده مارمولک خانگی ایده برداری شده است، اشاره کرد [۱-۷].

دو گروه از مشکلات مهندسی که صنایع گوناگونی با آن روبرو هستند، شامل نیروی پسای سیال و رسوب گرفتگی بیولوژیکی هستند. نیروی پسای یک نیروی مقاوم از طرف سیال بوده که به جسمی که با جریان در ارتباط است، وارد می‌شود. رسوب گرفتگی بیولوژیکی ناشی از تجمع مواد بیولوژیکی بوده که به شکل گیری لایه‌هایی از میکروارگانیسم‌ها و ماکروارگانیسم‌ها منجر می‌شود. سطوح با نیروی پسای پایین اغلب از قابلیت رسوب گرفتگی پایین و ذخیره انرژی بالاتر، که در صناعی نظیر بدنه کشتی و خطوط انتقال سیال حائز اهمیت است، برخوردارند [۸-۱۸].

برخی از گیاهان و جانوران به صورت ذاتی از مزایای نیروی پسای پایین و مقاوم بودن در برابر رسوب گرفتگی بیولوژیکی برخوردار هستند. به طور نمونه فلس‌های بدن ماهی‌ها حتی در آب آلوده به روغن، به دلیل سطح بدن روغن‌گریز، تمیز باقی می‌مانند. پوست کوسه‌های سریع دارای نیروی پسای پایینی بوده و به دلیل میکروساختارهای دندانهای و لایه مخاطی موجود روی آن، ضدخزه و رسوب نیز هستند. پوست کوسه شامل میکروساختارهای کوچکی به شکل دندان‌ها بوده و در سرتاسر بدن آن به صورت موازی با راستای جریان در سائزهای گوناگونی قرار دارد. همان‌طور که در شکل ۱ مشخص است، این دندان‌ها به بلند کردن و نگه داشتن گردابه‌ها در زیر لایه لزج منجر می‌شوند. جدا شدن گردابه‌ها، با کاهش مساحت مؤثر تماسی، تنش برشی

کل را کاهش می‌دهد. در واقع گردابه‌ها تنها با مساحت کوچکی از نوک دندان‌ها در تماس هستند. همچنین نگه‌داشتن گردابه‌ها در زیر لایه لزج، باعث کاهش حرکت آن‌ها در عرض جریان سیال و خروج گردابه‌ها از زیر لایه لزج شده که این مسئله سبب کاهش تلفات انرژی می‌شود. بنابراین کاهش نیروی پسای به افزایش سرعت جریان سیال روی پوست کوسه، کاهش زمان رسوب میکروارگانیسم‌ها، افزایش قابلیت شستشو و در نهایت بالابردن توان ته‌اجمی کوسه در حین شنا کردن منجر می‌شود. گردابه‌های آشفته در سایر محیط‌های سیالی مانند هوا نیز وجود دارد؛ بنابراین دندان‌های الگو گرفته شده از پوست کوسه می‌تواند نیروی پسای را در محیط‌های سیالی دیگر نیز کاهش دهد [۱۹].



شکل ۱. بلند شدن و نگه‌داشته شدن گردابه‌ها توسط دندان‌ها [۱۹]

نتایج تجربی بیانگر این موضوع هستند که سطوح الهام گرفته شده از دندان‌های موجود بر پوست کوسه، به صورت قابل ملاحظه‌ای نیروی پسای را در جریان‌های داخلی و خارجی کاهش می‌دهند. جریان‌های داخلی به دلیل وجود دیواره‌های محصورکننده جریان، که سبب برهم‌کنش با سیال می‌شوند، روند متفاوتی با جریان‌های خارجی دارند. در جریان‌های خارجی، رشد لایه مرزی اغلب در طول سطح ادامه می‌یابد، اما در جریان‌های داخلی لایه مرزی به وسیله ابعاد کانال محدود شده است. به علاوه این که در جریان‌های داخلی، گردابه‌های آشفته با دیواره‌ها محبوس شده‌اند. این تفاوت‌ها سبب شده تا محققان خواص سطوح دندان‌دار کاهنده نیروی پسای را در هر دو جریان داخلی و خارجی مورد بررسی قرار دهند [۱۹].

اندازه‌گیری نیروی پسای در جریان‌های خارجی و افت فشار در جریان‌های داخلی توصیف‌کننده کارایی سطوح دندان‌دار کاهنده نیروی پساست. در تحقیقات تجربی پیشین، انواع هندسه دندان‌ها، مواد، سیال‌ها و شرایط جریان (جریان‌های آرام و آشفته) بررسی شده است. هندسه دندان‌ها شامل

مورد مطالعه قرار دادند. در این پژوهش دقت رویکردهای مختلف عددی در نحوه ارزیابی قابلیت هندسه‌ها مورد بررسی قرار داده شده است [۳۲]. در پژوهش صورت گرفته توسط مینگوری و همکارانش در سال ۲۰۲۱، دندانهای کروی شکل با ارتفاع‌های مختلف برای بررسی قابلیت آن‌ها در کاهش نیروی پسا به صورت عددی مورد ارزیابی قرار داده شدند. حداکثر کاهش نیروی پسا به دست آمده در حدود ۲۴/۸ درصد بوده است [۳۳].

ساخت افزایشی یا تولید افزایشی<sup>۱</sup>، که به اختصار AM نامیده می‌شود، به مجموعه‌ای از محصولات گفته می‌شود که با فناوری پرینترهای سه بعدی تولید شده باشند. معنی واژه AM در واقع ساخت یک شیء با افزودن ماده به آن به صورت لایه به لایه است. این واژه به وسیله مؤسسه بین‌المللی ASTM برای استفاده در این فناوری به وجود آمده است. اما با گذشت زمان، این فناوری با نام‌های بسیاری مانند پرینت چندبعدی، لایه‌بندی سه بعدی و پرینت سه بعدی مطرح شده است. در میان این نام‌ها پرینت سه بعدی به خاطر شباهت بسیار زیاد آن به نوع فرایند این نوع فناوری، بیشتر مورد استقبال قرار گرفته است. امروزه این فناوری به طور چشمگیری در حال رشد است. فناوری جدیدی که به عنوان آغازی برای ساخت سریع نمونه‌های اولیه از محصولات پزشکی، دندان پزشکی، هوافضا یا صنایع خودرو به کار می‌رود. روش ساخت افزایشی انواع مختلفی شامل SLA<sup>۲</sup>، FDM<sup>۳</sup>، DLP<sup>۴</sup>، SLS<sup>۵</sup> و جوهرافشان<sup>۶</sup> دارد.

