



بررسی تجربی تولید فوم در کانال مقیاس میکرو

حمیدرضا زنگنه، امیرحسین بزازی، محسن نظری*، محمدحسن کیهانی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۵-۱۷
بازنگری: ۱۳۹۸-۰۲-۰۱
پذیرش: ۱۳۹۸-۰۲-۰۸
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۲-۲۹

کلمات کلیدی:

میکروسایالات
حباب
فوم
دستگاه جریان متمرکز

خلاصه: در دستگاه‌های آزمایشگاه-روی-یک-تراشه می‌توان با حجم کمی از سیالات، آزمایش‌هایی در مقیاس کوچک، انجام داد. در این مقاله حباب‌هایی با اندازه‌ای مشخص در یک دستگاه میکروسایالاتی جریان متمرکز تولید و بررسی می‌شود. ساخت دستگاه میکروسایالات به کمک لیتوگرافی نرم انجام شد. هنگامی که تراکم حباب‌های تولید شده به اندازه کافی بالا باشند، حباب‌ها در تماس با یکدیگر قرار می‌گیرند که به صورت کریستال فوم جریان می‌یابند. تنظیم حباب‌ها در میکرو کانال برحسب نرخ جریان و فشار گاز ورودی مطالعه شده و این وابستگی، رفتارهای دینامیکی مانند پایداری در جریان فوم را تعیین می‌کند. در دستگاه جریان متمرکز، دو نوع فوم تر و خشک تولید شده و نتایج نشان می‌دهد که فشار کاری در بازه ۶۰۰ تا ۷۰۰ میلی بار منجر به رفتار غیرخطی در فوم می‌شود که علاوه بر آشکارسازی ناپایداری به بیان چرایی این رفتار پرداخته شده است. در ادامه بررسی رفتار غیرخطی فوم در نرخ جریان‌های ۰/۱ و ۰/۲ میلی لیتر بر ساعت شکل حباب‌ها به صورت نوسانی تغییر می‌یابد و حباب‌های یک و دو ردیفه در میکرو کانال تولید می‌شوند. همچنین، افزایش نرخ جریان در فشار ثابت باعث کاهش و افزایش فشار کاری در نرخ جریان ثابت باعث افزایش سایز حباب می‌شود. از مزایای این روش می‌توان به تولید امولسیون با حجم متناسب با کاربرد در ازدیاد برداشت نفت نام برد.

۱-مقدمه

با توجه به کاربرد وسیع فوم، درک و کنترل جریان آن، موضوع بسیاری از مطالعات در زمینه ازدیاد برداشت نفت بوده است [۴-۶]. تحلیل حرکت لاملای^۳ فوم در محیط متخلخل از موضوعات بسیار مبهم در جریان‌های چند فازی است، زیرا پایداری لاملا در تماس با سورفکتانت و عدم ترکیدن آن، تعریف می‌شود [۷]. از آنجایی که فوم دارای ویسکوزیته موثرتری نسبت به گاز است، تزریق آن باعث بهبود در روبیدن نفت می‌شود [۸-۱۱]. تزریق فوم در محیط متخلخل می‌تواند ناپایداری‌هایی از جمله پدیده انگشتی لزج را به دلیل ویسکوزیته و چگالی کم گاز کاهش دهد. علاوه بر این، از آنجایی که در محیط متخلخل ناهمگن (دارای نواحی با نفوذپذیری زیاد و کم)، سیال به لایه‌هایی با نفوذپذیری زیاد جریان می‌یابد، فوم ترجیحاً در این ناحیه قرار گرفته و به‌طور قابل توجهی مقاومت محلی جریان را

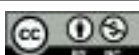
امروزه با پیشرفت علوم در مقیاس میکرو و نانو، میکرو جریان‌های دوفازی به مهم‌ترین بخش در حوزه میکرو/نانوسایالات تبدیل شده‌اند [۱]. حباب‌ها و قطره‌ها، امولسیون‌های پیچیده‌ای با طیف وسیعی از کاربرد در زمینه‌های دارورسانی، مهندسی بافت و ازدیاد برداشت نفت هستند. میکروفوم، به صورت توزیع حباب گازی در فاز پیوسته‌ای از مایع در میکروکانال، تعریف می‌شود [۲]. این کانال‌ها با عرض چند ده میکرونی، به راحتی توسط لیتوگرافی نرم^۱ بر روی یک سیلیکون شفاف و ماده پلیمری قابل انعطاف مانند پلی‌دی‌متیل‌سیل‌اکساین قالب‌گیری و ساخته می‌شود [۳].

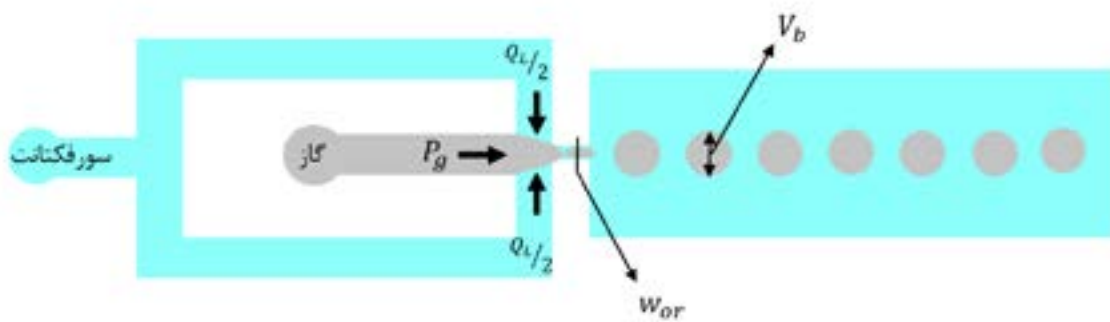
- 1 Soft Lithography
- 2 Polydimethylsiloxane

3 Lamellae

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mnazari@shahroodut.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.





شکل ۱: شماتیک دوبعدی از دستگاه جریان متمرکز

Fig. 1: 2D-schematic of the flow focusing device

گسسته حباب تولید کرد. در سال ۲۰۱۰ هاشیموتو^۴ و همکاران [۲۱] با ترکیب یک گلویی به اوریفیس در سیستم میکروسیالاتی موفق به تولید حباب‌هایی با توزیع دوگانه متصل به هم در دو سایز مختلف شدند.

در دستگاه جریان متمرکز، با جدا شدن جت گاز از جریان پیوسته مایع که به انقطاع باریکه دوره‌ای^۵ معروف است، حباب تشکیل می‌شود [۲۲]. انقطاع باریکه در ناحیه‌ای به نام اوریفیس رخ می‌دهد. جریان‌ها در مقیاس طولی میکروسیالاتی نسبت به مقیاس ماکروسکوپی قابلیت تولید متناوب را دارند، زیرا نیروهای لزج بر نیروهای اینرسی (به طور مثال مقدار رینولدز جریان کوچک است) غالب هستند چراکه جریان روان و مانع از به وجود آمدن ناپایداری می‌شود. بنابراین فرآیند انقطاع باریکه مترونومیک^۶ است و حباب با اندازه‌های دقیق را تولید می‌کند که انحراف استاندارد در اندازه‌گیری سایز حباب ۰/۱ درصد است [۲۳]. باین‌حال، باید توجه کرد که افزایش نرخ جریان فاز پیوسته (مایع) منجر به ازدیاد نیروهای اینرسی و تولید بی‌نظمی در رفتار حباب‌ها می‌شود [۲۴].

