



مروری بر پدیده‌های همرفت در سیالات تبخیری، غیر تبخیری و محلول‌های بسپاری

ندا باقرزاده^۱، علی عباسیان^{۲*}، محمد بهشاد شفیعی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی صنایع پلیمر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران، صندوق پستی: ۷۷۵-۱۴۵۱۵.

۲- استادیار، گروه مهندسی پلیمر، آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران، صندوق پستی: ۷۷۵-۱۴۵۱۵.

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران، صندوق پستی: ۹۵۶۷-۱۱۳۶۵.

تاریخ دریافت: ۹۵/۴/۸ تاریخ بازبینی نهایی: ۹۵/۱۰/۴ تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۱/۶ در دسترس بصورت الکترونیک: ۹۵/۱۱/۶

چکیده

جنبش‌های همرفتی و تشکیل الگوهای سلولی در سیال از مسائل مهم در هیدرودینامیک فیزیکی- شیمیایی، انتقال جرم و گرما در سامانه‌های سیالی کم عمق و با سطح آزاد هستند. شناخت این نوع از جنبش‌ها در محلول‌های بسپاری، به سبب اهمیت ویژه‌ای که در ساخت فیلم‌های نازک در صنایع مختلفی چون پوشش‌نگ، چسب، غشاها و سلول‌های خورشیدی دارند، مورد تمرکز بسیاری از پژوهش‌ها قرار گرفته است. به‌طور کلی، در این مرور به پدیده‌ی همرفت در سامانه‌های تک و چند جزئی غیر تبخیری و تبخیری، نظریه و سازوکارهای مرتبط با آن و همرفت در سامانه‌های پوششی پرداخته شده است. دریافت شده است که در درک و پیش‌بینی پدیده‌های همرفت در محلول‌های تبخیری، عدد مارانگونی حرارتی بست‌هورن و عدد مارانگونی غلظتی از اهمیت به‌سزائی برخوردار هستند.

واژه‌های کلیدی

سلول بنارد، همرفت مارانگونی، شیو کشش سطحی، پوشش‌های پایه حلالی.

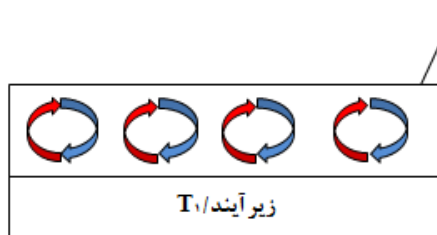
چکیده تصویری

جریان گرم یا لارونده (پیکان قرمز)

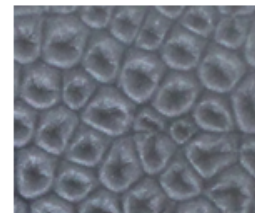
جریان سرد پایین‌رونده (پیکان آبی)

سطح آزاد/ T_1

$T_1 > T_2$



جریان همرفتی از کناره



سلول همرفتی در سطح



Review on Convection Phenomenons in Evaporative, Non-Evaporative Fluids and Polymer Solutions

N. Bagherzadeh¹, A. Abbasian^{2*}, M. Behshad Shafii³

1- Master Student, Polymer Engineering Department, Science and Research branch, Islamic Azad University, P.O.Box:775-14515, Tehran, Iran.

2- Assistant Professor, Polymer Engineering Department, Science and Research branch, Islamic Azad University, P.O.Box:775-14515, Tehran, Iran.

3- Associate Professor, Mechanical Engineering Department, Sharif university of Technology, P.O.Box:11365-9567, Tehran, Iran.

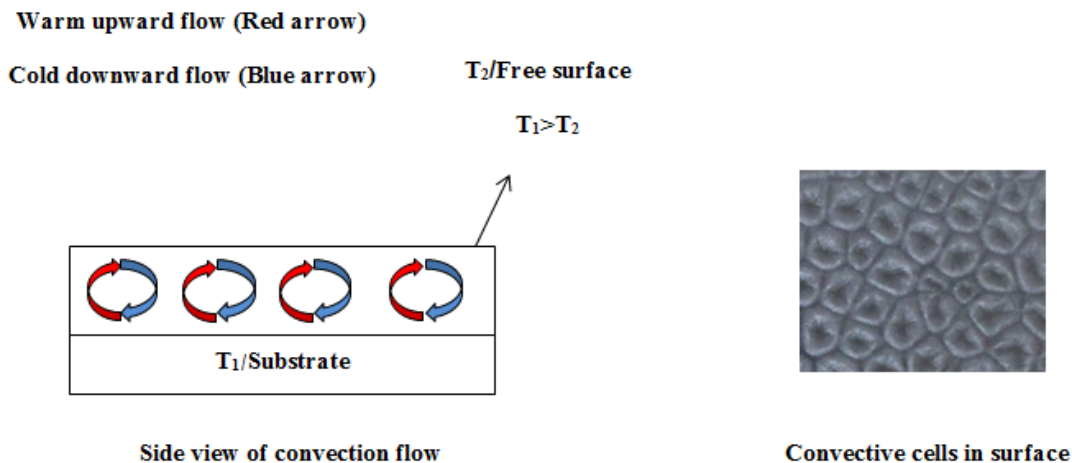
Abstract

Convective motions and cellular planform formation in fluid are important issues in physical-chemical hydrodynamic, mass and heat transfer in shallow fluid layer systems with free surface. Because of their special importance in the manufacture of thin films in diverse industries such as paints, adhesive, membranes and solar cells, recognition of these kind of motions in polymer solutions have been the focus of many investigations. Generally, this review deals with convection phenomenon in non-evaporative/evaporative, single/multi component systems, related theories and mechanisms. The main conclusion to be drawn is that Thermal-Marangoni Bestehorn and Solutal- Marangoni numbers are significant to understand and predict convection phenomena in evaporative solutions.

Keywords

Benard cell, Marangoni convection, Surface-tension gradient, Solvent borne coatings.

Graphical abstract



۱- مقدمه

پدیده‌ی همرفت نخستین بار توسط فیزیکدان فرانسوی به نام هنری بنارد در لایه‌هایی با ضخامت‌های متغیر بین ۰/۴ تا ۱/۲ از سیال که به‌طور افقی روی کارپایه یا زیرآیندی^۲ با رسانش گرمایی عالی قرار گرفته و از کف گرم می‌شدند، به‌طور اصولی مورد بررسی قرار گرفت [۸]. آزمایش‌های بنارد بر مبنای سیالات انتخابی، تبخیری و غیرتبخیری، به دو دسته تقسیم و نتایج متفاوتی از هر دسته استنباط شده است؛ به‌طور مثال، موم سفید ذوب شده و دیگر سیالات غیرتبخیری با گرانیوی مشابه موم می‌توانند رژیم همرفتی دائمی و الگوی پایا در قالب شبکه‌ای از شش ضلعی‌های منظم همانند شانه‌ی زنبور عسل ارائه دهند. با این وجود در سیال تبخیرشونده یا سیالی با گرانیوی بسیار کم هیچ حالت ایستا یا طرح سطحی ثابتی به‌وجود نمی‌آید. به‌طور مثال در اثر تبخیرشونده، سلول‌ها در ظاهر دستخوش جنبش انتقالی متناوب می‌شوند و به‌طور مداوم به‌واسطه‌ی تبادل یا تجمع با سلول‌های مجاور رشد یافته و یا محو می‌شوند. بر اساس آزمایش‌های بنارد، دما و شار گرمایی عوامل تاثیرگذار مهمی بر پدیده همرفت و اندازه سلول‌های ظاهر شده‌ی سطحی هستند؛ به‌طوری‌که در دما و شار گرمایی معین سرعت سیال غیرتبخیری در سلول‌ها مستقل از ضخامت لایه و به‌طور مستقیم متناسب با شار گرمایی است. در رژیم جریان غیردائمی، اندازه سلول‌های سطحی متناسب با ضخامت لایه سیال است. مهم‌ترین نکته در مورد آزمایش‌های همرفتی بنارد، این است که در طول دوره‌ی پیش-همرفتی، گرانیوی و رسانش گرمایی سیال قادر است آشفتگی‌های گرمایی و مکانیکی کوچک را تلف کرده و از بین ببرد، به طوری‌که هیچ همرفتی حاصل نشود. بنابراین، دو عامل بنیادی به همرفت طبیعی منتج می‌شود؛ نخست، شیو دمای بحرانی ویژه باید پیش از اینکه ناپایداری بتواند شروع شود، زیاد شود. دوم، جنبش‌هایی که منجر به پیش رفتن شیو دمای بحرانی می‌شوند، الگوهای سلولی دارند. الگوهای سلولی که به سلول‌های بنارد نیز شناخته شده‌اند در مراکز خود دارای جریان‌های بالارونده و در راستای دیواره‌ها، جریان‌های پایین‌رونده مطابق شکل ۱ دارند.

۲-۱- سازوکارهای ایجادکننده همرفت در لایه‌های سیال

غیرتبخیری

به منظور شرح منشا سلول‌های بنارد در لایه‌های افقی سیال، رایله نخستین تحلیل روش‌مند پایداری جریان همرفتی را ارائه داد که مرتبط با ماهیت تشکیل الگو بر اثر نیروی شناوری است که به عنوان همرفت آزاد یا طبیعی شناخته می‌شود [۹]. بر اساس نظریه وی که در قالب عدد بدون بعد رایله (رابطه ۱)، عنوان می‌شود، با ایجاد شیو دمایی در ضخامت لایه مایع، چگالی در سطح بالای مایع بیشتر از توده سیال در زیر می‌شود؛ بنابراین سطح بالاتر به لحاظ پتانسیل انرژی ناپایدار شده و حرکت‌های همرفتی برای حداقل شدن انرژی در سطح بالاتر آغاز می‌شوند. در مکانیک سیالات عدد بدون بعد رایله (رابطه ۱) ارتباط بین