روش‌های ساخت افزایشی برای برطرف کردن مشکلات روش‌های سنتی ساخت کاهشی مانند تراشکاری، ماشین کاری، مته‌زنی، برش لیزری، تخلیه الکتریکی و شیمیایی، پدید آمدند. نخستین مزیت روش‌های ساخت افزایشی، کاهش مقدار ماده مصرفی است، زیرا در روش‌های ساخت کاهشی، ماده از بلوک مورد نظر برداشته می‌شود تا هندسه مطلوب تولید شود، اما در روش ساخت افزایشی مقدار ماده مورد نیاز برای ساخت هندسه قابل کنترل است. همچنین روش‌های ساخت افزایشی قابلیت تولید قطعات پیچیده و کوچکی که تولید آن توسط روش‌های ساخت سنتی دشوار هستند را دارند. از دیگر مزایای روش‌های ساخت افزایشی، کاهش هزینه تولید و زمان است. البته این

تیغه‌ای، اره‌ای و صدفی شکل در آرایش‌های پیوسته و منقطع در هوا، آب و روغن بوده است. مطالعات جریان خارجی در تونل باد شامل پوشش‌های فلزی و پلیمری پیوسته از دندانهای صدفی و اره‌ای هستند. بررسی‌های مربوط به جریان داخلی درون کانال‌ها پلیمرهای پیوسته و منقطع از دندانهای اره‌ای هستند [۲۰-۲۷]. بر اساس مطالعات تجربی انجام شده توسط بوشان و همکارانش در سال ۲۰۱۰، دندانهای پلیمری باعث کاهش افت فشار به میزان ۲۳٪ در یک کانال آب بسته شده است [۲۸]. در پژوهش انجام شده توسط بچرت و همکارانش در سال ۱۹۹۷ در کانال روباز از جریان روغن با دندانهای فلزی، نیروی پسا به میزان ۱۰٪ کاهش یافته است [۲۹]. در تحقیق‌های صورت گرفته به وسیله بوشان و همکارانش در سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۲، با به کارگیری سطوح دنداندار الگو گرفته از پوست کوسه، افت فشار به میزان ۳۰٪ در یک کانال بسته جریان آب کاهش یافته است [۲۸، ۳۰]. در پژوهش انجام شده توسط بوشان و همکارانش در سال ۲۰۱۳، دندانهای اره‌ای و تیغه‌ای شکل و سطوح دنداندار با پوشش آب‌گریز به صورت پیوسته و منقطع در یک کانال جریان برای دو سیال آب و هوا به صورت تجربی مورد بررسی قرار داده شده است. نتایج بیانگر این موضوع است که حداکثر افت فشار برای سطح دنداندار تیغه‌ای شکل با پوشش آب‌گریز در جریان آب به میزان ۳۴٪ بوده و حداکثر کاهش افت فشار در جریان هوا برای سطح دنداندار اره‌ای شکل به میزان ۲۶٪ است [۱۹].

اندیکات و همکارانش در سال ۲۰۲۰ تأثیر به کارگیری دنداندارها در کاهش نیروی پسا اصطکاکی در جریان آشفته در یک کانال کوچک را به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش ۶ هندسه مختلف از دنداندارها در اندازه‌های مختلف که در مجموع ۲۱ آرایش متفاوت را شامل می‌شوند، مطالعه شده است. نتایج بیانگر این است که دندانهای مثلثی با زاویه قله ۳۰ درجه و تیغه‌ای شکل به شکل گیری ناپایداری در نزدیکی دیواره شده و دندانهای مثلثی با زاویه قله ۶۰ تا ۹۰ درجه و همچنین دندانهای دوزنقه‌ای شکل بیانگر ناپایداری‌های ناچیز در نزدیکی دیواره هستند [۳۱]. سلیمانی و اکلز در سال ۲۰۲۰، هندسه بهینه دنداندارها در کاهش نیروی پسا و بهینه فرایند انتقال حرارت را

$$v_f = \left( \frac{\tau_0}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

که  $\tau_0$  تنش برشی دیواره در رابطه بالا از رابطه زیر محاسبه می شود [۱ و ۳]:

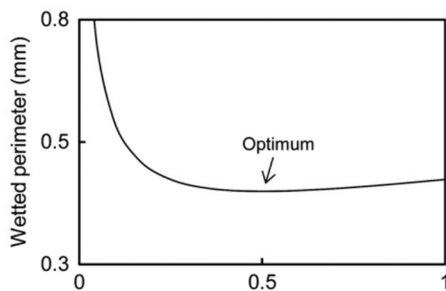
$$\tau_0 = 0.039 v^{\frac{1}{4}} \rho V^{\frac{7}{4}} D_H^{-\frac{1}{4}} \quad (4)$$

که  $V$  و  $D_H$  به ترتیب سرعت متوسط جریان و قطر هیدرولیکی کانال هستند.

به طور کلی بهینه سازی هندسه دندانها از دو منظر مورد بررسی قرار داده می شود، ابتدا جدا کردن و بلند کردن گردابه ها و قرارگیری بر بالای دندانها، سپس کاهش نیروی پسا. چنانچه شیار میان دندانها به صورت یک کانال روباز در نظر گرفته شود، با کمینه کردن محیط خیس شده می توان به نسبت بهینه  $h/s$  برای دندانها رسید. برای کانال روباز محیط خیس شده  $P$  به صورت زیر تعریف می شود [۱، ۲]:

$$P = s + 2h \quad (5)$$

شکل ۳ نشان دهنده محیط خیس شده بر اساس نسبت  $h/s$  است. هنگامی که نسبت  $h/s$  به سمت صفر میل می کند، هندسه به یک کانال کم عمق مسطح تبدیل می شود که به افزایش قطر هیدرولیکی، سطح تماسی، محیط خیس شده و ضریب اصطکاک منجر خواهد شد. هنگامی که  $h/s=0.5$  می شود، محیط خیس شده حداقل مقدار خود را دارا بوده و بهینه ترین حالت برای کاهش نیروی پسا است.



شکل ۳. تغییرات محیط خیس شده  $P$  بر حسب نسبت  $h/s$  [۱]

همچنین نتایج تجربی بیانگر این موضوع است که  $s^+$  در بازه ۱۵ تا ۲۰ و  $h^+$  در حدود ۸ تا ۱۰ حالت بهینه در کاهش نیروی پسا هستند [۱، ۴].

### ۳. ارزیابی سطوح کاهنده نیروی پسا

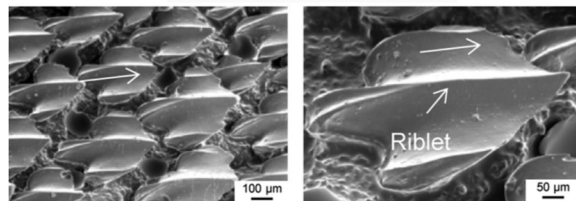
یک روش متداول برای کمی سازی میزان کاهش پسای اصطکاکی یک سطح، اندازه گیری مستقیم افت فشار هنگام

نوع روش ها معیابی نیز دارند به طور نمونه اگرچه روش های ساخت افزایشی برای تولید قطعات کوچک مقرون به صرفه هستند، اما تولید قطعات بزرگ با این نوع فناوری ها به افزایش هزینه و زمان تولید و پایین آمدن کیفیت قطعات تولیدی منجر می شود.

هدف اصلی در این تحقیق، مطالعه و بررسی توانایی روش های ساخت افزایشی و به کارگیری تکنیک پرینت سه بعدی در ساخت ریزساختارها در ابعاد میکرون روی سطح است. به همین منظور در ابتدا سطح دنداندار با الگوگیری از پوست بدن کوسه های سریع طراحی شده و با انتخاب روش مناسب ساخت افزایشی، قطعه مورد نظر ساخته می شود. سپس قابلیت قطعه مورد نظر در کاهش نیروی پسا، با انجام آزمون های آزمایشگاهی در یک کانال بسته و اندازه گیری میزان افت فشار تولید شده با این قطعات در کانال ساخته شده، انجام می شود.

### ۲. سطوح دنداندار

شکل ۲ نشان دهنده دندانهای موجود روی پوست کوسه های سریع است. فاصله میان دندانها  $s$  و ارتفاع دندانها به ترتیب در حدود  $125 \mu m$  و  $50 \mu m$  است.