متناسب با شماتیک دوبعدی در شکل ۱، حجم حباب V_b تولیدی توسط جریان مایع و فشار گاز تنظیم می‌شود. به این ترتیب فرکانس انقطاع باریکه f با شار مایع متناسب است. نتیجه اثرگذاری آن در حجم حباب با مقیاسی مانند رابطه (۱) که نرخ جریان گاز Q_g و عرض اوریفیس است، ظاهر می‌شود [۲۵].

$$V_b = \frac{Q_g}{f} \sim w_{or}^3 \cdot \frac{Q_g}{Q_l} \quad (1)$$

افزایش می‌دهد. بنابراین سیال تزریق شده به ناحیه با نفوذپذیری کم منحرف شده و باعث بهبود در کارایی این فرآیند می‌شود [۱۲]. بنابراین تزریق فوم می‌تواند برای سنگ‌های شکافدار نیز مفید باشد. حباب در ابعاد سانتی‌متری با روشی ساده (حباب‌ساز) به صورت تزریق هوا در استخر سیال تولید می‌شود. ولی تولید حباب‌هایی در سایز میکرون نیاز به یک استراتژی متفاوت دارد. در فرآیند حباب‌سازی سانتی‌متری، نیروی شناوری باعث جدایش حباب‌ها از دهانه شلنگ می‌شود (غلبه نیروی شناوری بر نیروی مویینگی). باین‌حال، در مقیاس‌های کوچک‌تر (میکرون) نیروهای شناوری (نیروهای حجمی) در مقایسه با نیروی مویینگی (متناسب با محیط) ناکارآمد هست. پس یک روش فعال برای تولید حباب در مقیاس میکرون/نانو مورد نیاز است.

در میان روش‌هایی به منظور تولید امولسیون، دو نوع ساختار جهت تولید حباب‌ها و قطره‌ها بسیار مفید هستند. اول: اتصال T که اولین بار توسط تورسن^۱ و همکاران برای تولید قطره انجام شد. در این هندسه فاز پیوسته از کانال اصلی و فاز گسسته از طریق کانال عمودی وارد می‌شود. [۱۳-۱۵]. دوم: جریان متمرکز که روشی است که جریان مایع، جت گاز را از طریق یک اریفیس کوچک قطع می‌کند به طوری که از کانال وسط سیال در فاز گسسته و از کانال کناری سیال در فاز پیوسته تزریق می‌شود [۱۶]. این روش اولین بار توسط آلفونسو گانان کالوو^۲ مورد استفاده قرار گرفت. وی با تعبیه لوله‌های مویینه محوری در یک سیستم میکروسیالاتی موفق به تولید قطره شد [۱۷-۱۹]. گارستسکی^۳ [۲۰] نیز با تغییر در فازهای پیوسته و

4 M.Hashimoto
5 Periodic Pinch-off
6 Metronomic

1 T.Thorsen
2 A.Ganan Calvo
3 P.Garstecki



شکل ۲: الف: طرحواره دستگاه میکروسیالاتی جریان متمرکز ب: قالب فتورزیست که با تابیدن نور فرابنفش بر روی طرح قرار داده شده بر روی فیلم فتورزیست ظاهر می‌شود. ج: میکروسیال قالب‌گیری شده با پلی‌دی‌متیل‌سیل‌اکساین از روی قالب فتورزیست

Fig. 2: (a) photo mask of the FF-device (b) the SU-8 mold (c) the PDMS microfluidic device

۲- مواد و روش‌ها

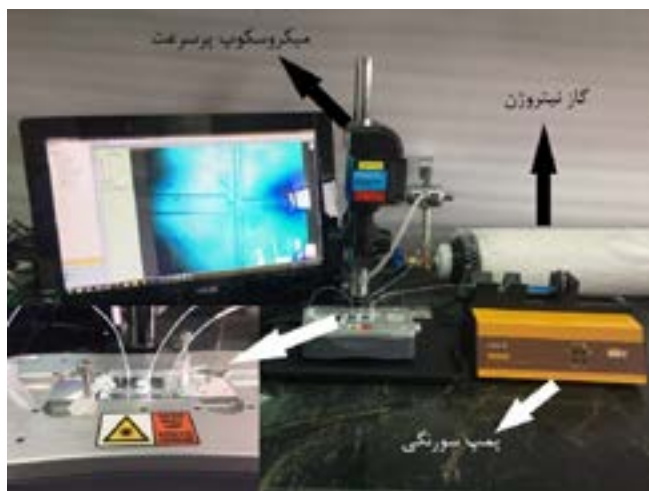
۲-۱- طراحی و ساخت میکرومدل

الگوی میکرومدل، در شکل ۲ (الف) پس از طراحی با نرم‌افزار کرل درا و با استفاده از روش سنتی فتولیتوگرافی بر روی ماسک چاپ شده است. برای آماده‌سازی زیر لایه سیلیکونی ۴ اینچی، ابتدا این زیر لایه با آب مقطر شست و شو و گاز نیتروژن بر روی آن دمیده می‌شود، سپس بر روی هات‌پلیت به مدت ۱۰ دقیقه در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده تا کاملاً خشک شود. این نکته لازم به ذکر است که هرگونه ذره و یا آب بر روی ویفر سیلیکونی^۱ چسبندگی فتورزیست منفی به آن را تحت تأثیر قرار می‌دهد. مرحله بعد جهت پوشش‌دهی فیلم فتورزیست منفی این ماده را به مقدار ۴ میلی‌لیتر بر روی ویفر ریخته (۱ میلی‌لیتر به ازای هر اینچ) و سپس بر روی دستگاه پوشش‌دهنده چرخشی^۲ به‌منظور ایجاد لایه نازکی از فتورزیست قرار داده می‌شود. بر اساس داده‌های اطلاعاتی در صورت استفاده از فتورزیست منفی ۲۰۵۰ و برای ایجاد ضخامت در حدود ۴۰ میکرون سرعت چرخش ۵۰۰ دور بر دقیقه به مدت زمان ۵ تا ۱۰ ثانیه با شتاب ۱۰۰ دور بر ثانیه و پس از آن چرخش را در ۲۰۰۰ دور بر دقیقه به مدت ۳۰ ثانیه با شتاب ۳۰۰ دور بر ثانیه تنظیم می‌شود. حال پس از این مرحله، با قرار دادن ویفر بر روی هات‌پلیت به مدت یک دقیقه در دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد و سپس به مدت سه دقیقه در دمای ۹۵ درجه سانتی‌گراد گرما داده می‌شود

لازم به ذکر است که نرخ جریان گاز Q_g ثابت نبوده و وابسته به فشار گاز P_g است. هنگامی که کانال خروجی متراکم از حباب شود، هر حباب جدید باعث متراکم‌تر شدن حباب‌ها و خروج آن می‌شود. خواهیم دید که نرخ جریان گاز Q_g به نیروی پسای ناشی از ساختار فوم مربوط می‌شود. همان‌طور که گفته شد میکروحباب‌ها از طریق مکانیزهای مختلفی تولید می‌شود ولی در این بین سیستم جریان متمرکز از انعطاف بهتری در کنترل حجم حباب و ساختار امولسیون برخوردار است.