جنبش‌های همرفتی در علم مکانیک سیالات پدیده‌ای شناخته شده در ضخامت‌های کم و زیاد از لایه‌های سیال هستند؛ محرک اصلی برای ایجاد این نوع جنبش‌ها در سامانه‌های تک‌جزئی غیرتبخیری، شیوهای دمایی هستند که به‌واسطه‌ی یک منبع گرمایی یا سرمایشی خارجی به سامانه اعمال می‌شوند. شیوهای دمایی در سیال‌های تک‌جزئی تبخیرشونده از طریق تبخیر سطحی و انتقال گرما در سطح مشترک سیال و محیط اطراف آن، در ضخامت لایه‌ی سیال القا می‌شوند. چنانچه محرک دمایی به اندازه‌ی کافی بزرگ باشد، بسته به ضخامت لایه سیال، سبب برانگیخته‌شدن نیروهای شناوری و کشش سطحی می‌شوند؛ که غلبه این نیروها به عنوان عوامل ناپایدارکننده بر نیروهای پایدارساز گرانیوی منجر به آغاز همرفت در سامانه می‌شوند. در سامانه‌های دو جزئی تبخیری و غیرتبخیری نیز، عوامل ناپایدارکننده علاوه بر محرک دمایی، دارای محرک غلظتی نیز هستند و منجر به ایجاد سازوکار ناپایدار مشابهی ناشی از غلظت می‌شود به‌طوری‌که جنبش‌های همرفتی ممکن است به‌صورت ترکیبی از اثرات گرمایی و غلظتی رخ دهند [۱۱]. شناخت جنبش‌های همرفتی در صنایع بسیاری گوناگونی که مرتبط با ساخت فیلم‌های نازک با ضخامتی در مقیاس میکرومتر هستند، مثل پوشش‌رنگ، چسب، چاپ، سلول‌های خورشیدی و غشاهای بسیار مورد توجه قرار گرفته و در حال شناخته شدن هستند [۴-۲]. مرحله‌ی بحرانی در فرآیند ساخت این نوع از فیلم‌ها، خشک‌شدن در اثر تبخیر است تا فیلم بسیاری نهایی با ضخامت یکنواخت و سطحی صاف حاصل شود؛ اما در اغلب موارد خشک‌شدن منجر به پدیده‌ها و ریخت‌شناسی‌های سطحی می‌شود. بخش بزرگی از طرح‌ها و پدیده‌های سطحی مرتبط با حضور جنبش‌های همرفتی در فیلم‌های نازک مایع هستند. رخداد جنبش‌های همرفتی در فیلم‌های نازک هم می‌تواند موجب نقص محصول نهایی شود، مثل سلول‌های بنارد به عنوان عیوب در صنعت پوشش‌رنگ [۶، ۵] و هم به عنوان اثری موجب خودلایه‌شوندگی پوشش‌های چندجزئی شود [۷]. این مرور به تعریف و تاریخچه‌ی همرفت در لایه‌های نازک تک‌جزئی و دو جزئی غیرتبخیری و تبخیری با تمرکز بر محلول‌های بسیاری، سازوکارهای ایجادکننده همرفت و نظریه‌های مطرح‌شده می‌پردازد.

۲- تعریف همرفت در لایه‌های نازک سیالات تک‌جزئی و

پدیده‌ی بنارد

در اصل، حرکت‌های همرفتی گونه‌ای از جابجایی هستند که در میان لایه‌های افقی سیال، هنگامی که سطوح پایین‌تر نسبت به سطوح بالاتر گرم‌تر هستند یا برعکس، به سبب شیو^۱ کشش سطحی یا چگالی وابسته به دما ایجاد می‌شوند. نمود رخداد این نوع جریان‌ها در ضخامت لایه سیال، تشکیل طرح‌هایی سلولی یا استوانکی^۲ در سطح لایه‌ی سیال است.

¹ Gradient
² Roll

³ Substrate

سامانه‌هایی با سطح آزاد، ناکافی بودن این نظریه را در توصیف ناپایداری‌های همرفتی نشان می‌دهد. در سال ۱۹۵۸، پیرسون مدل نظری متفاوتی برای مسئله‌ی همرفت گرمایی، به منظور توجیه منشا سلول‌های بنارد ارائه داد [۱۰]. پیش‌فرض مدل پیرسون وجود لایه‌هایی با چگالی ثابت و تغییرات کشش سطحی با دما است. سازوکار اثر نیروهای کشش سطحی در مدل پیرسون مشابه رایله است؛ یعنی نیروهای کشش-سطحی در سطح نسبت به توده سیال بیشتر بوده و در جهتی پیش می‌روند که سطح به حداقل انرژی پتانسیل رسیده و پایدار شود. نظریه‌ی پیرسون با احتساب سرعت اتلاف گرمایی ویژه از سطح مشترک (مرز سیال/ هوا) به محیط نسبت به تامین گرما برای سطح مشترک از توده سیال (L) و طول موج (a)، فاصله‌ی مرکز تا مرکز سلول‌های همرفتی، منجر به اعدادی در حالت حدی مرز رسانا (L=∞) و عایق (L=0) می‌شود.

مرز رسانا:

$$B = \frac{8a(\operatorname{acosha} + L\operatorname{sinha})(a - \operatorname{sinhacosha})}{(a^3 \operatorname{cosha} - \operatorname{sinh}^2 a)} \quad (2)$$

مرز عایق:

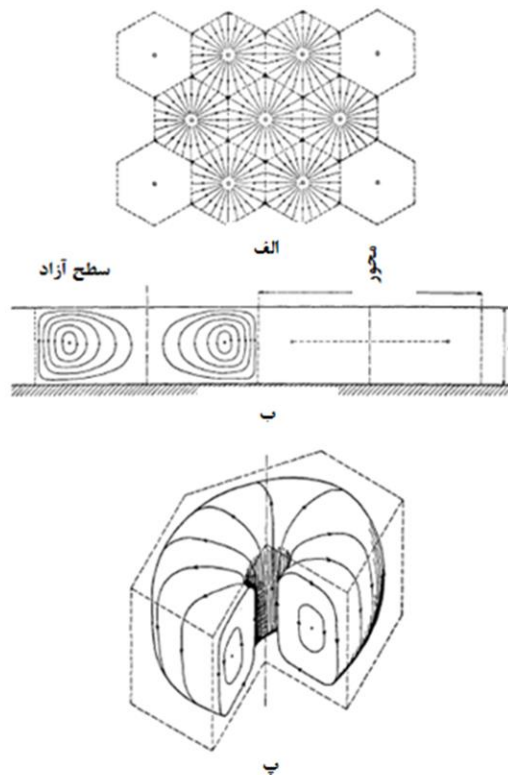
$$B = \frac{8a(\operatorname{asinha} + L\operatorname{cosha})(a - \operatorname{sinhacosha})}{(a^3 \operatorname{sinha} - a^2 \operatorname{cosha} + 2\operatorname{asinha} - \operatorname{sinh}^2 \operatorname{acosha})} \quad (3)$$

نیروهای شناوری و گرانو را در داخل سیال مشخص می‌کند؛ نیروهای شناوری، نیروهایی ناپایدارکننده برای شروع همرفت و نیروهای گرانو، نیروهایی پایدارساز هستند.

$$Ra = \frac{g\beta\Delta T\delta^4}{\nu\alpha} \quad (1)$$

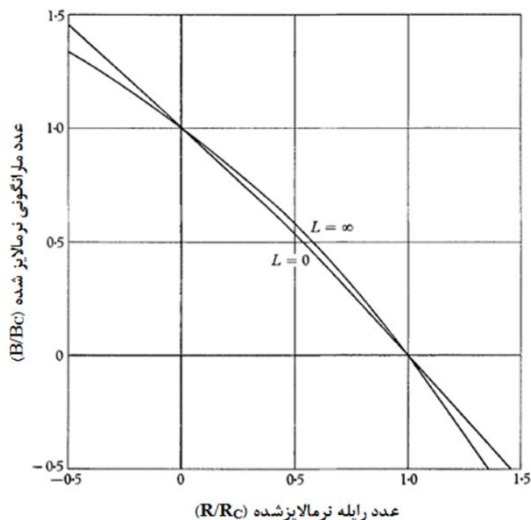
در عدد بدون بعد مذکور، g شتاب گرانش، β ضریب انبساط گرمایی، ΔT شیو دمایی، δ ضخامت لایه سیال، ν گرانروی جنبشی و α نفوذ گرمایی مربوط به سیال هستند. مقدار بحرانی عدد رایله برای شرایط مرزی، شامل مرز رسانای جامد در کف و سطح آزاد در تماس با محیط با استفاده از تحلیل خطی مربوط به مایع گرانو، ۱۱۰۸ حاصل شده است. زمانی که عدد رایله برای سیال کمتر از مقدار بحرانی باشد، تسطیح شدن^۱ شیو دمایی ایجاد شده در ضخامت لایه سیال در قالب رسانش است و در حالتی فراتر از مقدار بحرانی، انتقال گرما در سیال، در قالب همرفت صورت می‌پذیرد. به رغم کمتر بودن مقادیر اعداد رایله محاسبه شده از حد بحرانی، برای سیالات آزمایشی بنارد در گسترده ضخامت‌های انتخابی، الگوهای همرفتی در سطح سیال پدیدار شدند. عدم انطباق پذیری نظریه‌ی رایله با مشاهدات آزمایشگاهی برای سامانه‌هایی

^۱ Leveling



شکل ۱- همرفت سلولی پایا؛ الف) تصویر از سطح ب) تصویر از کنار و ج) تصویر سه بعدی [۸].

که توسط انرژی گرانی تلف می‌شود، وجود دارد. به سبب تفاوتی که در ماهیت نیرو محرک همرفت وجود دارد، جفت شدن این دو سازوکار جالب است. در روش تحلیلی مسئله همرفت، فاصله مرکز تا مرکز سلول‌ها (a) در حالت توسعه یافته به عنوان مشخصه‌ای برای مقایسه مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ برای مرز عایق (L=0)، این مقدار برای اعداد مارانگونی و رایله به ترتیب ۱/۹۹۳ و ۲/۰۸۶ هستند. تفاوت کمی که بین اندازه‌های سلول در هر عدد وجود دارد به عوامل محرک نسبت داده شده‌اند که هر کدام جداگانه عمل می‌کنند. با توجه به منحنی ارائه شده در شکل ۲، در حالت عایق هر دو محرک با ماهیت متفاوت، کشش سطحی و شناوری، سبب هم‌افزایی یکدیگر و پیشبرد همرفت می‌شوند و خط مستقیم با حداقل انحراف مشاهده می‌گردد. از این‌رو، نیلد مطرح کرد جفت‌شدگی دو عامل بسیار شدید است. اما زمانی که سطح آزاد رساناست (L=∞) انحراف خط مستقیم قابل توجه‌تر است و دو سازوکار از شدت جفت‌شدگی کمتری برخوردار هستند. تفاوت در اندازه‌های سلول بزرگ‌تر و مقادیر آنها بر مبنای سازوکار مارانگونی و رایله به ترتیب ۳/۰۱۴ و ۲/۶۸۲ می‌باشند. بنابراین بر اساس نظریه نیلد برای مقادیر کوچک از L، با توجه به تفاوت اندکی که بین اندازه‌ی سلول‌ها بر مبنای هر دو محرک شناوری و کشش سطحی وجود دارد، جفت‌شدگی هر دو محرک محتمل است. گرچه هنوز استدلال پیرسون در برخی از سیالات آزمایشی بنارد به سبب کمتر بودن مقادیر اعداد رایله محاسبه شده از حد بحرانی ۱۱۰۸ و فراتر بودن مقادیر اعداد مارانگونی از حد بحرانی ۸۰ برقرار است. بنابراین، محتمل است که سلول‌های بنارد عمدتاً توسط کشش سطحی ایجاد شوند. از طرفی، عدد مارانگونی به توان دوم ضخامت و رایله به توان چهارم ضخامت وابسته است؛ بنابراین، محرک کشش سطحی برای لایه‌های نازک سیال پراهمیت‌تر هستند.