شکل ۲. تصویر SEM مربوط به دندانهای موجود بر روی پوست بدن کوسه سریع [۱۹]

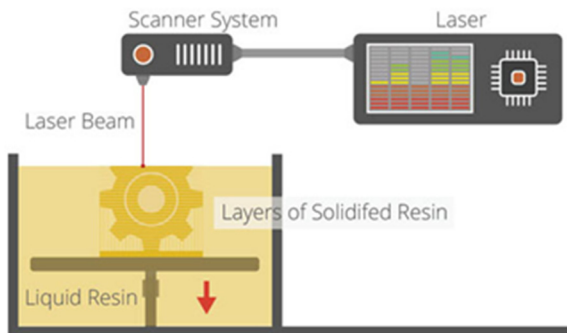
پارامترهای بی بعد سطوح دنداندار به صورت فاصله بی بعد  $s^+$  و ارتفاع بی بعد  $h^+$  به صورت زیر محاسبه می شود [۱، ۳]:

$$h^+ = \frac{h v_\tau}{v} \quad (1)$$

$$s^+ = \frac{s v_\tau}{v} \quad (2)$$

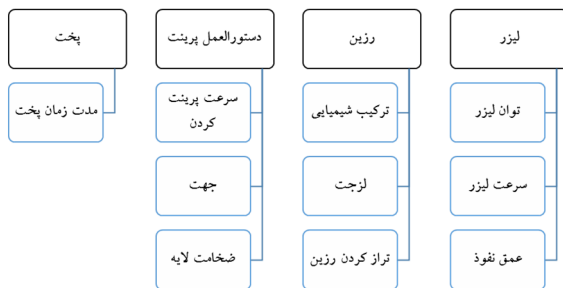
که  $v_\tau$  سرعت اصطکاکی بوده و با استفاده از تنش برشی دیواره  $\tau_0$  به صورت زیر به دست می آید:

ماوراءبنفش (UV) و فایل سه‌بعدی که پلتفرم و جهت تابش اشعه را کنترل می‌کند (شکل ۴). نمونه‌سازی در این فناوری بدین شرح است که ابتدا لایه‌ای نازک بر روی پلتفرم‌های سوراخ‌دار گذاشته می‌شود و سپس با تاباندن اشعه به سطح پلتفرم، اولین لایه به‌وسیله فایل سه‌بعدی آن ساخته می‌شود. پس از آنکه مخزن پلتفرم کاهش یافته و لایه اول به‌صورت جسمی سخت تبدیل شد، سطح جدیدی از پلیمر را به پلتفرم اضافه کرده و دوباره با تاباندن اشعه، لایه بعدی به لایه قبل چسبیده و شروع به سخت شدن می‌کند. این روند برای تمامی لایه‌های جسم موردنظر تکرار می‌شود تا نمونه کامل شود. سپس نمونه از پلتفرم جدا شده و برای از بین بردن رزین‌های اضافی، جسم در کوره‌ای از اشعه پخت داده می‌شود تا به شکل واقعی نمونه نزدیک شود.



شکل ۴. نمای شماتیک از چاپ سه‌بعدی به روش SLA [۱]

پارامترهای اثرگذار بر عملکرد پرنترهای سه‌بعدی به روش SLA به‌طور مختصر در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵. پارامترهای اثرگذار در فرایند پرنتر با روش SLA

#### ۴-۲. فناوری پردازش نور دیجیتال (DLP)

فناوری پردازش نور دیجیتال DLP<sup>A</sup> یکی دیگر از انواع روش‌های به کار گرفته شده در پرنترهای سه‌بعدی است که عملکردی بسیار شبیه چاپگرهای SLA دارد. در این فناوری از میکروآینه‌های دیجیتال روی یک تراشه نیمه‌رسانا استفاده

عبور سیال بر روی آن سطح در یک کانال است. این روش بررسی اثر سطح بر کاهش نیروی پسا با اندازه‌گیری تفاوت فشار ورودی و خروجی درون کانال است. ضریب اصطکاک در واقع بیان‌کننده نسبت تنش برشی دیواره و انرژی سینتیکی سیال است. بر این اساس کاهش نیروی پسا، در جریان یکسان وقتی اتفاق می‌افتد که افت فشار کاهش یابد. رابطه ۶ بیانگر ارتباط میان افت فشار و ضریب اصطکاک سطحی است. در این رابطه  $\Delta P$  افت فشار،  $\rho$  دانسیته سیال،  $V$  سرعت جریان،  $f$  ضریب اصطکاک،  $L$  طول کانال و  $D_H$  قطر هیدرولیکی کانال است [۱، ۲]:

$$f = \frac{\Delta P D_H}{2 \rho V^2 L} \quad (6)$$

بنابراین چنانچه  $\Delta P_s$  و  $\Delta P_{DR}$  به ترتیب بیانگر افت فشار درون کانال معمولی و کانال با سطح کاهنده نیروی پسا باشد، آنگاه میزان کاهش نیروی پسا توسط سطح کاهنده نیروی پسا با رابطه زیر بیان می‌شود:

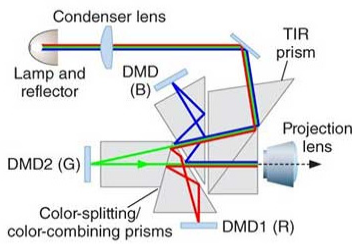
$$DR (\%) = \frac{\Delta P_s - \Delta P_{DR}}{\Delta P_s} \times 100 \quad (7)$$

#### ۴. فناوری پرنتر سه‌بعدی

در این بخش انواع فناوری‌های پرنتر سه‌بعدی مورد بررسی قرار داده شده و روش مناسب برای ساخت سطح کاهنده نیروی پسا انتخاب شده است.

#### ۴-۱. فناوری استریولیتوگرافی (SLA)

فناوری استریولیتوگرافی SLA<sup>V</sup> از قدیمی‌ترین روش‌های پرنتر سه‌بعدی و سرعت بالا است. قطعات چاپ‌شده با فناوری SLA به قدری محکم هستند که می‌توان از آن‌ها الگوی انواع روش‌های قالب‌گیری را تولید کرد. این روش بسیار سریع و ارزان‌قیمت بوده و می‌توان شکل‌های متنوعی از مواد را با آن تولید نمود. بنابراین با وجود این که این روش نسبت به سایر تکنیک‌های موجود در این زمینه قدیمی است، اما هنوز از آن برای تولید دقیق نمونه‌های اولیه استفاده می‌شود. در این فناوری از یک مایع رزین و تابیدن اشعه بر روی این مایع و در نهایت جامد شدن آن و ساختن نمونه استفاده می‌شود. فناوری SLA دارای چهار بخش اصلی است؛ مخزنی که با پلاستیک مایع (پلیمر) پوشانده می‌شود، پلتفرم سوراخ‌داری که حجم مخزن را کاهش می‌دهد، اشعه



شکل ۶. نمای شماتیک از چاپ سه بعدی به روش DLP

پارامترهای اثرگذار بر عملکرد پرینترهای سه بعدی به روش DLP به طور مختصر در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷. پارامترهای اثرگذار در فرایند پرینت با روش DLP

### ۳-۴. فناوری مدل سازی نهشت ذوبی (FDM)

در فناوری مدل سازی نهشت ذوبی<sup>۹</sup> FDM نمونه های کاربردی و قطعات قابل استفاده از ترموپلاستیک های استاندارد با عملکرد بالا تولید می شوند. مزیت این فناوری در توانایی تولید قطعات با مقاومت بالاست که این قطعات تولید شده با دوام و محکم بوده، در مقابل حرارت و مواد شیمیایی مقاوم هستند و در طیف گسترده از برنامه های کاربردی می توان از آنها استفاده نمود. در این فناوری، ماده ترموپلاستیک با یک نازل دمابالا، برای ساخت یک مدل سه بعدی به صورت لایه به لایه، اکستروود می شود. نازل شامل یک واحد کنترل کننده دما بوده تا دمای ماده ترموپلاستیک بالاتر از نقطه ذوب نگه داشته شود و به راحتی از میان نازل جریان یابد. ماده مذاب پس از جریان یافتن از نازل، بلافاصله در ناحیه موردنظر به ماده جامد تبدیل می شود. هنگامی که یک لایه ساخته می شود، پلتفرم به سمت پایین حرکت کرده و نازل لایه بعدی را بر آن اکستروود می کند. این فرایند تا شکل گیری کامل مدل ادامه می یابد (شکل ۸). یکی از مزایای اصلی این نوع فناوری، به کارگیری انواع پلیمرهای ترموپلاستیک است که از این موارد می توان به ABS، پلی کربنات و پلی استایرن اشاره کرد.