در این مقاله، دستگاه میکروسیال جریان متمرکز با روش لیتوگرافی نرم ساخته شده است. فاز گسسته (گاز نیتروژن) و فاز پیوسته (محلول سورفاکتانت) در کانال‌های این دستگاه وارد و پس از قطع شدن فاز گسسته توسط فاز پیوسته در اوریفیس، حباب‌های یکنواخت ایجاد شده، پس در کانال خروجی جریان فوم را می‌توان مشاهده کرد. هدف اصلی در استفاده از این روش تولید فوم در حجم یکسان است. در فرآیند تولید فوم، اثر تغییرات نرخ جریان و فشار بر حجم حباب مورد بررسی قرار گرفته است به طوری که می‌توان حباب‌ها را بر اساس کاربرد به دو نوع تر و خشک طبقه‌بندی کرد. در طول آزمایش‌ها به‌منظور بررسی حجم حباب‌ها، متناسب با نرخ جریان‌ها (یا فشار متناظر با آن)، رفتار غیرخطی فوم بر اساس سایز حباب گزارش و آشکارسازی دقیق شده است که می‌توان از این رفتار به‌عنوان ناپایداری در تولید میکرو فوم نام برد. نتایج به‌دست‌آمده در علوم پزشکی و فرآیند ازدیاد برداشت نفت به‌ویژه تزریق فوم در میکرو مدل متخلخل قابل استفاده است.

1 Silicon Wafer
2 Spin Coater



شکل ۳: نمای کلی از آزمایش

Fig. 3: Experimental set-up

می‌شود که با قراردادن ظرف در دستگاه خلأ، این حباب‌ها از بین می‌روند. سپس پلی‌دی‌متیل‌سیل‌اکساین را بر روی ویفر سیلیکونی که در مرحله قبل طرح بر روی آن ایجاد شده ریخته می‌شود و به مدت ۱ ساعت در دمای ۸۰ درجه بر روی هات‌پلیت قرار می‌گیرد تا پلیمر خشک شود. در این مرحله پلیمر خشک را از قالب سیلیکونی جدا کرده و محل ورود و خروج میکرو کانال پانچ می‌شود. در مرحله بعد قالب آماده شده را همراه با لام آزمایشگاهی در دستگاه پاک‌سازی پلاسما قرار داده می‌شود تا سطح پلیمر آبدوست و به شیشه بچسبد. سپس میکرومدل آماده شده را به مدت ۲۰ دقیقه در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد در آون قرار داده تا گرما ببیند. در شکل ۲ (ج) دستگاه میکروسیالاتی جریان متمرکز مشاهده می‌شود که دارای دو کانال ورودی و یک کانال خروجی می‌باشد.

۲-۲-۲- فرآیندهای تجربی

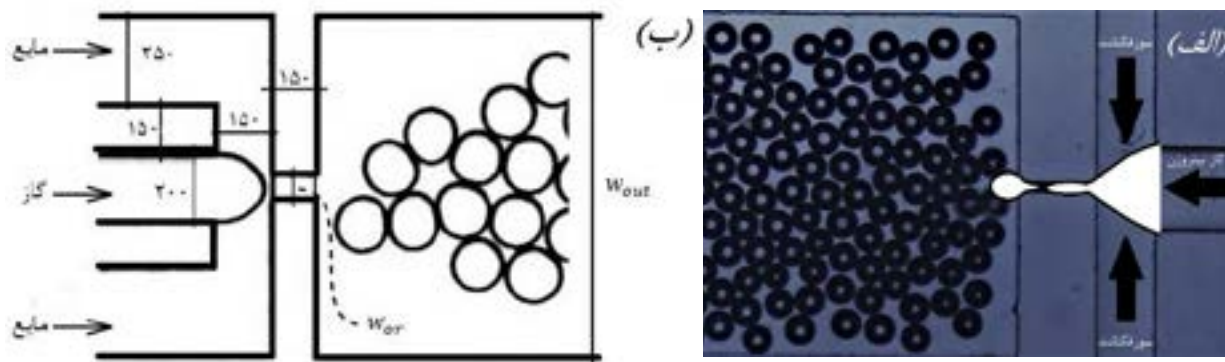
فوم با استفاده از دستگاه میکروسیالاتی جریان متمرکز تولید می‌شود به طوری که فاز گسسته از طریق کانال میانی و فاز پیوسته نیز از طریق دو کانال کناری تغذیه می‌شوند و هر دو فاز مجبور هستند از یک اریفیس کوچک که در پایین دست این سه کانال واقع شده است، عبور کنند. همان‌طور که در شکل ۳ نمای کلی از آزمایش به نمایش درآمده، در شکل ۴ (الف)، از طرف فاز پیوسته به فاز گسسته که در ناحیه اوریفیس به صورت یک‌رشته باریک تغییر شکل یافته است فشار وارد می‌شود که در نهایت منجر به شکسته شدن فاز گسسته و

(دما باید به تدریج افزایش یابد). دلیل گرم کردن ویفر در این مرحله، تبخیر حلال ریخته‌گری^۱ که بخشی از اجزای تشکیل‌دهنده محلول فتورزیست است، می‌باشد. برای نوردهی ابتدا ویفر را زیر دستگاه تابش فرابنفش و سپس طرح بر روی آن قرار داده می‌شود به طوری که در این روش ماسک با فشاری در حدود ۰/۰۵ تا ۰/۳ اتمسفر روی یک ویفر که با فتورزیست پوشانده شده است، فشرده می‌شود. این نوع لیتوگرافی را چاپ تماسی با فشار مستقیم می‌نامند که با دقت در تماس طرح با فتورزیست خطا به حدود کمتر از ۱۰ میکرون می‌رسد. همان‌طور که در شکل ۲ (الف) قابل مشاهده است، نور فرابنفش از قسمت روشن طرح عبور کرده (کانال) و از قسمت تاریک طرح نمی‌تواند عبور کند (دیواره). از مهم‌ترین موارد در این بخش ارتفاع کاری مدنظر در میکروکانال نهایی است. طبق داده‌های اطلاعاتی برای ارتفاع حدود ۴۰ میکرون باید مقدار $(\frac{mj}{cm^2})$ ۱۵۰ نور فرابنفش به طرح قرار گرفته بر روی فتورزیست تابیده شود. بعد از نوردهی ویفر دو بار بر روی هات‌پلیت قرار داده می‌شود تا موجب اتصال زنجیره‌های پلیمری فعال به هم شوند. ابتدا یک دقیقه در دمای ۶۵ درجه و سپس ۶ دقیقه در دمای ۹۵ درجه گذاشته می‌شود. با این کار تا حدودی طرح دستگاه جریان متمرکز که حاوی زنجیره‌های متصل پلیمری هستند بر روی فتورزیست قابل مشاهده است. به منظور ایجاد قالب فتورزیست، ویفر را در سیال توسعه‌دهنده فتورزیست به مدت ۳ دقیقه قرار داده تا زنجیره‌های اتصال نیافته پلیمری پس از شست‌وشو با ایزوپروپیل الکل (مرک آلمان) و آب مقطر پاک شود تا فتورزیست مورد تابش قرار گرفته ثابت بماند و در پایان ویفر با گاز نیتروژن خشک می‌شود. به منظور تیز شدن گوشه‌های قالب کانال و از بین رفتن شکاف‌های ریز می‌توان ویفر را دوباره بر روی هات‌پلیت در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۰ دقیقه قرارداد تا طرح کاملاً خشک شود. لازم به ذکر است که مرحله آخر اختیاری است. بر اساس شکل ۲ (ب) قالب فتورزیست آماده قالب‌گیری با پلی‌دی‌متیل‌سیل‌اکساین^۲ می‌باشد.