شکل ۲- منحنی پایداری $L=0$ و $L=\infty$ به سطوح آزاد عایق و رسانا اشاره دارد و نقاط زیر منحنی، حالت‌های پایدار را نشان می‌دهد [۱۱].

در رابطه‌های ۲ و ۳، B مجموعه‌ای از عوامل فیزیکی تاثیرگذار بر پدیده همرفت گرمایی در لایه‌های نازک از سیال را نشان می‌دهد که شامل σ تغییرات کشش سطحی با دما، ΔT شیو دمایی در راستای عرضی سیال، δ ضخامت لایه سیال، ν گرانی جنبشی، α نفوذ گرمایی^۱ مربوط به سیال و ρ چگالی لایه سیال هست. مجموعه عوامل فیزیکی B به عدد مارانگونی (رابطه ۴) معروف است؛ این عدد نسبت بین نیروهای کشش سطحی، ناپایدارکننده و نیروهای گرانیو پایدارکننده، را نشان می‌دهد.

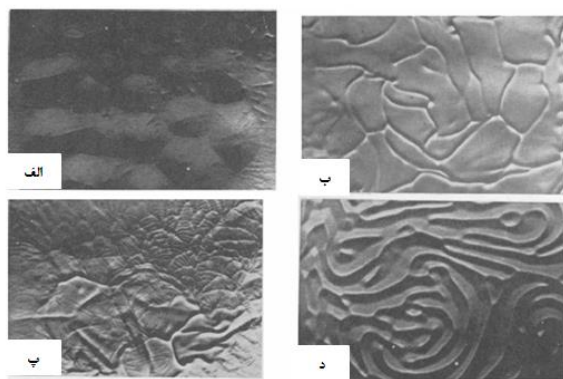
$$B=Ma=\frac{\sigma\Delta T\delta^2}{\rho\nu a} \quad (4)$$

اتلاف گرمایی ویژه از سطح (L) در نظریه‌ی پیرسون، اهمیت مرز عایق و رسانا را در آستانه پایداری یا شروع ناپایداری‌های همرفتی در سامانه نشان می‌دهد. در تحلیل پیرسون می‌توان سامانه‌ی بسته‌ای را فرض کرد که دارای مرز آزاد در سطح است و از مرز کف گرما داده می‌شود؛ اگر سامانه بتواند گرما ایجاد شده از سطح کف را به واسطه‌ی سطح آزاد به محیط اطراف منتقل کند، سامانه از آستانه پایداری بیشتری برخوردار بوده و مقدار عدد مارانگونی بحرانی به ۸۰ می‌رسد؛ اما اگر مرز سطحی عایق و امکان انتقال گرما وجود نداشته باشد، انرژی تولید شده در اثر منبع گرمایی خارجی در سیال ذخیره شده و برای اتلاف گرما در سامانه آشفستگی‌های دمایی ایجاد و با زمان رشد می‌یابند که در نهایت منجر به کاهش آستانه‌ی پایداری سامانه و رسیدن مقدار عدد مارانگونی بحرانی به ۴۸ و شروع همرفت می‌شود. بعد از نظریه‌های ارائه شده توسط رایله و پیرسون، نیلد با ادغام هر دو نظریه، دو عامل شناوری و کشش سطحی را در قالب رابطه‌ی خطی $B/B_c + R/R_c = 1$ موجب پیش‌برد ناپایداری همرفت معرفی کرد [۱۱]. بر مبنای تحلیل وی زمانیکه عدد مارانگونی بحرانی (B_c) با افزایش عدد رایله (R) مطابق شکل ۲ کاهش یابد، دو عامل ایجاد کننده‌ی ناپایداری یکدیگر را تقویت می‌کنند؛ حال اگر تقویت حداکثری از هر دو نیروی محرک وجود داشته باشد، انتظار می‌رود برای هر مقدار از اعداد رایله و مارانگونی محاسبه شده در هر دو حالت حدی، یعنی مرز عایق ($L=0$) و رسانا ($L=\infty$) نقطه‌ای بر رابطه خطی مذکور قرار گیرد. با توجه به اینکه R متناسب با تفاوت دما بین سطوح کف و سطح است، انرژی بالقوه موجود از اثر شناوری نیز با R متناسب است. بنابراین، برای اندازه‌ی سلولی و الگوی جریان ثابت، R/R_c نسبت انرژی موجود از شناوری به انرژی مورد نیاز برای متعادل کردن اتلاف گرانی در شروع همرفت است. به صورت مشابه نیز، انرژی بالقوه از کشش سطحی نیز متناسب با شیو دمای خطی و بنابراین عدد مارانگونی است؛ بنابراین، B/B_c نسبت انرژی موجود از کشش سطحی به اتلاف گرانی در شروع همرفت است. بطور کلی در پایداری حدی^۲ (مرز بین پایداری و ناپایداری) تعادلی بین انرژی جنبشی (ناشی از شناوری و کشش سطحی)

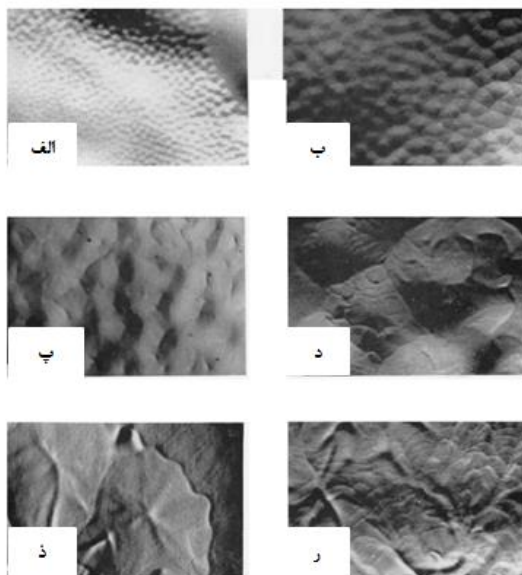
¹ Thermal diffusivity

² Marginal stability

شود. با توجه به مشاهدات برگ و همین‌طور ضخامت بحرانی تعریف شده برای تعیین نوع سازوکار غالب در سامانه، انتظار می‌رود که همرفت ناشی از شناوری الگویی نواری یا استوانکی نشان دهد که مشخصه‌ی همرفت رایله در نظر گرفته شده است؛ برای لایه‌های نازک با ضخامت کمتر از یک میلی‌متر نیز، طرح سلولی مشخصه‌ی همرفت ناشی از کشش سطحی یا مارانگونی است. تقریباً در تمام بررسی‌های تحلیلی موجود در زمینه‌ی لایه سیال تبخیرشونده، تبخیر صرفاً به عنوان سرمایش از سطح در نظر گرفته شده است. یعنی اثر تبخیر توسط اتلاف گرمایی معینی از سطح نسبت به سرعت و گرمای نهان تبخیر اعمال شده در شرایط مرزی متناظر با L در اعداد پیرسون (رابطه‌های ۲ و ۳) نشان داده شده و از نقش خود تبخیر در پایداری همرفتی صرف‌نظر شده است.



شکل ۳- تصاویر سطحی همرفت تبخیری: الف) متانل، ضخامت لایه سیال ۲ میلی‌متر؛ ب) بنزن، ضخامت لایه سیال ۱۰ میلی‌متر؛ طرح نواری، ضخامت لایه سیال ۱۰ میلی‌متر؛ طرح خطراره و د) کربن تتراکلرید، ضخامت لایه سیال ۲ میلی‌متر؛ طرح استوانکی [۱۲].



شکل ۴- تصاویر سطحی همرفت تبخیری در بنزن: الف) عمق ۰/۵ میلی‌متر، طرح سلولی، ب) عمق ۱ میلی‌متر، طرح سلولی، ب) عمق ۳ میلی‌متر، طرح سلولی، د) عمق ۴ میلی‌متر، پدیدار شدن طرح خطراره بصورت خطوطی در پس زمینه طرح سلولی، د) عمق ۶ میلی‌متر، طرح نواری و ر) عمق ۹ میلی‌متر، طرح خطراره [۸].

۲-۲- همرفت در لایه‌های نازک تبخیرشونده تک‌جزئی

همان‌طور که ذکر شد اکثر بررسی‌های مربوط به مسئله ناپایداری‌های گرمای همرفتی^۱ در لایه‌های سیالات، مرتبط با لایه‌های سیالی هستند که به‌طور پایا از کف با شیو دمایی ایستا و بدون تبخیر گرما داده می‌شوند. سازوکارهای شناوری و کشش سطحی به خوبی همرفت ایجاد شده در این نوع سامانه‌ها را توجیه می‌کنند اما توضیح متقاعدکننده‌ای برای همرفت در لایه‌های تبخیرشونده، به‌ویژه آنهایی که از کف سرد می‌شوند، ارائه نمی‌دهند. برای مثال، در آزمایش‌های بنارد برای سیال‌های با فراریت بالا، هیچ الگوی جریان پایایی به سبب تغییر پیوسته‌ی ضخامت لایه سیال و تاثیر آن بر ساختار جریان مشاهده نشد. در آزمایش‌های برگ و همکاران نیز، در لایه‌های تبخیرشونده سیالات خالصی مثل بنزن، استن، کربن تتراکلرید و غیره الگوهای همرفتی قابل توجهی در عمق‌های گوناگون از سیال مشاهده گردید [۸]. به‌طور کلی، در آزمایش‌های آنها همرفت تبخیری معمولاً چهار شکل ساختاری از جریان در ضخامت‌های متفاوت از سیال‌های مختلف ارائه می‌دهد؛ الگوی سلولی، خطراره^۲، استوانکی و نواری. شکل ۳ تصاویری سطحی (الف تا د) از الگوی جریان مربوط به همرفت تبخیری در سیالات گوناگون با ضخامت‌های متفاوت ارائه می‌دهد. برگ و همکاران دو عامل ضخامت لایه سیال و حضور مواد غیر تبخیری با اندازه مولکولی بزرگ را در نوع طرح‌های همرفتی ایجاد شده موثر دانستند. برای مثال، الگوهای همرفتی در ضخامت متغیر ۲ تا ۳ میلی‌متر از بنزن تبخیرشونده با حضور مواد مذکور استوانکی است که با حذف آنها الگوهای سلولی در سطح پدیدار می‌شوند. در ضخامت‌های متغیر از لایه بنزن تبخیرشونده نیز طرح‌های سطحی از سلول به الگوی نواری تغییر می‌کند؛ شکل ۴ (الف تا ر) تصاویر طرح‌های سطحی در ضخامت‌های گوناگون از لایه بنزن را نشان می‌دهد؛ که در ضخامت ۰/۵ میلی‌متر طرح سلولی نشان می‌دهد. با افزایش بیشتر ضخامت اندازه سلول‌ها بزرگ‌تر می‌شود تا این‌که در ۴ میلی‌متر طرح خطراره به‌صورت خطوطی هاشورخورده در سطح پدیدار شده و در ضخامت‌های ۶ و ۹ میلی‌متر، سلول‌ها به‌طور کامل محو شده و طرح‌های نواری و خطراره‌ها در سطح سیال رویت می‌شوند. آنها همچنین با مقایسه‌ای بین ضخامت بحرانی لایه سیال با استفاده از هر دو نظریه کشش سطحی و شناوری، ضخامت بحرانی برای شروع ناپایداری‌های همرفتی مارانگونی و شناوری بر اساس (رابطه ۵) ارائه دادند.