می شود (شکل ۶). فناوری DLP به مانند SLA، با کیفیتی بالاتر، از فوتوپلیمرها استفاده می کنند. اما چیزی که این دو فناوری را از یکدیگر متمایز می سازد نحوه استفاده از منابع نوری است. در فناوری DLP، پرینترهای سه بعدی اولیه از منابع نوری متعارف مانند چراغ های قوسی نور استفاده می کنند. قطعه مهم دیگر در این فناوری، صفحه نمایش کریستالی مایع است که در طول عملیات پرینت سه بعدی به تمامی لایه های موردنظر اعمال می شود. مواد مورد استفاده در این فناوری رزینی است که در ظرف رزینی شفاف نگهداری می شود. رزین فوراً و پس از قرارگیری در معرض سرچشمه نور مستقیم سخت می شود. لایه ای از چنین مواد سختی می تواند ظرف چند ثانیه چاپ شوند. نتیجه چاپ با چنین دستگاهی بسیار قوی با وضوح تصویر بسیار بالاست. مزیت بسیار بزرگ چاپگرهای DLP بر دیگر انواع چاپگرهای سه بعدی از جمله SLA، استفاده بسیار کمتر از مواد برای ایجاد جزئیات در چاپ سه بعدی است که باعث کاهش هزینه های پرینت و کاهش مواد زائد است. از این روش برای ساخت نمونه های با دقت بالا در صنعت طلاسازی، دندانپزشکی و برخی از صنایع که از نمونه چاپ شده به عنوان نمونه ای که در قالب گچی یا سرامیکی قرار می گیرد، استفاده می شود.

از جمله مزایای این فناوری می توان به موارد زیر اشاره کرد:

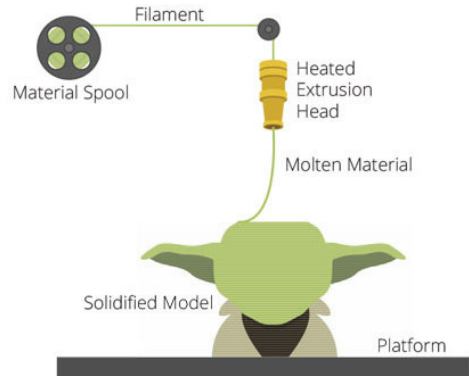
- دقت بسیار بالا در ساخت (حداکثر ۵ میکرومتر)،
- سرعت بالای تولید نمونه اولیه،
- استفاده از رزین هایی با قابلیت ریخته گری دقیق،
- صافی سطح بسیار بالا.

جدول ۱. تفاوت میان فناوری SLA و DLP

فناوری	دقت چاپ	نوع چاپ لایه ها	سرعت پرینت
SLA	۵۰ تا ۱۵۰ میکرومتر	توسط لیزر پیکسل به پیکسل	بسته به پیچیدگی طرح متفاوت است.
DLP	۵ تا ۵۰ میکرومتر	توسط تابش نور به طور یکجا	ثابت است و به پیچیدگی طرح یا تعداد نمونه ها بستگی ندارد.

به طور کلی در مقایسه با فناوری SLA، ساخت آن بسیار سریع تر و دقیق تر است و قطعات تولیدی به وسیله آن وضوح بالایی دارند. در جدول ۱ برخی از تفاوت های اصلی روش های SLA و DLP نشان داده شده است.

وجود دارد. این روش‌ها شامل پرینتر جوهرافشان پیوسته<sup>۱۱</sup> (CIJ) و پرینتر جوهرافشان پاششی-درخواستی<sup>۱۲</sup> (DOD) می‌باشند. هر دو روش تولید قطره، می‌توانند قطراتی از سیال با قطری در محدوده ۱۰ تا ۱۵۰ μm تولید کنند. روش CIJ عمدتاً برای کاربردهای با سیال لزجت پایین و سرعت قطره بالاتر، با قطر قطره در حدود ۱۰۰ μm به کار گرفته می‌شود، و روش DOD به‌طور عمده در چاپ متون و طرح‌های گرافیکی با قطر قطره کوچک‌تر و در محدوده ۲۰ تا ۵۰ μm مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۸. نمای شماتیک از چاپ سه‌بعدی به روش FDM

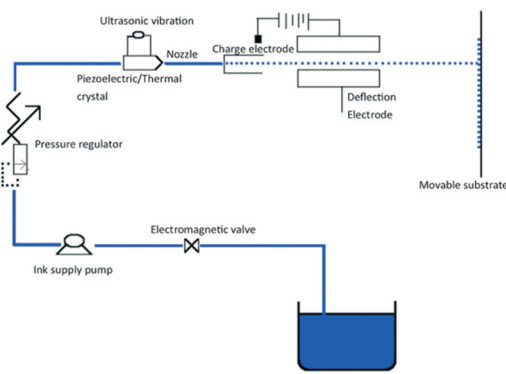
همان‌طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، در روش DOD، پالس موردنیاز به دو روش حرارتی یا پیزوالکتریکی تولید می‌شود. در DOD حرارتی، جوهر به صورت موضعی حرارت داده شده و حباب‌های بخار به صورت قطرات جوهر از نازل خارج می‌شود. در DOD پیزوالکتریکی، پالس‌های آکوستیکی با تغییر شکل المان پیزوالکتریک تولید شده و در نتیجه قطره جوهر از نازل به سمت بیرون خارج می‌شود.

پارامترهای اثرگذار بر عملکرد پرینترهای سه‌بعدی به روش FDM به‌طور مختصر در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل ۹. پارامترهای اثرگذار در فرایند پرینت با روش FDM

DOD پیزوالکتریکی برای انواع محلول‌ها مناسب‌اند؛ در صورتی که DOD حرارتی تنها برای محلول‌های فرار قابل استفاده‌اند. چهار المان اصلی برای افزایش دقت عملکرد پرینترهای جوهرافشان وجود دارد که در شکل ۱۱ نمایش داده شده است.



شکل ۱۰. نمای شماتیک از چاپ سه‌بعدی به روش DOD



شکل ۱۱. پارامترهای اثرگذار در فرایند پرینت جوهرافشان

#### ۴-۴. فناوری ساخت‌سازی لیزری گزینشی (SLS)

فناوری ساخت‌سازی لیزری گزینشی<sup>۱۳</sup> SLS یکی از روش‌های تولید افزایشی است که با استفاده از لیزر به‌عنوان منبع تغذیه باعث رسوب مواد اولیه (که اغلب فلز است) می‌شود. در این روش لیزر به‌طور خودکار نقاط تعریف شده توسط مدل سه‌بعدی را هدف قرار داده و مواد اولیه را برای ایجاد یک ساختار جامد به هم متصل می‌کند. این روش در مقایسه با دیگر روش‌های پرینت سه‌بعدی از مواد اولیه مختلفی برای کاربردهای گوناگون استفاده می‌کند. موادی از جنس پلیمرها مانند نایلون (خالص و شفاف)، پلی‌استر، فلزات (از جمله فولاد و تیتانیوم) آلیاژهای مخلوط، کامپوزیت‌ها و شن می‌توانند به‌عنوان مواد اولیه چاپ به‌وسیله این فناوری به کار روند، که نمونه ساخته‌شده به‌وسیله این مواد استحکام زیادی دارند.