۲-۱-۱- قالب‌گیری با پلی‌دی‌متیل‌سیل‌اکساین

جهت آماده‌سازی الاستومر پلیمری باید به نسبت ۱:۱۰ با عامل پخت حل شود. پس از مخلوط شدن این دو ترکیب حباب‌هایی ایجاد

- 1 Casting Solvent
- 2 Polydimethylsiloxane (PDMS)



شکل ۴: الف: مایع از دو کانال بالا و پایین وارد و فاز گاز از طریق کانال وسط وارد ناحیه اوریفیس می‌شود. جریان گاز توسط جریان مایع به داخل اوریفیس هدایت شده که باعث می‌شود جت گاز توسط جریان سیال جدا شده تا حباب تشکیل شود. ب: میکروگرافی از دستگاه جریان متمرکز نشان داده شده است. ارتفاع کانال‌ها یکسان و برابر ۴۰ میکرون هست. ابعاد نشان داده شده بر حسب میکرون است. در این دستگاه، عرض اوریفیس ۳۰ میکرون و عرض کانال خروجی ۷۵۰ میکرون است.

Fig. 4: (a) Break-up bubble in orifice (b) Micrography of flow focusing device

جدول ۱ خواص سورفکتانت

Table 1: Properties of the surfactant

سورفاکتانت	نوع	غلظت وزنی	ویسکوزیته (mPa. s)	کشش سطحی (mN. m ⁻¹)
تترادسیل تری متیل آمونیوم بروماید	کاتیونی	1 درصد	1/002	37

کمتر از ۲/۵ بار تقلیل می‌دهد. برای تصویربرداری از حباب‌های تشکیل شده از میکروسکوپ با دوربین پرسرعت شرکت دلمیت استفاده شده است. طبق شکل ۴ (الف) سورفکتانت از کانال‌های بالا و پایین و گاز نیتروژن نیز از کانال وسط وارد محل تقاطع که اوریفیس نام دارد، می‌شود. سورفکتانت به عنوان فاز پیوسته گاز نیتروژن به عنوان فاز گسسته را در اوریفیس قطع می‌کند و باعث تشکیل حباب می‌شود. در شکل ۴ (ب) ابعاد کانال‌ها نشان داده شده است که عرض اوریفیس ۳۰ میکرون و عرض کانال خروجی ۷۵۰ میکرون است. ارتفاع کانال‌ها یکسان و حدود ۴۰ میکرون است.

۳- نتایج و بحث

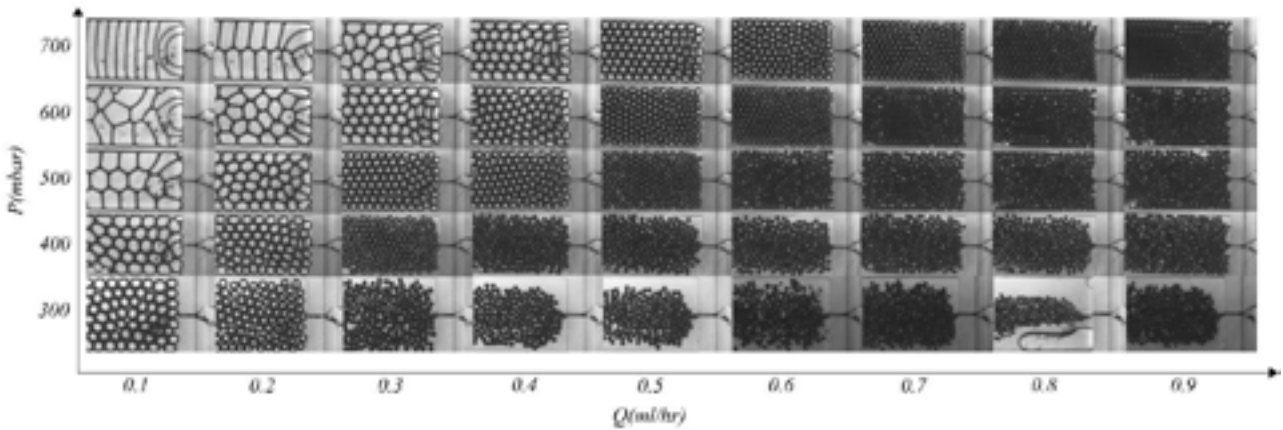
۳-۱- بازسازی متناوب فوم در میکروکانال

هنگامی که تراکم حباب‌ها در کانال خروجی به اندازه کافی بالا باشد، فوم شکل می‌گیرد (شکل ۵). حباب‌ها در اندازه‌های یکنواخت و به صورت خودکار در الگوهایی مرتب در کانال خروجی شکل می‌گیرند که به عنوان کریستال‌های جریان^۵ [۲۶] یا کریستال‌های

جدایش حباب در پایین دست اوریفیس می‌شود. در این آزمایش از محلول سورفکتانت تترادسیل تری متیل آمونیوم بروماید^۱ (مرک آلمان) با غلظت وزنی ۱ درصد در آب مقطر استفاده شده است. با اضافه کردن این پودر به آب مقطر و قرار دادن آن بر روی همزن مغناطیسی، این محلول به مدت ۱۵ دقیقه هم زده می‌شود تا به طور کامل در آب حل شود. مشخصات کلی سیال در جدول ۱ بیان شده است. تست کشش سطحی با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری کشش سطحی و زاویه تماس شرکت داتیس انرژي و تست ویسکوزیته با استفاده از دستگاه رئومتر آنتون پار^۲ (مدل MCr۳۰۲) گرفته شده است.

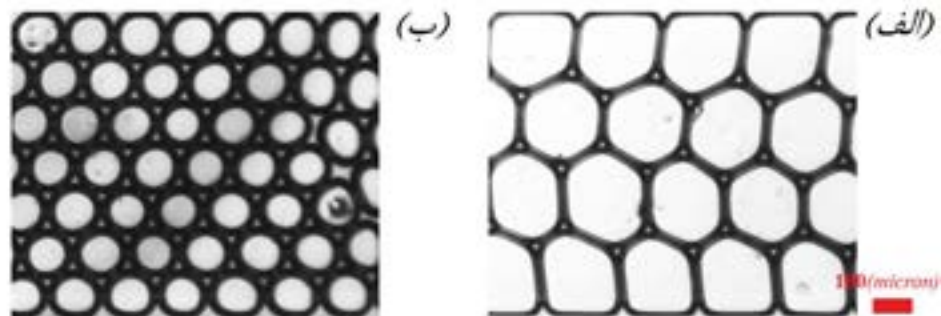
با توجه به شکل ۳ مایع سورفکتانت با استفاده از پمپ سرنگی، و گاز نیتروژن با تنظیم رگلاتور به میکروکانال تزریق می‌شود. پمپ مورد استفاده در این کار از نوع سرنگی لاند^۳ مدل ویت-فیت^۴ که محدوده دبی آن از ۱/۰ تا ۹/۰ میلی‌لیتر بر ساعت هست. لازم به یادآوری است که برای کنترل فشار بالای مخزن گاز نیتروژن از رگلاتور دومرحله‌ای استفاده می‌شود که فشار گاز را از ۳۰۰ بار به

- 1 TetradecylTrimethylAmmonium Bromide
- 2 Anton Paar
- 3 Lambda
- 4 VIT-FIT



شکل ۵: نتایج تجربی تشکیل فوم بر اساس شرایط تزریق در میکروچیپ (نرخ جریان مایع و فشار گاز)

Fig. 5: Experimental results of foam generation based on injection conditions.