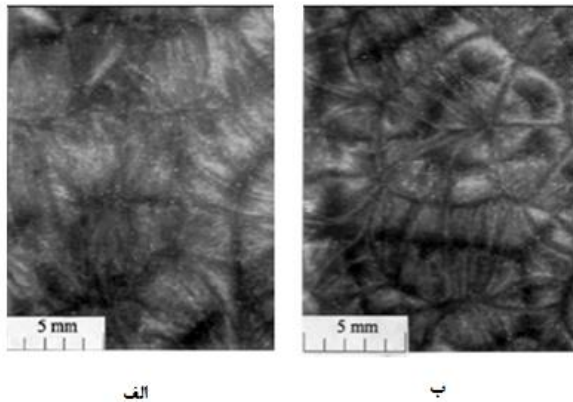
$$\bar{h}_c = \left[\frac{-(d\sigma/dT) \cdot 1108}{\rho g \alpha} \right]^{1/2} \quad (5)$$

بر اساس \bar{h}_c به دست آمده، برای اکثر سیالات در دمای آزمایشگاه، رابطه ۵ منجر به مقادیر \bar{h}_c با مرتبه‌ای در حد یک سانتی‌متر می‌شود. آنگاه برای ضخامت‌هایی کمتر از \bar{h}_c به سبب آنکه نسبت سطح به حجم زیاد است، انتظار می‌رود که نیروهای کشش سطحی نسبت به نیروهای شناوری در ایجاد ناپایداری همرفتی موثرتر عمل کنند. برای مقادیر \bar{h}_c کوچک‌تر از یک میلی‌متر، شروع جنبش‌های سلولی به‌طور قطع می‌تواند به کشش سطحی نسبت داده

¹ Thermo- convection instability

² Rib

ارائه می‌دهند (شکل ۵)؛ از این‌رو، محرک تبخیری را بیش‌تر از محرک اختلاف دما در لایه‌های این نوع از سیال مهم دانسته‌اند.



شکل ۵- طرح هم‌زیستی استوانک و سلول مانند در لایه‌های R-113 با ضخامت ۱ میلی‌متر با دمای (الف) ۲۳ و (ب) ۱۱/۸ درجه سلسیوس از کف گرم و سرد می‌شوند [۱۶].

بر اساس نتایج حاصل از آزمایش‌ها، ژانگ و همکارانش تبخیر را به عنوان محرک دیگر در القا و تقویت همرفت در لایه‌های مایع تبخیرشونده مطرح و عدد مارانگونی را با در نظر گرفتن، Δh_v گرمای نهان تبخیر و V سرعت تبخیر اصلاح کردند (رابطه ۶).

$$Ma^* = \frac{\sigma \Delta T \delta}{\mu a} + \frac{\sigma V \Delta h_v \delta^2}{kva} \quad (6)$$

عدد بدون بعد مطرح شده توسط ژانگ و همکارانش، که ترکیبی از هر دو محرک تبخیر و تفاوت دما است، به خوبی سازوکار و نیروی محرک برای ایجاد و تقویت همرفت‌ها در لایه‌های سیال تبخیر شونده را توصیف می‌کند. بست‌هورن نیز عدد مارانگونی (رابطه ۷) با صرف در نظر گرفتن اثر تبخیر در سامانه ارائه داد و شرایط بحرانی برای ناپایداری‌های مارانگونی - بنارد القا شده در اثر تبخیر را با استفاده از تحلیل پایداری خطی تخمین و مقادیر آن را بیش‌تر از ۸۰ به دست آورد [۱۷]. با توجه به عدد ژانگ و بست‌هورن که هر دو دارای مشخصه‌های تبخیر (سرعت تبخیر و گرمای نهان تبخیر) هستند، می‌توان گفت عدد بست‌هورن برای سامانه‌هایی کاربرد دارد که شیوه‌های دمایی در آن صرفاً در اثر تبخیر القا شده‌اند و هیچ منبع گرمایی خارجی در سامانه برای ایجاد شیوه‌های دمایی اعمال نشده است. در اصل، عدد ژانگ برای سامانه‌های تبخیری کاربرد دارند که از کف سرد یا گرم می‌شوند.

$$Ma = \frac{\sigma \delta^2 V \Delta h_v}{\rho a v k} \quad (7)$$

گرچه، پیش‌تر جو و همکارانش [۱۳] تحلیل پایداری خطی برای سیالات تبخیرشونده ارائه و نشان داده بودند که لگدزنی بخار^۱ توسط ناپایداری‌های تبخیری القا می‌شوند. بر اساس تحلیل آنها، تغییر شکل لایه‌های فرار با لگدزنی بخار بسیار مشابه لایه‌های غیرتبخیری با مارانگونی گرمایی است. پدیده‌ی لگدزنی بخار، ناپایداری و آشوب در اثر خروج سریع مولکول‌ها از سطح مایع است که آن را می‌توان ناشی از یک واکنش مکانیکی در سطح، در اثر تبخیر سریع دانست. پالمر به تحلیل ریاضی مسئله لگدزدن بخار در فشارهای کم بر سطح مایع پرداخت [۱۴]. نظر او این بود که به علت قانون بقای جرم، تغییر در چگالی سیال به هنگام تبخیر موجب یک ناپیوستگی در سرعت سیال (عمود بر فصل مشترک سیال/ هوا) و سرعت انتقال تکانه^۲ می‌شود، از سویی قانون بقای تکانه نیز برقرار است. از این‌رو ناپیوستگی در سرعت، موجب اعمال یک نیروی رو به پائین عمود بر فصل مشترک می‌شود که به لگدزدن بخار تعبیر می‌گردد. توان یا میزان لگدزنی با افزایش سرعت تبخیر و هم‌چنین با افزایش نسبت چگالی ماده در دو فاز بخار و مایع، افزایش می‌یابد. از آن‌رو که چگالی فاز گاز به صورت خطی متناسب با فشار است، مقدار و اهمیت نیروی لگدزنی بخار به صورت خطی با کاهش فشار محیط زیاد می‌شود. لگدزدن بخار منجر به ایجاد فرورفتگی در سطح می‌شود. هر نوع آشفتگی، مثلاً به صورت یک افزایش دمای سطحی در یک نقطه موجب افزایش فشار تبخیر و در نتیجه موجب افزایش لگدزنی بخار می‌شود. در سال ۱۹۹۶، ژانگ و همکارانش نتایج آزمایشگاهی ارائه دادند که به اثرات تبخیر بر همرفت مارانگونی گرمایی در لایه نازک سیال، چه از کف سرد و چه گرم می‌پردازد [۱۵]. بر اساس نظریه‌های رایله و مارانگونی زمانی که مقدار اختلاف دما مثبت است، یعنی سامانه از کف گرم شود، انتظار رخداد همرفت وجود دارد؛ بنابراین با منفی شدن مقدار شیو دمایی به سبب سرد شدن سامانه از کف، انتظار می‌رود همرفت‌های مارانگونی و رایله رخ ندهند اما آزمایش‌های صورت گرفته توسط ژانگ و همکارانش روی لایه‌های تبخیرشونده اتانل و ۱،۱،۲-تری‌کلروتری‌فلورو اتان (R-۱۱۳)، مشاهداتی متفاوت با نظریه‌های مطرح شده ارائه دادند. در لایه‌های تبخیرشونده مورد بررسی آنها، اختلاف دما در لایه سیال بر اساس سرمایش یا گرمایش، می‌تواند مقادیر مثبت، منفی و حتی صفر اختیار کند و هم‌چنان ناپایداری‌های همرفتی در سامانه برقرار باشند. نکته مورد توجه دیگری در مورد آزمایش‌های ژانگ و همکارانش سرعت تبخیر است؛ R-۱۱۳ سرعت تبخیری ده برابر بزرگ‌تر از اتانل دارد، بنابراین ناپایداری‌های همرفتی در لایه‌های تبخیرشونده این مایع ساده‌تر القا شده و جنبش‌های همرفتی سریع‌تر هستند. در این نوع سیال مادامی که اختلاف دما مثبت است، چه لایه‌ها از زیر گرم چه سرد شوند، لایه‌های R-۱۱۳ با ضخامت یک میلی‌متر، همیشه مشخصات همرفت ناشی از اختلاف چگالی، یعنی طرح استوانکی یا هم‌زیستی از استوانک و سلول،

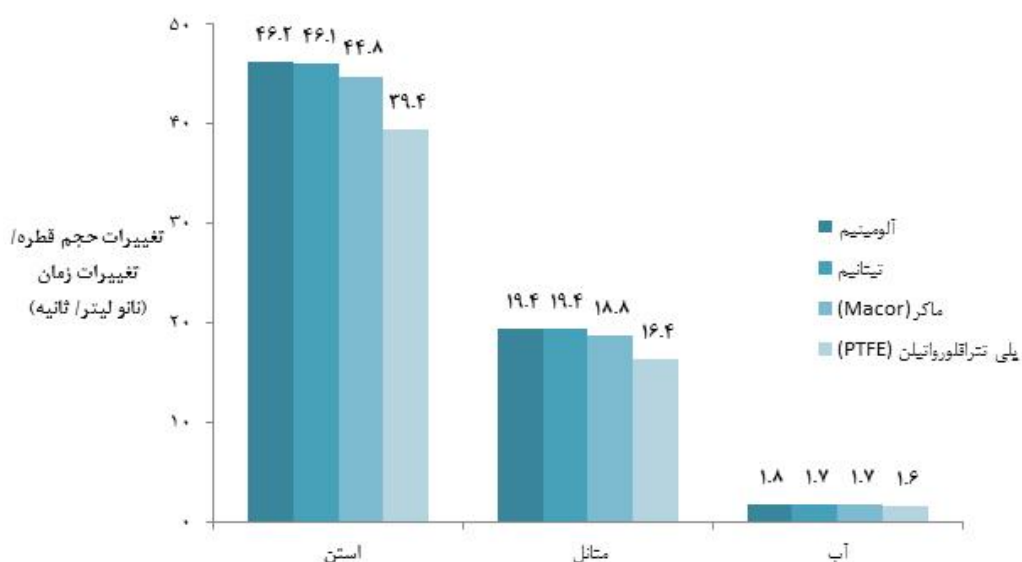
¹ Vapor recoil
² Momentum

بنابراین شیو دمایی کمتری ایجاد شده و سرعت تبخیر نیز به سبب کم بودن شیو دمایی کاهش می‌یابد. در واقع عدد مارانگونی با افزایش نسبت رسانش گرمایی سیال به رسانش گرمایی زیرآیند افزایش می‌یابد [۲۰]؛ یعنی رسانش گرمایی کم زیرآیند می‌تواند موجب پایداری بیشتر سامانه شود. شکل ۶ تاثیر جنس زیرآیند بر سرعت تبخیر سیالات گوناگون را نشان می‌دهد.