#### ۴-۵. پرینت سه‌بعدی با فناوری جوهرافشان Ink-Jet

پرینت سه‌بعدی با فناوری جوهرافشان یک فناوری سریع، منعطف و از نظر هزینه مقرون‌به‌صرفه است که قادر است اشیاء سه‌بعدی ساده یا پیچیده را به‌طور مستقیم از داده‌های طراحی به کمک کامپیوتر (CAD) بدون نیاز به ابزار دیگری بسازد. دو مکانیزم متفاوت برای تولید قطره با پرینترهای جوهرافشان

## ۴-۶. انتخاب روش

همان گونه که پیش از این گفته شد هدف اصلی در این تحقیق مطالعه و بررسی توانایی روش های ساخت افزایشی و به کارگیری تکنیک پرینت سه بعدی در ساخت ریزساختارها در ابعاد میکرون روی سطح است. بنابراین از بین تکنیک های مطرح در پرینت سه بعدی تنها تکنیکی قابل استفاده است که بسیار دقیق و از رزولوشن بالایی برخوردار باشد. بررسی های صورت گرفته روی تکنیک های مختلف نشان می دهد که تکنیک هایی مانند SLA، DLP، Ink-Jet-DoD، پتانسیل تولید ریزساختارها در ابعاد میکرون را دارند. در مقایسه دو روش تکنیک DLP با تکنیک SLA، این نکته حائز اهمیت است که در تکنیک اول، منبع نور به تمام سطح مخزن پلیمر از رزین های پلیمری در یک تک حرکت اعمال می شود. به طور کلی ساخت آن نسبت به تکنیک SLA بسیار سریع تر و دقیق تر بوده و قطعات تولیدی به وسیله آن وضوح بالایی دارند. پرینتر سه بعدی DLP مجهز به ابزار الکترومکانیکی کوچکی به نام دستگاه میکروآینه دیجیتال (DMD<sup>۳</sup>) است. این دستگاه که شامل تعدادی آینه های کوچک و قابل کنترل است، مسئول ایجاد طرح های حاصل از نور فرابنفش روی سطح پرینت است. در این روش رزولوشن طرح های ایجاد شده به شدت به اندازه پیکسل DMD وابسته است.

هر چند که انکار قابلیت های تکنیک Ink-Jet-DoD در ساخت اجسام جامد بدون فرم غیرممکن است. اما بررسی نتایج به دست آمده در ساخت کانال های میکروسیال با تکنیک Ink-Jet-DoD نشان می دهد که کوچک ترین اندازه برای پرینت این کانال ها حدود  $200\mu\text{m}$  است. ساختارهای کوچک تر از این، یا قابل پرینت نیستند یا بعد از ساخت، تغییر شکل می دهند. با مقایسه ظاهری سطوح قطعات حاصله از دو تکنیک DLP، و Ink-Jet-DoD از روی تصاویر تهیه شده با اسکن میکروسکوپ الکترونی SEM کاملاً مشخص است که کیفیت سطح، حفظ زوایا در گوشه های تیز و میزان نزدیکی قطعه تولیدی با طرح اصلی در مقایسه با نمونه های مشابه تولید شده با تکنیک DLP پایین تر است.

## ۵. متدولوژی ساخت

در این بخش از پژوهش نحوه ساخت نمونه و روش آماده سازی بستر آزمایشگاهی برای ارزیابی سطوح ساخته شده تشریح شده است.

## ۵-۱. ساخت نمونه

سطوح دنداندار از جنس رزین زرد با روش پرینت سه بعدی و با دستگاه B9 CORE به روش DLP تولید شده است. شکل ۱۲ نشان دهنده دستگاه پرینتر سه بعدی B9 CORE مورد استفاده در این پژوهش است. همچنین مشخصات این نوع پرینتر در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲. مشخصات پرینتر DLP از مدل B9 CORE

Build Volume W x D x H (mm) // W x D x H (inch)	57.6 x 32.4 x 127 mm // 2.27 x 1.28 x 5 inch
Printing Technology	DLP
Weight	19.5 Kg
Light Source	Industrial HD UV LED Light Engine - 405nm
Material type	B9R Emerald, Yellow, Black, compatible with other resins
Layer Thickness (microns)	Minimum 10 microns
Advertised Manufacturer Speed (mm/s)	40 - 120
Dimensions	267 x 419 x 597 mm
File Input Format	STL
Software Compatibility	Mac, Windows, Linux



شکل ۱۲. پرینتر سه بعدی DLP از مدل B9 CORE

تصاویر سطوح ساخته شده برای دو نمونه اول و دوم، که در نمونه اول فاصله میان دندانها ۵۰۰ میکرومتر و ضخامت و ارتفاع تیغه ها نیز به ترتیب ۱۰۰ و ۵۰ میکرومتر بوده و برای نمونه دوم فاصله میان دندانها ۳۰۰ میکرومتر و ضخامت و ارتفاع تیغه ها نیز به ترتیب ۱۰۰ و ۵۰ میکرومتر هستند، در شکل ۱۳ نشان داده شده است. همچنین تصاویر SEM مربوط به این سطوح (شکل های ۱۴ و ۱۵) نشان دهنده کیفیت بسیار مناسب سطوح ساخته شده هستند.



### ۲-۵. پکیج آزمایشگاهی

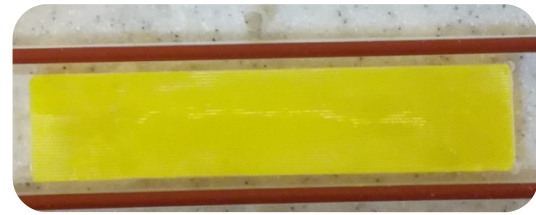
بخش‌های مختلف پکیج آزمایشگاهی ساخته شده در جدول ۳ نشان داده شده است. همچنین شکل ۱۶ نشان‌دهنده پکیج ساخته شده است. کانال ساخته شده از جنس پلکسی گلاس بوده، عرض و ارتفاع آن به ترتیب 2cm و 2.5mm هستند. کانال از سه بخش اصلی، شامل سطح بالایی، پایینی و میانی، تشکیل شده است. سطح بالایی یک سطح معمولی بوده، اما از سطح پایینی برای ارزیابی سطح کاهنده نیروی پسا استفاده می‌شود. بنابراین در بخشی از این سطح یک جانمایی به منظور قرار دادن سطح جدید در نظر گرفته شده است. همچنین در بخش میانی یک تیغه برای آب‌بندی استفاده شده است که بخش ورودی و خروجی جریان نیز در این قسمت نصب شده است. طرح ساخت مربوط به کانال در شکل ۱۷ نمایش داده شده است. همچنین در شکل ۱۸ بخش‌های مختلف کانال ساخته شده نشان داده شده است.