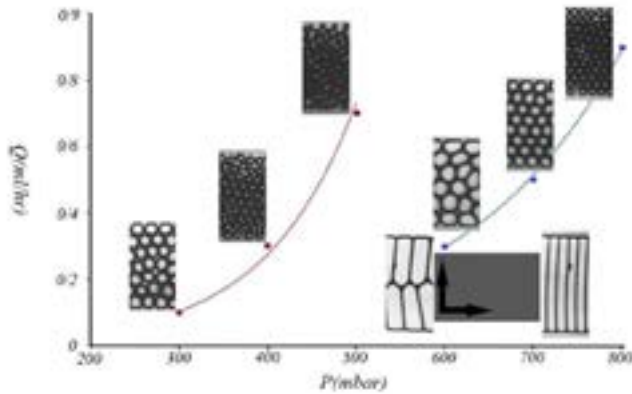


شکل ۶: الف: فوم خشک ، ب: فوم تر. ضخامت مرز هردو فوم در حدود ۱۰ میکرون بوده است. فوم در کانال به عرض ۷۵۰ میکرون جریان یافته‌اند.

Fig. 6: (a) Dry foam (b) Wet foam

دقت در شکل ۵ این نتیجه حاصل می‌شود که اگر در کانال خروجی همراه فوم، فاز پیوسته نیز مشاهده شود، فوم تر می‌باشد در حالی که در کانال خروجی برای فوم خشک فقط حباب مشاهده می‌شود. در فوم تر کاهش حداکثری حضور فاز پیوسته در کانال خروجی مشاهده می‌شود زیرا با توجه به ثابت بودن نرخ جریان مایع و با افزایش فشار گاز، فاز گازی بیشتری درون حباب قرار گرفته که منجر به افزایش سایز حباب می‌شود به طوری که در خروجی شاهد جریان خالص حباب می‌باشیم. در نرخ جریان ۹/۰ میلی‌لیتر بر ساعت با افزایش فشار رشد کمی در حجم حباب مشاهده می‌شود ولی فوم از ناحیه تر به سمت خشک می‌رود زیرا میزان تولید حباب در واحد زمان افزایش می‌یابد. در بخش بعدی، درک فیزیکی از تأثیر کسر مایع بر نحوه تشکیل فوم تر و خشک حاصل می‌شود.

میکروسایالاتی^۱ [۲۷ و ۲۸] شناخته می‌شوند. هر حباب پس از خارج شدن از اوریفیس به صورت متناوب و پیوسته به فوم اضافه می‌شود که به عنوان یک الگو در کانال خروجی به صورت توزیع دوره‌ای از حباب‌ها ظاهر می‌شود. یکی از الگوها، الگوهای شش‌وجهی است که توسط تعداد ردیف حباب‌ها نسبت به عرض کانال به صورت هگزی یک ، هگزی دو و غیره نام‌گذاری می‌شود (شکل ۵ در فشار ۷۰۰ میلی‌بار و نرخ جریان‌های ۱/۰ و ۲/۰ میلی‌لیتر بر ساعت). حجم حباب‌ها متناسب با نرخ جریان و فشار گاز تغییر می‌کند، به طوری که با فشار گاز رابطه مستقیم و با نرخ جریان رابطه عکس دارد. در شکل ۵ به خوبی قابل مشاهده است که در یک فشار ثابت با افزایش نرخ جریان حجم حباب کاهش می‌یابد و جریان فوم به سمت فوم تر پیش می‌رود ولی در یک نرخ جریان ثابت با افزایش فشار، حجم حباب‌ها افزایش و فوم خشک تشکیل می‌شود. حال منظور از فوم تر و خشک چیست؟ با



شکل ۷: نمودار رفتار غیرخطی از جریان فوم در کانال خروجی. ناحیه خاکستری، ناحیه گذرا هست.

Fig. 7: Non-linear behavior of the foam flow in the exit channel

درآمده است.

از ویژگی‌های برجسته رفتار جریان در تولید فوم عبارتند از: اول، طبق معادله یانگ-لاپلاس $P_{cap} = \sigma \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)$ که کشش سطحی مایع و $r_1 = \frac{h}{\varphi}$ ، ارتفاع کانال و $r_2 = \frac{w_0}{\varphi}$ ، فشار گاز در بالادست دستگاه جریان متمرکز بیشتر از فشار آستانه P_{cap} که باعث نفوذ رگه گاز به داخل اوریفیس شده تا به طبع آن حباب تولید شود. این فشار به‌عنوان فشار لازم برای غلبه بر موینگی در اوریفیس تفسیر می‌شود [۲۵]. دوم، در سال ۱۹۶۱ بریترتون^۲ موفق شده که رابطه‌ای بین نرخ جریان گاز و افت فشار برای جریان یک حباب در لوله موینه را به دست آورد، که در این رابطه نرخ جریان گاز به‌عنوان قانونی در فشار اعمالی با رابطه $Q_g \propto \Delta P_{channel}^{\frac{1}{\alpha}}$ به نمایش درمی‌آید. $\Delta P_{channel} = P_g - P_{cap}$ اختلاف فشار بیش از حد آستانه و $\alpha \cong \frac{2}{3}$ بنا بر حل تحلیلی در نظر گرفته می‌شود [۲۹].

قطعاً فوم به‌عنوان سیال نیوتونی جریان نمی‌یابد چرا که این جریان متناسب با فشار است. پس در نهایت، به دلیل ایجاد ناپیوستگی، ماهیت رفتاری فوم از یکپارچگی خارج و گسسته می‌شود. این ناپیوستگی را می‌توان در ناحیه خاکستری نمودار ۷ از تغییر ساختار حباب هگز-دو به هگز یک مشاهده کرد. پس با تغییر ساختار فوم، جریان از یک ناحیه گذرا به ناحیه پایدار در تولید فوم جهش می‌یابد.

رفتار قانون توانی که توسط ایزابل کانتت [۳۰] به دست آمد را می‌توان بسط قانون بریترتون [۲۹] برای تک حباب‌ها در لوله موینه استوانه‌ای دانست. رابطه به‌دست‌آمده توسط کانتت خود را به‌صورت

۳-۲- کسر مایع در فوم

کسر مایع $\phi_l = \frac{V_l}{V_l + V_g}$ ، به‌صورت نسبتی از حجم واقعی مایع V_l و گاز موجود در کانال V_g تعریف می‌شود. در نگاه اول، این برداشت حاصل می‌شود که کسر مایع، کسری از مایع تزریق شده $\alpha_l = \frac{Q_l}{Q_l + Q_g}$ است، درحالی‌که می‌تواند بخشی از کسر مایع تزریق شده به حساب آید. در کانال خروجی مایع با سرعت متوسط $\langle u_l \rangle$ با عبور از بین حباب‌ها می‌تواند سریع‌تر از سرعت متوسط حباب‌ها $\langle u_g \rangle$ جریان یابد. زیرا نیروی پسای اعمال شده از طرف دیواره‌ها به حباب‌ها باعث کاهش سرعت آن‌ها می‌شود. کل این پدیده به‌عنوان تخلیه نسبی مایع در فوم^۱ شناخته می‌شود، به‌طوری‌که می‌تواند بیان کند چرا کسر مایع ϕ_l از α_l کوچک‌تر است. در مقدار بیشتری از کسر مایع، تقریباً اطراف فوم با حباب‌هایش تر هست که فوم شباهت خوبی با مواد بلوری دارند (شکل ۶ ب). پس با توجه به شکل ۵ در بازه فشاری ۳۰۰ تا ۵۰۰ میلی‌بار از نرخ جریان ۰/۶ تا ۰/۹ میلی‌لیتر بر ساعت می‌توان فوم تر را مشاهده کرد. اما هنگامی که کسر مایع کوچک باشد، فوم خشک و حباب‌هایش اشکال چندوجهی به خود می‌گیرند (شکل ۶ الف). به‌عنوان مثال این نوع از فوم را می‌توان در شکل ۵ در فشار ۷۰۰ میلی‌بار در نرخ جریان‌های ۰/۱ تا ۰/۹ میلی‌لیتر بر ساعت مشاهده کرد. فوم خشک به‌جز در دستگاه‌های میکروسیالاتی، عموماً غیرآلی (نامنظم) هستند، زیرا در سیستم میکروسیالاتی فوم از کنار هم قرار گرفتن حباب‌های جدید که به‌طور منظم بازتولید شده‌اند، تشکیل می‌شود.