۳- همرفت در لایه‌های سیال دو جزئی/چند جزئی

پدیده‌ی همرفت ناشی از سازوکارهای شناوری و یا کشش سطحی در سامانه‌های دو یا چند جزئی سردشونده علاوه بر محرک دمایی که موجب شیوهای دمایی در لایه‌ی سیال می‌شوند، دارای محرک غلظتی نیز هستند؛ یعنی اجزای تشکیل دهنده‌ی سامانه بسته به سرعت تبخیر متفاوت اجزا موجب ایجاد شیوهای غلظتی می‌شوند. سازوکار اثر شیوهای غلظتی در سامانه‌های دو یا چند جزئی سردشونده مشابه شیوهای دمایی است؛ به این صورت که تغییراتی را در چگالی یا کشش سطحی اجزا القا و منجر به ایجاد جریانی از نواحی با چگالی یا کشش سطحی کمتر به بیشتر برای رسیدن به پایداری انرژی در سطح می‌کند. در این نوع لایه‌های نازک دو یا چندجزئی، اهمیت شیو غلظتی و تاثیر آن بر سازوکار همرفت مارانگونی در قالب عدد بدون بعد مارانگونی غلظتی (رابطه ۸) لحاظ شده است.

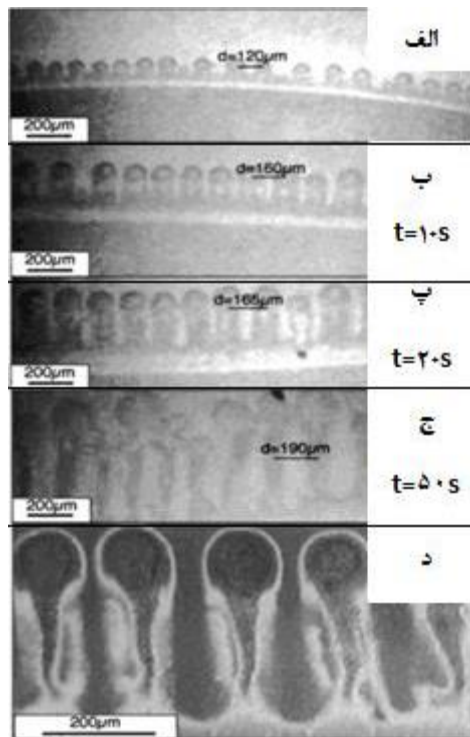
$$Ma_c = \frac{\sigma_c \Delta C \delta}{\rho \nu D} \quad (8)$$



شکل ۶- تاثیر جنس زیرآیند و نوع سیال بر سرعت تبخیر [۱۸].

۲-۳ تاثیر رسانش گرمایی زیرآیند بر ناپایداری همرفتی مارانگونی

در تحلیل صورت گرفته توسط پیرسون، مرز رسانا و عایق در سطح آزاد سیال که در تماس با هوا و یا گاز محیط است، تعریف شده است و صحبتی از تاثیر رسانا و عایق بودن زیرآیند بر ناپایداری مارانگونی به میان نیامده است. در عمل، عایق و رسانا بودن زیرآیند می‌تواند بر آستانه‌ی ناپایداری همرفتی اثر گذار باشد. به‌طور مثال دان و کاوه‌پور نشان دادند که ماهیت سیال و خواص گرمایی زیرآیند (شکل ۶) می‌تواند بر سرعت تبخیر قطرات و به تبع آن ناپایداری همرفتی اثر گذار [۱۹-۱۸]؛ با توجه به اینکه سرمایه‌ی تبخیری منجر به سردتر شدن سطح آزاد نسبت به زیرآیند می‌شود، می‌توان گفت که در زیرآیندی از جنس آلومینیم با رسانش گرمایی نسبتاً خوب، دمای زیرآیند اغلب ثابت مانده و برابر با دمای محیط است؛ به سبب اینکه با ایجاد نوسان دمایی در سیال و مرز مشترک سیال و زیرآیند، زیرآیند به دلیل داشتن رسانش گرمایی نسبتاً خوب می‌تواند گرما مورد نیاز برای جبران و از بین بردن نوسان دمایی را از محیط اطراف تامین کند و ضرورتاً تمام سرمایه‌ی تبخیری در داخل مایع رخ داده و منجر به تبخیر سریع‌تر سیال می‌شود، بنابراین شیوهای دمایی ایجاد شده در سیال به‌واسطه‌ی تبخیر و تغییر پیوسته‌ی دما بیشتر است. در حالی که در زیرآیندی از جنس پلی تترافلورواتیلن (PTFE) با رسانش گرمایی نسبتاً ضعیف، نوسان دمایی ایجاد شده بواسطه‌ی سرمایه‌ی تبخیری در داخل سیال و مرز مشترک زیرآیند و سیال نیز ایجاد می‌شود، اما چون زیرآیند قادر به تامین گرما از محیط اطراف برای جبران و حذف نوسان‌های دمایی نیست، دما در مرز مشترک زیرآیند و سیال متناسب با نوسان دمایی در داخل سیال تغییر می‌کند،



شکل ۷- الگوهای اثر انگشتی در محلول غلیظ ذرات نقره در زمان‌های متفاوت در طول فرآیند پخش شدن قطره، (الف) لحظه‌ی شروع آزمایش، (ب، ج و د) به ترتیب ۱۰، ۲۰ و ۵۰ ثانیه پس از شروع و (ر) پس از فرآیند تبخیر [۲۷].

۳-۱- همرفت پرشار، انگشت- نمکی در سامانه‌های دو جزئی جامد شونده

انواع دیگری از همرفت در سامانه‌های چندجزئی سرد شونده در اقیانوس‌شناسی، مقیاسی بسیار بزرگ‌تر از لایه‌های نازک سیالات مورد بحث پیشین، مشاهده و گزارش شده‌اند؛ همرفت پرشاری، انگشت-نمکی^۲ و نفوذ دوگانه^۳. به سبب قیاس قابل توجهی که بین تشکیل دودکش‌ها (متناظر با همرفت پرشاری) در یخ دریا به هنگام فصل زمستان و ستون‌های ایجاد شده در حین قالب‌گیری آلیاژهای فلزی (شکل ۸) وجود دارد، این نوع از همرفت‌ها در مقیاسی کوچک‌تر در آزمایشگاه‌ها حین سردسازی محلول‌های کلرید آمونیم آبی مورد، به منظور تبیین علل ایجاد این نوع از همرفت‌ها و ارائه‌ی مدلی تحلیلی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. فرآیند سردسازی محلول‌های کلرید آمونیم آبی از کف، سامانه‌ای سه‌لایه تشکیل می‌دهند که عبارتند از: لایه‌ای جامد در کف، لایه‌ای لوشی^۴ که ترکیبی از جامد و مایع است و لایه‌ای مایع در سطح [۲۸]. اگر جامدسازی از سطح صورت گیرد توالی لایه‌ها به صورت لایه‌ای جامد در سطح، لایه لوشی در میانه و لایه‌ی مایع در کف هستند. در طول فرآیند جامدسازی سامانه‌های کلرید آمونیم آبی، همرفت‌های مذکور با مشخصه‌های پایداری متفاوت به‌طور هم‌زمان یا متوالی رخ می‌دهند [۳۱].

در عدد مذکور، شیو کشش سطحی ناشی از تفاوت غلظت (σ_c)، شیو غلظت بین سطوح سطح و کف سیال (ΔC) و ضریب نفوذ جرمی سیال (D) سه پارامتر متفاوت با عدد مارانگونی گرمایی هستند؛ عوامل دیگر، یعنی ضخامت لایه سیال (δ)، چگالی (ρ) و گرانیوی جنبشی (ν) در هر دو عدد مارانگونی با منشاهای متفاوت گرمایی و غلظتی یکسان هستند. سامانه‌های دو یا چندجزئی سردشونده در صنایع مبتنی بر ساخت فیلم‌های نازک با مقیاس میکرومتر از اهمیت کاربردی به‌سزایی برخوردار هستند و رخداد پدیده همرفت و اثر آن بر فیلم نهایی مورد تمرکز بسیاری از پژوهش‌های مربوطه هستند. به‌طور مثال، کلنر و همکارانش تصاویری از ساختارهای همرفتی سلولی حین تبخیر مخلوط آب/سیکلوهگزان مشاهده و گزارش کردند [۲۱]. نارایانان و همکارانش به لحاظ تحلیلی نشان دادند که رخداد همرفت مارانگونی ناشی از غلظت و الگوهای منتج از آن می‌توانند به جهت گرمایش سامانه بستگی داشته باشد [۲۲]. ژانگ و همکارانش با بررسی ناپایداری‌های مارانگونی در مخلوط‌های دو جزئی آب/اتانل و آب/نمک (سامانه‌ای جامدشونده) الگوهای متفاوتی از همرفت را با تغییر کسر حجمی اجزا در هر دو نوع مخلوط مشاهده و گزارش کردند [۲۳ و ۲۴]. هریس و لوئیس با تغییر کسر حجمی اولیه مربوط به کلئیدها، الگوهای متنوعی را در فیلم‌های تبخیرشونده کلئیدی ایجاد کردند [۲۵]. شوازنبرگر و همکارانش نیز الگوهای متفاوت همرفتی و برهم‌کنش‌های بین آنها را عامل پیچیدگی و ناپایداری رفتار سامانه‌های دو جزئی عنوان کردند [۲۶]. پیلنی و همکارانش اثر همرفت مارانگونی را در مخلوط‌هایی از نانوبلورهای متفاوت با اندازه‌ها و شکل‌های گوناگون در حلال‌هایی با سرعت تبخیر متفاوت مورد بررسی قرار دادند و الگوهای از حلقه و شش‌ضلعی در سطح مخلوط‌ها آزمایشی گزارش دادند؛ بر اساس مشاهدات آنها هر شش نانوبلور مورد مطالعه، یعنی مس، نقره، هیدروکسید آهن، کبالت، کادمیم سولفید و نقره سولفید با اندازه‌ها و شکل‌ها و خواص متفاوت نقشی در تشکیل حلقه‌ها ایفا نمی‌کنند بلکه سرعت تبخیر حلال عامل تعیین‌کننده در بوجود آمدن این نوع حلقه‌ها است. آنها هم‌چنین با تهیه‌ی محلول غلیظی از نانوکریستال‌های نقره، الگوهای ویژه‌ای از تغییرات ناپایداری را در سطح مقطع نمونه، در طول خط ترکندگی قطره‌ای از محلول بر سطح زیرآیندی از جنس شیشه، به نام اثر انگشتی^۱ گزارش کردند. ایجاد الگوهای اثر انگشتی به هم‌زمانی تشکیل شیوهای دمایی و غلظتی به سبب تبخیر حلال نسبت داده شده است. شکل ۷ تغییرات الگوهای اثر انگشتی را در طول زمان با تبخیر حلال نشان می‌دهند [۲۷].