جدول ۳. بخش‌های مختلف پکیج آزمایشگاهی

ردیف	نوع تجهیزات
۱	میکروکانال از جنس پلکسی گلاس
۲	مبدل فشاری
۳	روتامتر
۴	پمپ
۵	مخزن ذخیره
۶	چارچوب استیل
۷	منبع تغذیه و نمایشگر
۸	لوله و اتصالات



شکل ۱۶. تصویری از پکیج ساخته شده

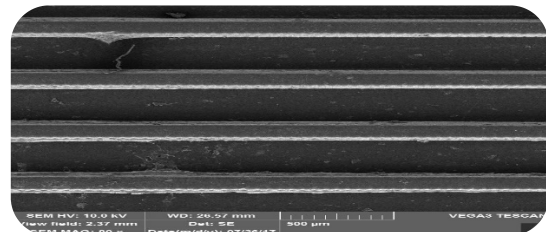


الف: نمونه اول

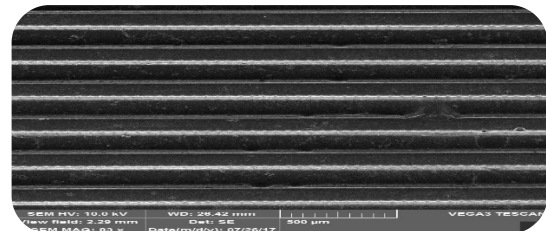


ب: نمونه دوم

شکل ۱۳. سطوح دندانه‌دار ساخته شده با استفاده از DLP

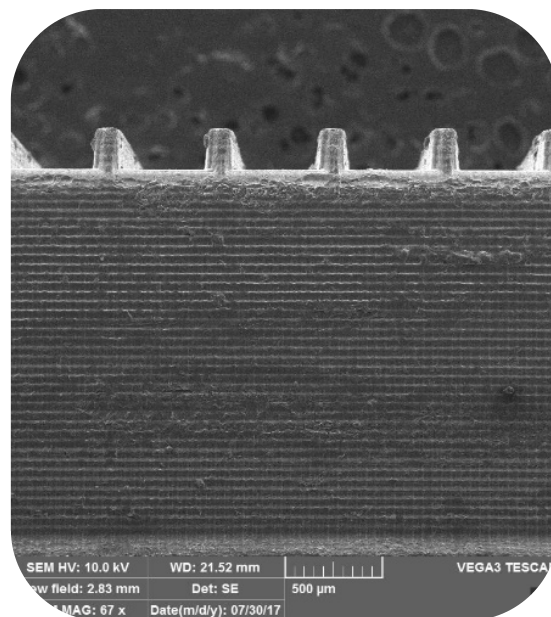


الف: نمونه اول



ب: نمونه دوم

شکل ۱۴. تصاویر SEM از روی سطوح دندانه‌دار ساخته شده

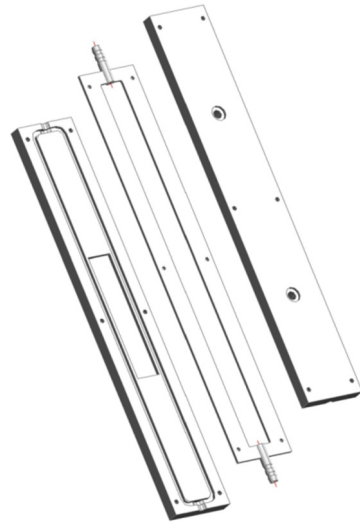


شکل ۱۵. تصویر SEM از نمای جلوی سطح دندانه‌دار برای نمونه اول

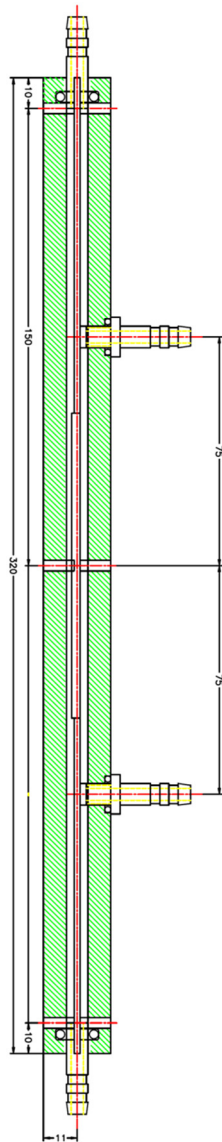
۱۵cm است. فشار به صورت مستقیم با یک مبدل اختلاف فشار به وسیله یک جفت لوله رابط به دو محل بادشده وصل و اندازه گیری می شود (شکل های ۱۹ و ۲۰). مبدل اندازه گیری فشار بین 0 تا 10mbar کالیبره شده است، که بر اساس خروجی ۴ تا ۲۰mA نمایش داده می شود.



شکل ۱۹. مبدل فشار



شکل ۱۷- بخش های مختلف کانال طراحی شده



شکل ۲۰. محل قرارگیری لوله های مبدل فشار



(الف) فریم میانی



(ب) سطح پایینی کانال



(ج) کانال آب از جنس پلکسی گلاس

شکل ۱۸. بخش های مختلف کانال ساخته شده

فشار از طریق دو محل اتصال مبدل های فشار که در فواصل ۷/۵cm و ۲۲/۵cm از محل ورود سیال واقع شده اند، اندازه گیری می شود. بنابراین فاصله بین دو محل اندازه گیری

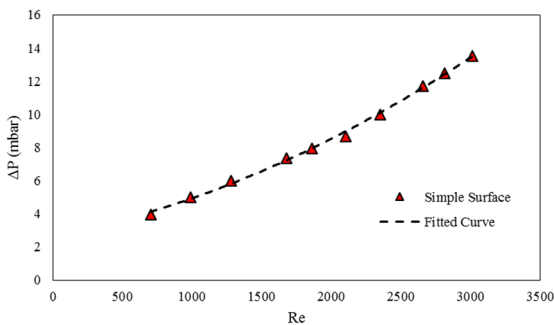
خواهد داشت. بنابراین ورود جریان با سرعت پایین در نواحی میان دندانه‌ها سبب می‌شود که بخش عظیمی از سطح تنش برشی پایینی را تجربه کند. از طرف دیگر دندانه‌ها از حرکت گردابه‌ها در عرض جریان نیز جلوگیری می‌کند. مجموعه این عوامل سبب کاهش تنش برشی سطح شده و در نتیجه سطوح دندانه‌دار ساخته شده به کاهش نیروی پسا منجر شده است.

جدول ۵. نتایج آزمایشگاهی برای کانال با سطح دندانه‌دار نمونه اول

Number	Flow rate (lit/hr)	Re. No	Pressure drop (mbar)
۱	۳۷/۴۱	۹۲۰/۸۹	۴/۰۵
۲	۴۹/۸۲	۱۲۲۶/۴۴	۵/۰۵
۳	۶۲/۶۵	۱۵۴۲/۰۱	۶/۱۰
۴	۷۳/۱۵	۱۸۰۰/۶۱	۶/۹۵
۵	۸۷/۸۳	۲۱۶۲/۰۲	۸/۱۵
۶	۹۵/۹۵	۲۳۶۱/۷۸	۹/۱۰
۷	۱۰۴/۷۷	۲۵۷۸/۹۹	۱۰/۰۰
۸	۱۰۹/۴۴	۲۶۹۳/۹۹	۱۱/۱۰
۹	۱۱۸/۴۲	۲۹۱۴/۹۴	۱۲/۰۵
۱۰	۱۲۸/۶۹	۳۱۶۷/۸۱	۱۳/۰۰