۳-۳- جریان و اثرات گسسته آن

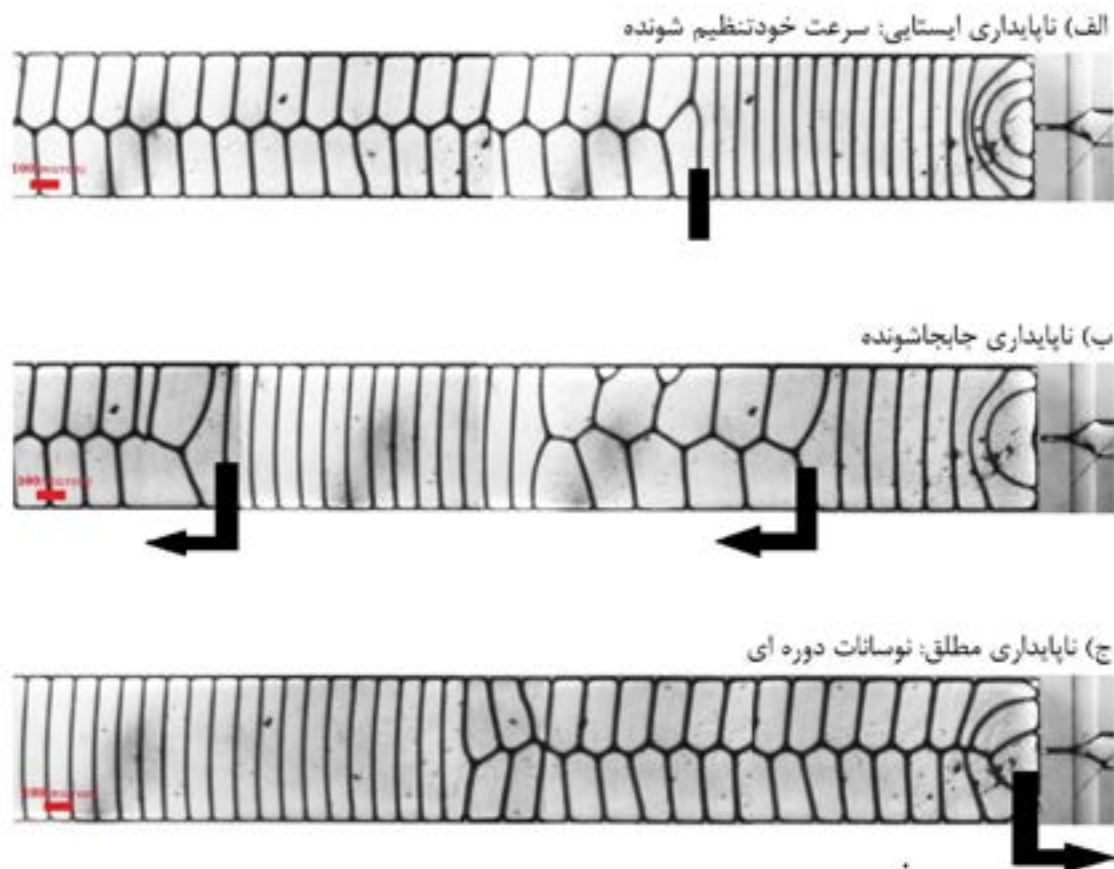
نرخ جریان فوم یک تابع غیرخطی از فشار اعمالی است [۲۵]. بر این اساس فوم به‌عنوان یک سیال غیرنیوتونی به شمار می‌آید، درحالی‌که مایع و گاز تشکیل‌دهنده آن نیوتونی هستند. نرخ جریان فوم با استفاده از نرخ جریان گاز Q_g تقریب زده می‌شود که این تقریب باعث ایجاد خطای کمی، در کسر مایع می‌شود. سرعت جریان گاز به‌راحتی از سنجش سرعت حباب‌ها استخراج می‌شود درحالی‌که ثبت سرعت مایع، به دلیل تخلیه نسبی آن، کار بسیار مشکلی است. بنابراین انتظار می‌رود که دامنه نوسان در فوم‌های تر کمتر باشد. در شکل ۷، نرخ بعضی از جریان‌ها نسبت به فشار اعمالی به نمایش

افت فشار در کانال نشان می‌دهد:

$$\Delta P_{channel} = n\lambda \frac{L_{proj}}{S} \sigma Ca^\alpha \quad (2)$$

n تعداد حباب‌ها، λ ثابت وابسته به کسر مایع، σ کشش سطحی، S سطح مقطع کانال، L_{proj} طول فیلمی از مایع که در تماس با دیواره است (اندازه عرضی در مسیر جریان)، عدد موینگی $Ca = \frac{\mu \langle v_{foam} \rangle}{\sigma}$ متشکل از ویسکوزیته مایع μ و سرعت فوم $\langle u_g \rangle = v_{foam}$ می‌باشد. ناپیوستگی بر اساس رابطه (۲) شرح داده می‌شود پس تأثیر جهت‌گیری فیلم نسبت به حرکت فوم در متغیر L_{proj} ظاهر می‌شود. $L_{proj} = L \cos \alpha$ که α به صورت زاویه بین بردار نرمال فیلم سیال نسبت به جهت جریان تعریف می‌شود. توان $\alpha = \frac{2}{3}$ به صورت تحلیلی برای تک حباب به دست آمده که بیان‌گر حرکت مماسی لایه سورفکتانت در سطح حباب است. همان‌طور که گفته شد L_{proj} نقش مهمی را در رابطه (۲) ایفا می‌کند. با توجه به شکل ۵ هنگامی که

حباب‌های یکپارچه، الگوهای هگز-یک و هگز-دو را می‌سازند، طول اصطکاک L_{proj} به‌طور ناگهانی تغییر می‌کند که بر روی تغییرات فشار اثر می‌گذارد. در این شکل واضح است که حباب‌های هگز-یک کل عرض کانال خروجی w_{out} ($L_{proj} = w_{out}$) را پوشش می‌دهند در حالی که حباب‌های هگز-دو مقطع عرضی را کاهش می‌دهند ($L_{proj} < w_{out}$). با برگشت به شکل ۷، فشردگی شدید جریان زمانی که یک فوم از هگز-دو به هگز-یک تغییر شکل می‌دهد، در حجم حباب قابل مشاهده است، زیرا حباب‌های هگز-یک دارای L_{proj} بسیار بزرگ‌تری هستند، بنابراین باعث افزایش مقاومت محلی در برابر جریان می‌شود (شکل ۷). این نتیجه ناشی از اصطکاک محلی به دلیل حرکت لاملای فوم است. این ناحیه تماس اصطکاک محلی پشت و جلوی حباب‌ها به صورت سیاه‌رنگ دیده می‌شود. اثر مقاومت محلی بر تغییرات فشار گاز در سرعت فوم ظاهر شده که موجب ایجاد ناپایداری در بین ساختار هگز-یک و هگز-دو می‌شود. شرح در مورد این ناپایداری در بخش بعدی بیان شده است.