¹ Fingering

² Salt- Finger

³ Double- diffusive

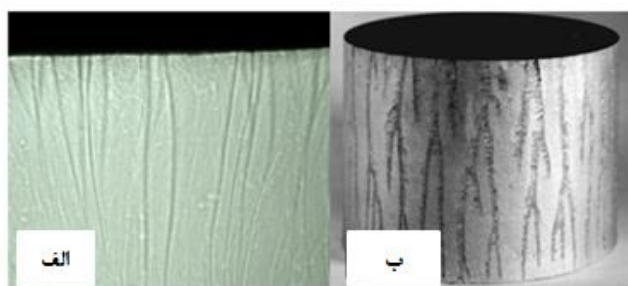
⁴ Mush

انگشت-نمکی در نتیجه‌ی این نوع از ناپایداری رخ می‌دهد و در لایه مرزی غلظتی محدود شده است. در این نوع ناپایداری کسر جامد آشفته نمی‌شود. ناپایداری لایه لوشی مرتبط با آشفتنگی کسر جامد است. مشاهدات نشان می‌دهد که این نوع از ناپایداری موجب تشکیل پرشار می‌شود [۳۴]. زمانی که لایه لوشی ضخیم‌تر شود با ادامه‌ی جامدسازی، موقعیت بحرانی در لوش فراتر می‌رود و ستون‌هایی در قالب کانال‌هایی عمودی در لوش پدیدار می‌گردند و پرشارهایی از سیال سبک‌تر به بالادست در کانال‌ها به داخل مایع جریان می‌یابند. با ادامه‌ی جامدسازی از سطح کف، تعداد اثر انگشت‌ها به پرشارهایی تنومند با تعداد کمتر تقلیل می‌یابند. با گذشت زمان کانال‌ها عمیق‌تر شده، در حالی که قدرت پرشارها افزایش یافته و حرکت آنها به سمت بالا می‌شود [۳۵].

۳-۲- همرفت در سامانه‌های پوششی

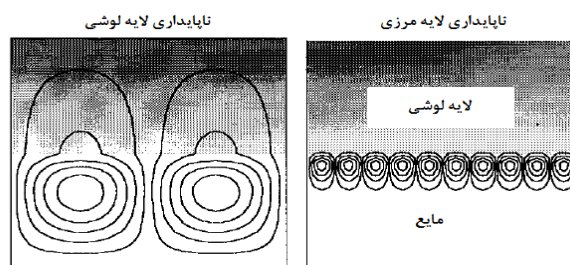
تشکیل فیلم به‌واسطه خشک‌شدن محلول‌های بسیاری، فرآیندی است که به‌صورت گسترده در آزمایشگاه‌ها و کاربردهای صنعتی بسیاری مثل پوشش‌دهی مورد استفاده قرار می‌گیرد. به‌طور مثال، سامانه‌های پوششی دو یا چند لایه به منظور حفظ زیرآیند از خوردگی و داشتن ظاهری مطلوب بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند؛ ویژگی مهم این نوع سامانه‌های پوششی، اعمال یک پوشش مجزا بجای دو لایه گسسته و متمایز است که سبب ارائه چسبندگی بین لایه‌ای و دوام بالاتر پوشش می‌شود. لایه‌ای شدن این نوع سامانه‌های پوششی به سبب اثری از پدیده‌ی همرفت، ناشی از تغییرات کشش سطحی، عنوان شده‌اند [۷].

در پوشش‌های پایه حلالی نیز که معمولاً از چندین جزء متفاوت تشکیل شده‌اند و هر جزء اثرات مختص خود را بر پوشش نهایی می‌گذارد، جریان‌های همرفتی یا سلول‌های بنارد به عنوان نقص سطحی در پوشش نهایی گزارش شده‌اند. همین‌طور در این صنعت بی‌قاعدگی‌های سطح پوشش با طول موج بین ۰/۱ تا ۳۰ میلی‌متر و دامنه‌هایی بین ۰/۵ تا ۵ میکرون در رده نقص پوست پرتقالی گزارش می‌شود که در نتیجه حضور همرفت غلظتی در سامانه پوششی ایجاد شده است [۳۶ و ۳۷]. بنابراین، با شناخت منشأ ایجاد نقص‌ها در سامانه‌های پوششی می‌توان عوامل کنترلی و موثر را در جهت حداقل کردن نقص‌ها و عیوب پوشش نهایی تعیین کرد. در بسیاری موارد تبخیر منجر به ایجاد طرح‌های شیپارگون بر سطح فیلم‌های نهایی می‌شود. دو مدل اصلی برای توجیه ایجاد شیپارهای سطحی در محلول‌های بسیاری ارائه شده است؛ در مدل نخست، ناپایداری‌های مکانیکی، پیشنهاد می‌شود که با خشک‌شدن محلول، شیپارهای غلظتی نزدیک سطح مشترک محلول/ بخار تشکیل می‌شود. بسته به خواص شیمی فیزیکی چنین سامانه‌هایی، لایه خارجی با غلظت بالاتری از ماده‌ی بسیاری می‌تواند دست‌خوش انتقال شیشه‌ای شود. دمای انتقال شیشه‌ای محلول نسبت به بسیار خالص کمتر است. بنابراین در صورت ایجاد ناپایداری سطحی، پوسته به‌صورت کشسان عمل می‌کند. اما زمانی که غلظت بسیار زیاد شود دمای انتقال شیشه‌ای بسیار افزایش یافته و به مقدار حقیقی بسیار خالص نزدیک می‌شود؛ این امر سبب باقی



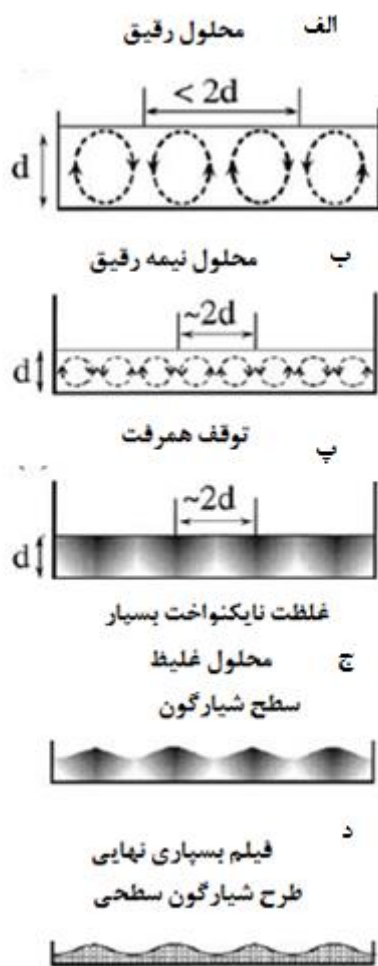
شکل ۸- ایجاد اشکالی ستونی در حین جامدسازی (الف) محلول آمونیم کلرید آبی و (ب) قطعه نهایی از الیازی فلزی که متناظر با همرفت پرشاری هستند [۲۹-۳۰].

همرفت‌های انگشت-نمکی که در بالای لوش تشکیل می‌شوند ناشی از رشد کریستال‌ها و دفع سیال غنی از آب در مراحل اولیه‌ی سردسازی هستند؛ در اصل به سبب تغییراتی که در چگالی اجزا به سبب شیپوهای غلظتی و گرمایی پدید می‌آید، اثر انگشت‌های غنی از آب در مجاورت اثر انگشت‌های غنی از نمک پایین‌رونده مشاهده می‌شوند. همرفت پرشاری که به‌طور مستقیم در داخل لوش ایجاد می‌شوند، چرخشی با مقیاس بزرگ از توده سیال هستند که توسط زوال همرفت اثر انگشتی-نمکی القا می‌شوند؛ در اصل، پرشارها ستونی از سیال هستند که در سیال دیگر جریان دارند. با شکست پرشارها در سطح بالاتر محلول‌ها، لایه‌های نفوذ-دوگانه افقی حاصل می‌شوند. همرفت نفوذ-دوگانه توسط دو شیپو چگالی توصیف می‌شود که هر کدام سرعت‌های متفاوتی از نفوذ را دارا هستند. در جامدسازی محلول‌های کلرید آمونیم آبی، تغییرات چگالی به‌واسطه‌ی شیپو در اجزای سیال و یا تفاوت‌هایی در دما (به‌واسطه انبساط گرمایی) ایجاد می‌شوند. شیپوهای گرمایی و غلظتی، اغلب موجب نفوذ در سامانه با زمان می‌شوند که توانایی بالقوه آنها را برای ایجاد همرفت می‌کاهد و برای ادامه همرفت نیاز به شیپوهای در نواحی دیگر از جریان دارد [۳۲]. به لحاظ مدلی تحلیلی وستر در سال ۱۹۹۲، دو نوع سازوکار شامل ناپایداری که سبب بوجود آمدن دودکش‌ها در حین سردسازی محلول‌های کلرید آمونیم آبی می‌شوند، عنوان کرد (شکل ۹)؛ ناپایداری لایه مرزی و ناپایداری لایه لوشی [۳۳].



شکل ۹- ناپایداری در لایه‌ی لوشی و لایه مرزی حین فرآیند جامدسازی محلول کلرید آمونیم آبی [۳۴].

در ناپایداری لایه مرزی، سیال در داخل شکاف‌های لایه لوشی ساکن است و ناپایداری در بالای لایه لوشی در ناحیه مایع رخ می‌دهد. همرفت



شکل ۱۰- طرحی از تغییر جریان همرفتی در عمق لایه محلول بسیاری با گذشت زمان؛ (الف) محلول رقیق و برقراری همرفت پایدار به واسطه‌ی تبخیر حلال، (ب) افزایش غلظت بسیار به واسطه تبخیر با گذشت زمان، (پ) سنگین بودن بسیار به سبب چگالی بیشتر نسبت به حلال و ایجاد جریان پایین‌رونده از بسیار، (ج) افزایش غلظت بسیار در نواحی سرد و ایجاد نایکنواختی در سطح فیلم و (د) فیلم نهایی تشکیل شده با سطحی شیاریگون [۳۹].