جدول ۶. نتایج آزمایشگاهی برای کانال با سطح دندانه‌دار نمونه دوم

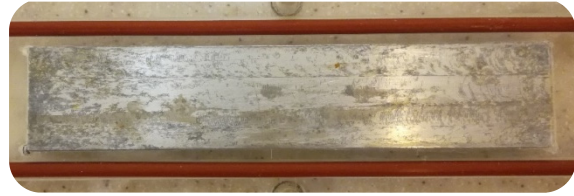
Number	Flow rate (lit/hr)	Re. No	Pressure drop (mbar)
۱	۴۱/۹۷	۱۰۳۳/۱۲	۴/۰۲
۲	۵۳/۲۰	۱۳۰۹/۵۷	۵/۰۵
۳	۶۴/۳۵	۱۵۸۳/۹۰	۶/۱۰
۴	۷۶/۵۵	۱۸۸۴/۳۴	۷/۰۰
۵	۸۵/۴۴	۲۱۰۳/۱۸	۷/۹۰
۶	۹۶/۰۵	۲۳۶۴/۳۱	۹/۰۵
۷	۱۰۳/۶۵	۲۵۵۱/۲۷	۱۰/۲۰
۸	۱۱۳/۲۶	۲۷۸۷/۷۸	۱۱/۳۰
۹	۱۲۰/۱۱	۲۹۵۶/۴۳	۱۲/۳۰
۱۰	۱۲۶/۶۴	۳۱۱۷/۲۹	۱۳/۱۵



شکل ۲۲. برازش منحنی برای نتایج آزمایشگاهی سطح شاهد

## ۶. نتایج تجربی

در ابتدا یک سطح صاف به‌عنوان نمونه شاهد (شکل ۲۱) در سطح پایینی نصب شده و نتایج مربوط به آن به‌عنوان معیار مقایسه با سطوح دندانه‌دار لحاظ می‌شود.



شکل ۲۱. نمونه شاهد

به‌منظور برداشتن آلودگی از روی سطوح دندانه‌دار، از دستگاه آلتراسونیک و ماده ایزوپروپیل الکل برای تمیز کردن سطوح استفاده شده است. سپس با نصب هر کدام از سطوح به‌صورت مجزا روی سطح پایینی کانال، در اعداد رینولدز مختلف، نتایج افت فشار درون کانال به‌صورت مقادیر میلی‌آمپر استخراج و با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج آزمایشگاهی برای سطوح مختلف در جداول ۴ تا ۶ ارائه شده است.

جدول ۴. نتایج آزمایشگاهی برای کانال با سطح صاف

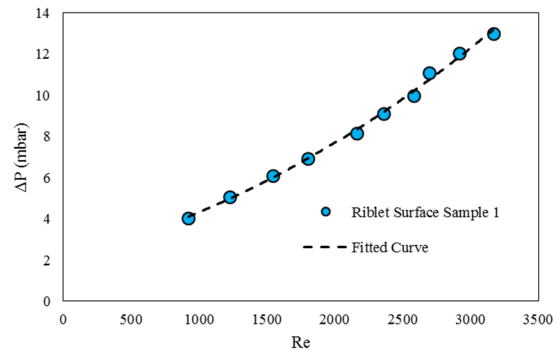
Number	Flow rate (lit/hr)	Re. No	Pressure drop (mbar)
۱	۲۸/۵۱	۷۰۱/۸۸	۳/۹۶
۲	۴۰/۲۷	۹۹۱/۲۱	۵/۰۰
۳	۵۲/۰۰	۱۲۸۰/۰۶	۶/۰۰
۴	۶۸/۰۳	۱۶۷۴/۴۹	۷/۳۵
۵	۷۵/۵۲	۱۸۵۹/۰۴	۷/۹۵
۶	۸۵/۲۸	۲۰۹۹/۲۰	۸/۶۵
۷	۹۵/۴۱	۲۳۴۸/۴۳	۱۰/۰۰
۸	۱۰۷/۸۷	۲۶۵۵/۲۴	۱۱/۷۰
۹	۱۱۴/۱۳	۲۸۱۳/۷۴	۱۲/۵۰
۱۰	۱۲۲/۳۴	۳۰۱۱/۳۶	۱۳/۵۰

به‌منظور مقایسه میان نتایج، برازش منحنی برای نتایج آزمایشگاهی انجام شده و نتایج مربوطه در شکل‌های ۲۲ تا ۲۵ ارائه شده است. با مقایسه نتایج، همان‌طور که در شکل ۲۶ مشخص است، متوسط کاهش نیروی پسا برای سطح دندانه‌دار نمونه ۱ و ۲ به ترتیب ۱۲/۴٪ و ۱۵/۲٪ است. از آن‌جاکه برهمکنش گردابه‌ها و نواحی سرعت بالا تنها با نوک دندانه‌هاست، نواحی محدودی از سطح تنش برشی بالا

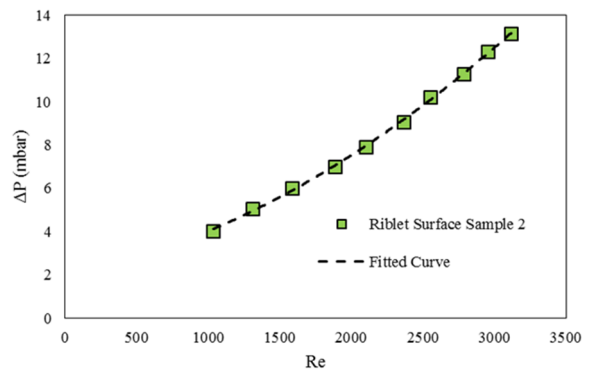
مدل B9CORE تولید شده است. دندانه‌های ساخته شده با الهام از پوست بدن کوسه‌های سریع طراحی شده است. یک کانال از جنس پلکسی گلاس که سطح زیرین آن در حالت‌های مختلف شامل سطوح صاف و دندانه‌دار است، برای ارزیابی قابلیت سطوح دندانه‌دار در کاهش افت فشار درون جریان داخلی ساخته شده است. سامانه آزمایشگاهی برای انجام تست‌های آزمایشگاهی شامل یک پمپ سانتریفیوژ، یک مبدل فشاری برای اندازه‌گیری افت فشار درون کانال، منبع ذخیره تأمین کننده سیال، یک روماتر برای تنظیم دبی جریان و صفحه نمایشگر برای نشان دادن مقادیر افت فشار اندازه‌گیری شده است. تست‌ها در محدوده جریان آرام تا آشفته انجام شده و نتایج بیانگر این است که سطح دندانه‌دار برای نمونه‌های ۱ و ۲ به ترتیب به‌طور متوسط ۱۲٪/۴ و ۱۵٪/۲ افت فشار درون کانال را کاهش داده است. یکی از علت‌های اصلی این کاهش افت فشار، کاهش مساحت مؤثر تماسی نواحی سرعت بالاست که از روش بلند کردن گردابه‌های آشفته و برهمکنش آن‌ها با نوک دندانه‌ها ایجاد می‌شود. از دیگر علل این کاهش می‌توان به جلوگیری از حرکت عرضی گردابه‌ها اشاره نمود که از خروج آن‌ها از زیر لایه لزج جلوگیری شده است. این امر به کاهش اتلاف انرژی منجر می‌شود؛ بنابراین با اتخاذ روش مناسب، پیرینتهای سه‌بعدی و وسایلی مناسب برای تولید سطوح دندانه‌دار کاهنده نیروی پسا هستند.