شکل ۸: ترتیب رژیم‌هایی با ساختار پیچیده. نوار عمودی بیانگر جبهه بازآرایی و فلش سرعت مطلق جبهه بازآرایی را نشان می‌دهد.

Fig. 8: Complex regime in the outlet channel

۳-۴- ناپایداری در تولید پایدار فوم

در میان رژیم‌هایی از فوم که با ساختاری پیوسته و همگن تولید می‌شوند، رژیم‌هایی هم وجود دارند که دارای رفتاری گذرا و نوسانی می‌باشند. این رفتار گذرا منجر به تشکیل فوم در الگوی نوسانی می‌شوند (شکل ۷، ناحیه خاکستری). این رژیم‌های گذرا با تغییر رفتار دینامیکی منجر به ساختارهایی متغیر با زمان یا مکان یا هر دو آن می‌شود. بر اساس شکل ۷، سرعت جریان نسبت به فشار گاز اعمال شده رسم شده است. در فشار کم (۶۰۰ میلی‌بار) از ناحیه خاکستری حباب‌ها خود را در ساختار هگزی-دو ایجاد کرده در حالی که در فشار بالاتر (۷۰۰ میلی‌بار) از این ناحیه، حباب‌ها در ساختار هگزی-یک به نمایش در می‌آیند. در میان این دو ساختار همگن، ناحیه گذرای (خاکستری) وجود دارد که مشخصه‌های اصلی ناپایداری را نشان می‌دهد. در این ناحیه سه نوع رفتار ناپایدار در تولید فوم دیده می‌شود که وابسته به نرخ جریان می‌باشند (شکل ۸). ابتدا، برای تشریح این سه نوع ناپایداری یکی از مشاهدات را که دارای نرخ جریان متوسطی نسبت به دو پدیده دیگر است، مورد بررسی قرار می‌گیرد تا بقیه حالت‌های گذرا نسبت به این حالت تحلیل شود.

در ناحیه گذرا نشان داده شده در شکل ۸ (الف)، رفتار فوم به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر طیفی از فشار محرک در نرخ جریان ثابت است. بنابراین نرخ جریان در طول زمان و در برابر تغییرات فشار ثابت است، در نتیجه باعث ایجاد جریان خودکار و مستقل (بدون تأثیرپذیری از عوامل خارجی) می‌شود. از آنجایی که حجم حباب وابسته به نرخ جریان است، به‌عنوان یک اثر جانبی همچنان ثابت باقی می‌ماند. در پی آن و در یک مکان ثابت در کانال خروجی ساختار هگزی-یک مداوماً به ساختار هگزی-دو تغییر شکل پیدا می‌کند. مکانی که تغییر رفتار فوم در آن رخ می‌دهد فقط به فشار گاز ورودی بستگی دارد، به‌طوری که در فشارهای بالاتر در مکان پایین‌دست‌تری نسبت به اوریفیس تغییر ساختار رخ می‌دهد. در این حالت نسبت حباب‌های هگزی-یک به هگزی-دو بیشتر می‌شود. عامل این تغییر در رفتار ساختاری فوم مربوط به تغییرات توپولوژیکی هست که با T_i نمایش داده می‌شود. این تغییر ساختار در مکان ثابت بین مرز دو ساختار اتفاق می‌افتد به‌طوری که انرژی در سطح مشترک مایع-گاز کاهش می‌یابد. در شاخص تعیین شده در شکل ۸ (الف)، فوم هگزی-یک از بالا یا پایین در

کسری از زمان تغییر حجم می‌یابد و فوم هگزی-دو را تولید می‌کند. در واقع این رویداد توپولوژیکی در سطح مشترک بین دو ساختار را موج T_i می‌نامند. در این ساختار سرعت فوم و سرعت موج برابر ولی در جهت عکس هست ($v_{foam} = -v_{T_i}$) این تعادل باعث تعیین موقعیت جبهه بین دو ساختار در کانال می‌شود. دو رژیم ناپایدار دیگر وقتی بین دو ساختار هگزی-یک و هگزی-دو ظاهر می‌شود که دومین پارامتر کنترل، نرخ جریان سیال، تغییر کند.

با توجه به شکل ۸ (ب) و با افزایش نرخ جریان رژیم ناپایدار با ساختار هگزی-دو گذرا شده و به سمت کانال خروجی پیش می‌رود، اما با کاهش نرخ جریان (شکل ۸ (ج))، جریان با حرکتی نوسانی به سمت کانال خروجی پیش می‌رود، به‌گونه‌ای که این رژیم به‌صورت متناوب هر کدام از ساختارها را بازتولید می‌کند.

در این سه نوع رژیم، حجم یکسانی از حباب‌ها تولید، که با سرعت فوم متناسب می‌شود. در واقع به‌منظور ثابت ماندن حجم حباب، هنگامی که نرخ جریان سیال تغییر می‌کند فشار گاز نیز باید متناسب با آن تنظیم شود، پس در نهایت منجر به تغییر در جریان گاز و سرعت فوم می‌شود. با مقایسه سرعت فوم و سرعت موج یک طبقه‌بندی کلی از رژیم‌های ناپایدار صورت می‌گیرد:

(الف) در سرعت متوسطی از فوم، در یک نقطه ثابت از کانال، فوم مداوم از ساختار هگزی-یک به هگزی-دو تغییر شکل پیدا می‌کند. نقطه ثابت وجود یک موج منطبق را نشان می‌دهد که نسبت به سرعت فوم ثابت است. سرعت فوم دقیقاً برابر $v_{foam} = -v_{T_i}$ است که باعث می‌شود در یک نقطه ثابت، تغییر ساختار ایجاد شود. در این رژیم، سرعت فوم و حجم حباب بسیار پایدار هستند، زیرا عامل محرک، ثابت نگه‌داشته می‌شود.

(ب) در فوم با سرعت بالاتر $v_{foam} > -v_{T_i}$ رژیم گذرا تغییرات غیرثابتی را در موج ایجاد می‌کند، اما می‌توانند از کانال خارج شوند.

(ج) فوم با سرعت پایین $v_{foam} < -v_{T_i}$ ، منجر به نوسان خودکار بین دو ساختار می‌شود. در واقع این اغتشاشات می‌تواند باعث شود که حباب‌ها به سمت اوریفیس نیز حرکت کنند. به این ترتیب، این اتفاق منجر به تشکیل هگزی-دو در اوریفیس می‌شود.