برمانشکو و همکارانش با استفاده از روش غوطه‌وری و سردکردن سریع فیلم‌های بدست آمده با نیتروژن مایع به بررسی الگوهای سطحی در محلول‌های بسیاری پلی‌متیل‌متاکریلات، پلی‌کربنات و پلی‌استایرن در حلال‌های کلروفرم و کلرومتان پرداخته‌اند [۴۰]. آنها سه الگوی اصلی محتمل برای ایجاد طرح‌های سطحی را مبنای کار خود قرار دادند؛ نخست، رطوبت جو می‌تواند منجر به تشکیل فیلم‌هایی با آرایش شش ضلعی منظم شود. دوم، فرآیندهای انتقال گرما و جرم در فیلم‌های بسیاری نازک؛ شیوه‌های دمایی و غلظتی فوق بحرانی عمود بر سطح و تغییرات دوره‌ای ایجاد شده در کشش سطحی می‌توانند مسئول تشکیل ساختارهای سطحی شوند. که این شیوه‌ها در حالت ناپایدار فوق بحرانی، سبب ناپایداری مارانگونی می‌شوند. سوم، در فیلم تبخیرشونده، پرش‌هایی از سیال غنی از حلال، افت موضعی در کشش سطحی القا می‌کنند و نیروهای سطحی تمایل به تقویت پرش‌ها دارند. بر اساس نتایج حاصل از کار آنها نوع بسیار، حلال و زیرآیند تأثیری بر اندازه

ماندن ناپایداری سطحی در سطح می‌شود [۳۵]. هم‌چنین پوسته غلیظ شیشه‌ای تشکیل شده در سطح به عنوان مانعی برای تبخیر حلال عمل می‌کند و حلال به واسطه‌ی نفوذ از پوسته‌ی شیشه‌ای به تبخیر ادامه داده و در نهایت فیلم خمیده و سطح شیاریگون می‌شود. براساس مدل دوم، الگوهای شیاردار سطحی نتیجه‌ی تغییر جنبش‌های همرفتی بنارد-مارانگونی هستند که منجر به الگوهای سطحی می‌شوند. با توجه به دو جزئی بودن فیلم‌های محلولی تبخیرشونده و ضخامت‌های اعمال شده کمتر از یک میلی‌متر از آنها در صنایع پوششی، دو سازوکار اصلی، یعنی همرفت گرمایی مارانگونی و همرفت غلظتی مارانگونی برای توجیه الگوهای سطحی مورد توجه هستند. به‌طور مثال، ساکورایی و همکارانش به توصیف سازوکار نقش دهنده شیاریهای سطحی و کنترل اندازه آنها توسط کنترل سرعت تبخیر پرداخته‌اند [۳۸]. نمونه‌ی مورد استفاده‌ی آنها هم‌بسیار^۱ تصادفی استایرن-بوتادیان حل شده در تولوئن با ضخامت اولیه ۳/۲ میلی‌متر در ظرف دوار شیشه‌ای قالب‌گیری می‌شود. چگالی اجزا مهم‌ترین عامل فیزیکی در بررسی آنها است که مقادیر آن برای هم‌بسیار و حلال به ترتیب 0.96 g/cm^3 و 0.87 g/cm^3 است. براساس نتایج حاصل، همرفت در قالب‌گیری محلول نه تنها به شناوری بلکه به کشش سطحی نیز نسبت داده می‌شود. در نمونه‌ها، سطح سیال چین می‌خورد. بدین صورت که جریان‌های بالارونده، نواحی گرم در سطح آزاد سیال ایجاد می‌کنند در نتیجه به سبب وابستگی کشش سطحی به دما، نواحی سردتر به سمت ناحیه گرم کشیده شده و این ناحیه را محدب می‌کند و نواحی اطراف (سردتر) فرورفته می‌شوند. با تبخیر حلال، گرمای نهان تبخیر از سطح تامین می‌شود که سبب کاهش دمای سطح می‌شود. در نواحی سردتر با کاهش دما، غلظت بسیار افزایش یافته و به دلیل سنگینی (بیشتر بودن چگالی بسیار نسبت به چگالی حلال) جریان پایین‌رونده‌ای ایجاد می‌شود که به واسطه آن همرفت پایدار برقرار می‌شود. ایجاد چنین جریان‌های بالا و پایین‌رونده (همرفت) با تبخیر حلال و افزایش کسر وزنی جزء غیر تبخیری در ضخامت لایه محلول باقی می‌ماند، حتی اگر همرفت متوقف شود (شکل ۱۰). غلظت نایکنواخت بسیار باقی‌مانده در سطح آزاد منجر به ایجاد شیاریهای سطحی می‌شود؛ به‌طوری‌که غلظت زیاد، سطح را محدب و غلظت کم آن را مقعر می‌سازد.

¹ Copolymer

سلول‌های ظاهر شده ندارند. به سبب استفاده از حلال‌های کلردار و نزدیک بودن نقطه‌ی جوش این نوع حلال‌ها به دمای محیط، میعان قطرات آب در سطح مشترک محلول بسیاری و هوا منجر به ایجاد تخلخل‌هایی در سطح می‌شوند که در اصل به سازوکار طرح‌های تنفسی^۱ مربوط هستند. با تغییر رطوبت در سامانه‌های مورد بررسی این نتیجه حاصل شد که رطوبت جو تاثیری بر ایجاد طرح‌های سطحی ندارد. اما ضخامت زیرآیند در ظاهر شدن طرح‌ها موثر است. با بررسی زیرآیندهای آلی و غیرآلی (پلی‌پروپیلن و شیشه کوارتز)، ساختارهای سلولی برای ضخامت‌های کم‌تر از ۱۵۰ میکرومتر از ضخامت زیرآیند به دست می‌آیند، اما برای فیلم‌های پلی‌کربنات ته‌نشین شده روی فولاد کرم^۲، خودسوارش^۳ در زیرآیندهایی با ضخامت کم‌تر از ۱۰۰ میکرومتر به دست می‌آید. در اصل، به طور آزمایشگاهی نشان دادند که انتقال گرما در زیرآیند نقش تعیین‌کننده‌ای را در فرآیند نقش‌روی منظم ایفا می‌کند. هم‌چنین آنها نشان دادند که مقایسه زمان خشک‌شدن T_d (که به طور آزمایشگاهی محاسبه می‌شود) با زمان مشخصه برای برقراری تعادل گرمایی در زیرآیند $T^* = \frac{\Delta^2}{\alpha}$ ، Δ و α به ترتیب ضخامت و نفوذ گرمایی زیرآیند هستند) ضروری است. بر اساس مشاهدات آنها نقش‌روی با مقیاس میکرومتر در تمام زیرآیندها، صرفاً اگر $T_d \gg T^*$ ، صورت می‌گیرد. برماشنکو و همکارانش، نفوذ گرمایی که در عدد مارانگونی لحاظ می‌شود را به صورت مجموعی از رسانش گرمایی و عمق زیرآیند و سیال در نظر گرفتند؛ که در (رابطه ۹)، δ و l به ترتیب نفوذ گرمایی زیرآیند، نفوذ گرمایی مایع، ضخامت زیرآیند و ضخامت لایه سیال هستند. بنابراین با قرار دادن نفوذ گرمایی وزنی در رابطه مارانگونی می‌توان ضخامت و رسانش گرمایی زیرآیند را در محاسبه مقدار عدد مارانگونی گرمایی لحاظ کرد [۴۱].

$$\alpha = \frac{\alpha_s \times l + \alpha_f \times \delta}{1 + \delta} \quad (9)$$

هم‌چنین آنها سازوکار پیش‌برنده همرفت را در محلول‌های پلی‌استایرن و پلی‌کربنات، بسیاری بی‌ریخت^۴، در حلال‌های کلردار و تولوئن بر زیرآیندی از جنس پلی‌پروپیلن مورد بررسی قرار دادند [۳۸]. در این نوع محلول‌ها با گرمایش زیرآیندی از کف، رویش نقش‌ها در سطح فیلم ناپدید می‌گردند. بنابراین، برماشنکو و همکارانش با تخمین عدد مارانگونی گرمایی برای گستره تغییرات دمایی ۱۰۰-۱۰ کلوین، مقدار آن را ۲۰-۲ به دست آورده که از حد بحرانی (۸۰) کمتر هستند. در نتیجه پیشنهاد کردند که نوع دیگری از ناپایداری‌ها باید در نظر گرفته شوند: ناپایداری مارانگونی غلظتی و یا ناپایداری معرفی شده بوسیله‌ی دی‌ژن. بر اساس نظریه مطرح شده توسط دی‌ژن در فیلم‌های تبخیرشونده، پخشاری از سیال غنی از حلال کاهشی موضعی در کشش سطحی القا می‌کند و به سبب حداقل‌شدن انرژی سطحی و در نتیجه

¹ Breath- figures

² Chrome steel

³ Self-assembling

⁴ Amorphous

⁵ Hydroxyl-functional thermosetting acrylic

می‌شود. حال اگر این تفاوت کشش سطحی کم باشد، ایجاد پرشارهایی در سامانه سبب انتقال جزء حل‌شونده که در سطح توسط تبخیر بجا مانده- اند به توده سیال می‌شود و به سبب این انتقال اختلاط در سامانه افزایش می‌یابد. تمام این موارد ذکر شده برای حالتی در نظر گرفته می‌شود که گرانشی در سامانه ثابت باشد، یعنی با حذف شدن حلال و افزایش جزء حل‌شونده تغییری در گرانشی حاصل نشود. اگر گرانشی با غلظت تغییر یابد، در مورد سامانه‌های بسیاری به واقعیت نزدیک‌تر است زیرا با افزایش جزئی غلظت بسیار، گرانشی به شدت تغییر یافته و این تغییرات به شدت بر نایکنواختی توزیع جزء حل‌شونده بر سطح اثر می‌گذارد و سبب ایجاد پستی و بلندی در سطح می‌شود. همین‌طور، در گرانشی‌های متغیر امکان برگشت لایه‌ی غنی‌شده از جزء حل‌شونده به توده ممکن نیست به سبب آن‌که به شدت گرانشی است و در مقابل جریان مقاومت نشان می‌دهد؛ بنابراین، اختلاطی صورت نمی‌گیرد [۴۵].