## مراجع

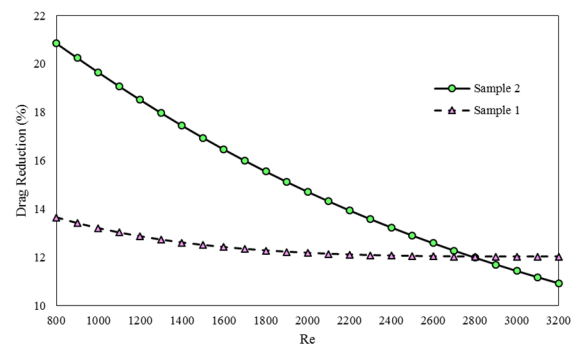
- [1] Collins MW, Brebbia CA, editors. Design and Nature II Comparing Design in Nature with Science and Engineering. UK, Southampton: WIT Press; 2004.
- [2] Bhushan B. Biomimetics: lessons from nature—an overview. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2009 Apr 28;367(1893):1445-86.
- [3] Bhushan B, editor. Springer Handbook of Nanotechnology. Third ed. New York: Springer; 2010.
- [4] Bhushan B. Biomimetics: bioinspired Hierarchical-Structured Surfaces for Green Science and Technology. Germany, Heidelberg: Springer-Verlag; 2012.



شکل ۲۳. برازش منحنی برای نتایج آزمایشگاهی سطح دندانه‌دار نمونه اول



شکل ۲۴. برازش منحنی برای نتایج آزمایشگاهی سطح دندانه‌دار نمونه دوم



شکل ۲۵. مقایسه میان میزان کاهش نیروی پسا برحسب عدد رینولدز با سطوح دندانه‌دار نوع اول و دوم

## ۷. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، ابتدا به بررسی روش‌های مختلف ساخت افزایشی یا پرینت سه‌بعدی پرداخته شده و با بررسی فناوری‌های هر روش و ارزیابی مزایا و معایب آن‌ها روش مناسب برای ساخت سطوح اتخاذ شده است. سپس دندانه‌های تیغه‌ای شکل با ابعاد مختلف از رزین زرد با تکنیک پرینت سه‌بعدی و روش DLP با استفاده از دستگاه

- Engineering Sciences. 2012 May 28;370(1967):2381-417.
- [19] Bixler GD, Bhushan B. Shark skin inspired low-drag microstructured surfaces in closed channel flow. *Journal of colloid and interface science*. 2013 Mar 1;393:384-96.
- [20] Bechert DW, Hoppe G, Reif WE. Paper presented at: AIAA Shear Flow Control Conference; 1985. New York: Boulder, CO; 1986.
- [21] Bechert DW, Bruse M, Hage WV, Van der Hoeven JT, Hoppe G. Experiments on drag-reducing surfaces and their optimization with an adjustable geometry. *Journal of fluid mechanics*. 1997 May;338:59-87.
- [22] Walsh M. Turbulent boundary layer drag reduction using riblets. In: AIAA 20th aerospace sciences meeting; 1982 Jan 11.
- [23] Walsh M, Lindemann A. Optimization and application of riblets for turbulent drag reduction. In: 22nd aerospace sciences meeting 1984 Jan 1; New York.
- [24] Wilkinson SP, Lazos BS. Direct Drag and Hot-Wire Measurements on Thin-Element Riblet Arrays. In: Liepmann HW, Narasimha R, editors. *Turbulence Management and Relaminarisation*. Berlin; Springer: 1988. p. 121-31.
- [25] Rohr JJ, Andersen GW, Reidy LW, Hendricks EW. A comparison of the drag-reducing benefits of riblets in internal and external flows. *Experiments in fluids*. 1992 Oct;13(6):361-8.
- [26] Jung YC, Bhushan B. Biomimetic structures for fluid drag reduction in laminar and turbulent flows. *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2009 Dec 21;22(3):035104.
- [27] Dean B, Bhushan B. The effect of riblets in rectangular duct flow. *Applied Surface Science*. 2012 Feb 1;258(8):3936-47.
- [28] Jung YC, Bhushan B. Biomimetic structures for fluid drag reduction in laminar and turbulent flows. *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2009 Dec 21;22(3):035104.
- [29] Bechert DW, Bruse M, Hage WV, Van der Hoeven JT, Hoppe G. Experiments on drag-reducing surfaces and their optimization with an adjustable geometry. *Journal of fluid mechanics*. 1997 May;338:59-87.
- [30] Bixler GD, Bhushan B. Bioinspired rice leaf and butterfly wing surface structures combining shark skin and lotus effects. *Soft matter*. 2012;8(44):11271-84.
- [31] Endrikat S, Modesti D, MacDonald M, García-Mayoral R, Hutchins N, Chung D. Direct numerical simulations of turbulent flow over
- [5] Allen R, editor. *Bulletproof feathers: how science uses nature's secrets to design cutting-edge technology*. University of Chicago Press; 2010.
- [6] Armstrong RE, Drapeau MD, Loeb CA, Valdes JJ, editors. *Bio-inspired innovation and national security*. Washington: National Defense University Press; 2010.
- [7] Bar-Cohen Y, Press CR, Pohlmann LD. *Biomimetics: Nature-Based Innovation*. Florida: CRC Press; 2011.
- [8] Blevins RD. *Applied fluid dynamics handbook*. New York: Van Nostrand-Reinhold; 1984.
- [9] Melo L, Bott TR, Bernardo CA, editors. *Fouling science and technology*. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers; 1988.
- [10] Lowrey P, Harasha J. A preliminary assessment of the feasibility of using riblets in internal flows to conserve energy. *Energy*. 1991 Mar 1; 16(3):631-42.
- [11] Bechert D, Bruse M, Hage W, Meyer R, Bechert D, Bruse M, Hage W, Meyer R. Biological surfaces and their technological application-laboratory and flight experiments on drag reduction and separation control. 28th Fluid dynamics conference; 1997; New York. American Institute of Aeronautics and Astronautics; 1997.
- [12] Fingerman M, Nagabhushanam R, Thompson MF, editors. *Recent Advances in Marine Biotechnology*. New Hampshire: Science Publishers, Inc; 1999.
- [13] Walker JT, Surman S, Jass J, editors. *Industrial biofouling: detection, prevention, and control*. New York: Wiley; 2000.
- [14] Railkin AI. *Marine biofouling: colonization processes and defenses*. CRC press; 2003 Dec 29.
- [15] Hellio C, Yebra D, editors. *Advances in marine antifouling coatings and technologies*. Elsevier; 2009 May 22.
- [16] Bhushan B, Jung YC. Natural and biomimetic artificial surfaces for superhydrophobicity, self-cleaning, low adhesion, and drag reduction. *Progress in Materials Science*. 2011 Jan 1;56(1):1-08.
- [17] Deyuan Z, Yuehao L, Huawei C, Xingang J. Exploring drag-reducing grooved internal coating for gas pipelines. *Pipeline Gas Journal*. 2011;238(3):58-60.
- [18] Bixler GD, Bhushan B. Biofouling: lessons from nature. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and*

various riblet shapes in minimal-span channels. Flow, Turbulence and Combustion. 2021 Jun;107(1):1-29.

- [32] Soleimani S, Eckels S. A review of drag reduction and heat-transfer enhancement by riblet surfaces in closed-and open-channel flow. International Journal of Thermofluids. 2020 Oct 29:100053.
- [33] Ao M, Wang M, Zhu F. Investigation of the turbulent drag reduction mechanism of a kind of microstructure on riblet surface. Micromachines. 2021 Jan;12(1):59.

#### پی نوشت

1. Additive Manufacturing
2. Stereolithography Apparatus
3. Fused Deposition Modeling
4. Digital Laser Printer
5. Selective Laser Sintering
6. Inject Printing
7. Stereolithography
8. Digital light processing
9. Fused Deposition Modeling
10. Selective laser sintering
11. Continuous Inkjet
12. Drop-On-Demand
13. Digital Micromirror Device