این نوع رژیم‌های ناپایدار را می‌توان با استفاده از مفهوم ناپایداری‌ها غیرخطی بیان کرد. در واقع هر ساختار فوم (هگزی-یک و هگزی-دو) به‌طور خطی پایدار است اما زمانی که یک دامنه بزرگی از اغتشاشات

کشش سطحی (mN.m^{-1})،	σ
ویسکوزیته (mPa.s)،	μ
کسر مایع	ϕ
کسر مایع تزریق شده	α
زیرنویس	
گاز	g
مایع	l
حباب	b
اوریفیس	or
خروجی	out
مشخصه	$proj$
فوم	$foam$
بازآرایی در فوم	T_1

مراجع

- [1] G.F. Christopher, S.L. Anna, Microfluidic methods for generating continuous droplet streams, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 40(19) (2007) R319.
- [2] W. Drenckhan, S. Cox, G. Delaney, H. Holste, D. Weaire, N. Kern, Rheology of ordered foams—on the way to discrete microfluidics, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 263(1-3) (2005) 52-64.
- [3] D.C. Duffy, J.C. McDonald, O.J. Schueller, G.M. Whitesides, Rapid prototyping of microfluidic systems in poly (dimethylsiloxane), *Analytical chemistry*, 70(23) (1998) 4974-4984.
- [4] G.G. Bernard, L. Holm, Effect of foam on permeability of porous media to gas, *Society of Petroleum Engineers Journal*, 4(03) (1964) 267-274.
- [5] L. Holm, The mechanism of gas and liquid flow through porous media in the presence of foam, *Society of Petroleum Engineers Journal*, 8(04) (1968) 359-369.
- [6] J. Hanssen, T. Holt, L. Surguchev, Foam processes: An assessment of their potential in North Sea reservoirs based on a critical evaluation of current field

به آن اعمال می‌شود، از حالت خطی پایدار به غیرخطی ناپایدار تبدیل می‌شود. در اینجا هگزی یک دارای سطح انرژی بالاتری نسبت به هگزی دو است، پس هگزی یک دارای ثبات کمتری می‌باشد. برای عبور از این سطح انرژی باید به آرامی سمت انرژی کمتر (هگزی دو) میل کرد. بنابراین رژیم‌های مشاهده شده، نشان‌دهنده (الف) ناپایداری ایستایی (ب) ناپایداری جابجا شونده (ج) ناپایداری مطلق می‌باشند.

۴- نتیجه‌گیری

تولید حباب در میکرو کانال دارای کاربردهای فراوانی در پزشکی و مهندسی بافت است. در این مقاله، با استفاده از لیتوگرافی نرم دستگاه میکرو سیال جریان متمرکز تولید و جریان فوم در آن مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از دو عامل کنترل فشار و نرخ جریان، می‌توان هر اندازه‌ای از حباب را متناسب با عرض کانال خروجی در دستگاه جریان متمرکز تولید کرد. عموماً حباب‌ها به صورت یکنواخت و یکپارچه تولید می‌شوند ولی در برخی از فشارها و نرخ جریان‌ها این رفتار حباب‌ها غیرخطی و به صورت نوسانی بین دو ساختار تغییر می‌کند. این رفتار را می‌توان ناپایداری تلقی کرد. در مقاله حاضر، به بررسی دقیق رفتار تولید فوم (به خصوص رفتار غیرخطی) در مقیاس میکرو پرداخته شده است.

فهرست علائم

علائم انگلیسی

P فشار (mbar)،

Q نرخ جریان (ml.hr^{-1})،

V حجم (m^3)،

f فرکانس (s^{-1})،

w عرض مقطع (m)،

u سرعت (m.s^{-1})،

L طول مشخصه (m)،

Ca موینگی،

علائم یونانی

ν سرعت (m.s^{-1})،

λ عامل وابسته به کسر مایع

- Bubbling in unbounded coflowing liquids, *Physical review letters*, 96(12) (2006) 124504.
- [19] S.L. Anna, N. Bontoux, H.A. Stone, Formation of dispersions using “flow focusing” in microchannels, *Applied physics letters*, 82(3) (2003) 364-366.
- [20] P. Garstecki, I. Gitlin, W. DiLuzio, G.M. Whitesides, E. Kumacheva, H.A. Stone, Formation of monodisperse bubbles in a microfluidic flow-focusing device, *Applied Physics Letters*, 85(13) (2004) 2649-2651.
- [21] M. Hashimoto, G.M. Whitesides, Formation of Bubbles in a Multisection Flow-Focusing Junction, *Small*, 6(9) (2010) 1051-1059.
- [22] P. Garstecki, H.A. Stone, G.M. Whitesides, Mechanism for flow-rate controlled breakup in confined geometries: A route to monodisperse emulsions, *Physical review letters*, 94(16) (2005) 164501.
- [23] B. Dollet, W. Van Hoeve, J.-P. Raven, P. Marmottant, M. Versluis, Role of the channel geometry on the bubble pinch-off in flow-focusing devices, *Physical review letters*, 100(3) (2008) 034504.
- [24] P. Garstecki, M.J. Fuerstman, G.M. Whitesides, Nonlinear dynamics of a flow-focusing bubble generator: An inverted dripping faucet, *Physical review letters*, 94(23) (2005) 234502.
- [25] J.-P. Raven, P. Marmottant, F. Graner, Dry microfoams: formation and flow in a confined channel, *The European Physical Journal B-Condensed Matter and Complex Systems*, 51(1) (2006) 137-143.
- [26] P. Garstecki, G.M. Whitesides, Flowing crystals: nonequilibrium structure of foam, *Physical review letters*, 97(2) (2006) 024503.
- [27] T. Beatus, T. Tlusty, R. Bar-Ziv, Phonons in a one-dimensional microfluidic crystal, *Nature Physics*, 2(11) (2006) 743.
- [28] J.-P. Raven, P. Marmottant, Microfluidic crystals: dynamic interplay between rearrangement waves and flow, *Physical review letters*, 102(8) (2009) 084501.
- [29] F.P. Bretherton, The motion of long bubbles in tubes, *Journal of Fluid Mechanics*, 10(2) (1961) 166-188.
- [30] I. Cantat, N. Kern, R. Delannay, Dissipation in foam flowing through narrow channels, *EPL (Europhysics Letters)*, 65(5) (2004) 726.
- experience, in: *SPE/DOE Improved Oil Recovery Symposium*, Society of Petroleum Engineers, 1994.
- [7] L.L. Schramm, Foam sensitivity to crude oil in porous media, in, *ACS Publications*, 1994.
- [8] W.R. Rossen, *Foams in enhanced oil recovery, Foams: Theory, Measurements and Applications*, 57 (1996) 413-464.
- [9] R. Farajzadeh, A. Andrianov, P. Zitha, Investigation of immiscible and miscible foam for enhancing oil recovery, *Industrial & Engineering chemistry research*, 49(4) (2009) 1910-1919.
- [10] G.J. Hirasaki, C.A. Miller, M. Puerto, Recent advances in surfactant EOR, in: *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Society of Petroleum Engineers, 2008.
- [11] R. Farajzadeh, A. Andrianov, R. Kraštev, G. Hirasaki, W.R. Rossen, Foam-oil interaction in porous media: implications for foam assisted enhanced oil recovery, *Advances in colloid and interface science*, 183 (2012) 1-13.
- [12] K. Ma, R. Liontas, C.A. Conn, G.J. Hirasaki, S.L. Biswal, Visualization of improved sweep with foam in heterogeneous porous media using microfluidics, *Soft Matter*, 8(41) (2012) 10669-10675.
- [13] T. Thorsen, R.W. Roberts, F.H. Arnold, S.R. Quake, Dynamic pattern formation in a vesicle-generating microfluidic device, *Physical review letters*, 86(18) (2001) 4163.
- [14] P. Guillot, A. Colin, Stability of parallel flows in a microchannel after a T junction, *Physical Review E*, 72(6) (2005) 066301.
- [15] P. Garstecki, M.J. Fuerstman, H.A. Stone, G.M. Whitesides, Formation of droplets and bubbles in a microfluidic T-junction—scaling and mechanism of break-up, *Lab on a Chip*, 6(3) (2006) 437-446.
- [16] C.S. Smith, On blowing bubbles for Bragg’s dynamic crystal model, *Journal of Applied Physics*, 20(6) (1949) 631-631.
- [17] A.M. Gañán-Calvo, J.M. Gordillo, Perfectly monodisperse microbubbling by capillary flow focusing, *Physical review letters*, 87(27) (2001) 274501.
- [18] A.M. Gañán-Calvo, M.A. Herrada, P. Garstecki,