۴- نتیجه‌گیری

با توجه به مباحث مطرح شده، جنبش‌های همرفتی منجر به ایجاد طرح‌های سلول مانند بر سطح سیال می‌شوند. دو نوع سازوکار عمده برای القا کردن این نوع جنبش‌ها در لایه‌های افقی سیال مطرح است؛ نیروهای شناوری و کشش سطحی که به ترتیب توسط شیو چگالی و کشش سطحی ایجاد می‌شوند. تعیین نوع نیروهای غالب برای القا همرفت بستگی به ضخامت لایه‌ی سیال دارد، در سامانه‌هایی با ضخامت‌های بالا و در حدود یک سانتی‌متر، شناوری مهم‌تر از کشش سطحی است، اما در ضخامت‌های کمتر از یک میلی‌متر به سبب اینکه نسبت سطح به حجم زیاد است، نیروهای کشش سطحی پراهمیت‌تر هستند؛ نیروهای القاکننده همرفت در قالب دو عدد بدون بعد رایله و مارانگونی به عنوان عواملی برای تخمین پایداری و ناپایداری سامانه‌هایی از سیال مورد استفاده قرار می‌گیرند. حد بحرانی برای شروع همرفت ناشی از شناوری ۱۱۰۸ و همرفت مارانگونی ۸۰ است. در سامانه‌های تک‌جزئی تبخیرشونده، عدد مارانگونی و رایله به‌واسطه دو عامل گرمای نهان و سرعت تبخیر اصلاح شده و تبخیر علاوه بر سرمایش سطحی به عنوان عامل القاکننده همرفت نیز معرفی می‌شود. در سامانه‌های دوجزئی تبخیرشونده نیروهای القاکننده همرفت، هم‌تاهای غلظتی نیز به‌دست می‌آوردند. در سامانه‌های بسیاری تبخیرشونده در حین فرآیند خشک‌شدن و تبخیر حلال طرح‌هایی بر سطح فیلم ظاهر می‌شوند که بر خواص نهایی فیلم حاصل تاثیرگذار هستند. ایجاد این نوع طرح‌های سطحی تأییدی بر حضور همرفت در سامانه‌های بسیاری مطرح شده‌اند. با توجه به دو جزئی یا چند جزئی بودن سامانه‌های بسیاری تعیین نوع سازوکار غالب، همرفت مارانگونی گرمایی یا غلظتی، حائز اهمیت هستند، به سبب این‌که به‌واسطه آن می‌توان عوامل اثرگذار بر ایجاد پدیده‌های سطحی را پیش‌بینی و راهکارهایی را برای به حداقل رساندن آنها ارائه کرد. ایجاد طرح‌های سطحی در شروع خشک‌شدن لایه‌های نازک محلولی در حدود یک میلی‌متر و یا کمتر ممکن است منشا گرمایی داشته باشند و توسط همرفت مارانگونی گرمایی پیش برده شوند، اما با توجه به حذف حلال در

سخت می‌شود. اما اگر عکس این قضیه در سامانه برقرار باشد، پیش از اینکه شیو غلظتی در سامانه کاهش یابد، پخت صورت گرفته و فیلم سخت می‌شود؛ بنابراین، طرح‌های سطحی ایجاد شده در سطح باقی‌مانده و باعث ناهمگونی سطحی می‌شوند [۳]. باسو و هاری نیز تشکیل فیلم به‌واسطه خشک‌شدن محلول‌های پلی‌استایرن و تولوئن را در گستره‌ای از ضخامت‌ها (۵۵ میکرومتر تا ۱/۵ میلی‌متر)، غلظت‌ها (۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ درصد حجمی) و سرعت تبخیر مورد بررسی قرار دادند [۴]. آنها نیز شیارگون شدن سطح فیلم‌های نهایی را به پدیده‌ی همرفت مارانگونی مرتبط دانستند. محاسبه اعداد مارانگونی گرمایی (عدد مارانگونی محاسبه شده توسط بست‌هورن) و غلظتی در سامانه‌های آزمایشی آنها نشان داد که همرفت در غلظت‌های بالا از پلی‌استایرن توسط ناپایداری مارانگونی گرمایی القا نمی‌شود. در آزمایش‌های صورت گرفته، زمان برای تثبیت ناپایداری‌های همرفتی ضریبی از ۵۰۰ ثانیه است که تقریباً ۲۵ برابر بزرگ‌تر از نفوذ گرمایی (حلال تولوئن) است. بنابراین، احتمال دیگر، ناپایداری مارانگونی، مارانگونی غلظتی در سامانه وجود دارد. به‌طوری‌که با تبخیر حلال و ایجاد شیو غلظتی از بسیار بین سطح و کف لایه سیال، همرفت برقرار می‌شود. همین‌طور کنترل دامنه شیارها به‌واسطه سرعت تبخیر صورت می‌گیرد. توسنت و همکارانش جریان‌های همرفتی را در محلول پلی‌ایزوبوتیلن و تولوئن در لحظات اولیه شروع آزمایش‌ها مورد بررسی قرار دادند [۴۴]. با توجه به ضخامت انتخابی ۸ میلی‌متر، سازوکار شناوری پیش‌برنده همرفت است ولی به مرور زمان و کاهش ضخامت لایه سیال، همرفت مارانگونی غالب می‌شود. آنها به منظور تعیین نوع سازوکار غلظتی و زیرآیند، پس از به دست آوردن تصویر عمودی از جریان همرفتی، به جای تولوئن از تولوئن دوتره شده استفاده کردند. تولوئن دوتره شده چگالی بیشتری از پلی‌ایزوبوتیلن دارد. بنابراین، تفاوت چگالی بسیار و حلال نسبت به تولوئن معمولی/ بسیار معکوس است. با توجه به اینکه تبخیر، بسیار را در نزدیک سطح تغلیظ می‌کند، حالت ناپایا به‌واسطه‌ی ناپایداری گرانشی غلظتی طولانی مدت در سامانه باقی نمی‌ماند. همین‌طور مرتبه بزرگ‌نمایی سرعت به‌دست آمده از تصویرسازی جریان عمودی، در هر دو مورد مشابه است. بنابراین همرفت گرمایی در سامانه را سازوکار غالب معرفی کردند. یانتسیوس و همکاران سازوکارهای بالقوه‌ای را که موجب چروک خوردن دائمی فیلم‌های بسیاری خشک‌شده می‌شوند را با استفاده از شبیه‌سازی مورد بررسی قرار دادند [۴۵]. سامانه‌های شبیه‌سازی شده مورد بررسی آنها محلول‌های پلی‌استایرن/ تولوئن و پلی‌ایزوبوتیلن/ تولوئن هستند. تفاوتی که بین دو نمونه‌ی بسیاری منتخب وجود دارد این است که پلی‌ایزوبوتیلن در دمای محیط حالت لاستیکی و پلی‌استایرن حالتی سخت و شکننده (زیر دمای انتقال شیشه‌ای) دارد [۴۷ و ۴۶]. با توجه به این تفاوت، هر دو سامانه دامنه‌ای از شیارهای مشابه ارائه می‌دهند. بر اساس نتایج حاصل از شبیه‌سازی، نایکنواختی‌های سطحی تأییدی بر حضور همرفت مارانگونی غلظتی در سامانه‌ها هستند. با تبخیر حلال سطح غنی از جزء حل‌شونده می‌شود. اگر تفاوت کشش سطحی جز حل‌شونده و حلال زیاد باشد، یعنی تمایل دو جزء بهم کم باشد، تغییر شکل زیادی در سطح آزاد ایجاد

با توجه به اینکه همرفت پرشار در حین جامدسازی سامانه‌های دو یا چند جزئی مثل محلول کلرید آمونیم آبی یا آلیاژها تعریف مشخصی دارد و موجب ایجاد ستون‌هایی در مقطع عرضی محصول نهایی می‌شود. بنابراین، درک تمایز بین همرفت غلظتی و پرشار و تعیین نوع سازوکار غالب در سامانه‌های بسیاری همچنان نیاز به بررسی‌های بیشتر چه به لحاظ نظری و چه آزمایشگاهی دارد.

سطح و افزایش غلظت بسیار، همرفت مارانگونی غلظتی نیز می‌تواند در ایجاد طرح‌های سلولی پر اهمیت شود. در برخی سامانه‌ها ایجاد طرح‌های سطحی را دلیل حضور پرشارهایی از حلال معرفی کرده‌اند، که سبب کاهش کشش سطحی در سطح آزاد محلول و حداقل شدن پتانسیل انرژی و در نهایت پایا شدن سطح می‌شود. در پژوهش‌های مربوط به سامانه‌های بسیاری تعریف روشنی از تمایز همرفت غلظتی و پرشار ارائه نشده است؛

۵- مراجع

- V. Ha, C. Lai, "Onset of marangoni instability of a two-component evaporating droplet", *Int. J. Heat Mass Tran.*, 45, 5143-5158, **2002**.
- S. G. Yiantsios, B. G. Higgins, "Marangoni flows during drying of colloidal films", *Phys. Fluids* 18, 082103 (1-11), **2006**.
- N. Saranjam, S. Chandra, J. Mostaghimi, H. Fan, J. Simmer, "Orange peel formation due to surface tension-driven flows within drying paint films", *J. Coatings Technol. Res.*, 13, 3, 413-426, **2016**.
- N. Bassou, Y. Rharbi, "Role of benard - marangoni instabilities during solvent evaporation in polymer surface corrugations", *Langmuir*, 25, 9, 624-632, **2009**.
- A. Abbasian, S. R. Ghaffarian, N. Mohammadi, M. R. Khosroshahi, M. Fathollahi, "Study on different planforms of paint's solvents and the effect of surfactants (on them)", *Prog. Org. Coat.*, 49, 424, 229-235, **2004**.
- P. Hansen, M. Pierce, "Cellular convection in polymer coatings-an assessment", *Ind. Eng. Chem. Prod. Res. Dev.*, 12, 1, 67-70, 1973.
- A. Abbasian, S. R. Ghaffarian, N. Mohammadi, "Investigation of factors affecting stratification phenomenon in epoxy-acrylic coatings", *Iranian Polymer Journal*, 3, 1, 61-68, **2004**.
- B. Jc, M. Boudart, A. Acrivos, "Natural convection in pools of evaporating liquids", *J. Fluid Mech.*, 24, 4, 721-735, **1966**.
- R. Lord, "On convection currents in a horizontal layer of liquid when the higher temperature is on the under side", *Phil. Mag.*, 32, 529-546, **1916**.
- J. R. A. Pearson, "On convection cells induced by surface tension", *J. Fluid Mech.*, 4, 489-500, **1958**.
- D. A. Nield, "Surface tension and buoyancy effects in cellular convection", *J. Fluid Mech.*, 19, 341-352, **1964**.
- J. C. Berg, M. B. Andreas Acrivos, "Evaporative convection", *Adv. Chem. Eng.*, 6, **1966**.
- S. W. Joo, H. Davis, S. G. Bankoff, in: S. G. Gouesbet, A. Berlemont (Eds.), "Instabilities in multiphase flow", Plenum Press, New York, 219-229, **1993**.
- B. H. J. Palmer, "The hydrodynamic stability of rapidly evaporating liquids at reduced pressure", *J. Fluid Mech.*, 75, 487-511, **1976**.
- N. C. Zhang, "Effects of evaporation on thermocapillary flows in a liquid thin layer", *Heat Transf. Sci. Technol.*, B.- X. Wang High. Educ. Press. Beijing, 329-334, **1996**.
- S. T. Flows, N. Zhang, in: R. Savino (Eds.), "Surface tension-driven flows and applications", *Research Signpost, India*, 661, 2, 147-170, **2006**.
- M. Bestehorn, "Convection in thick and in thin fluid layers with a free surface - The influence of evaporation", *Eur. Phys. J. Spec. Top.*, 405, 391-405, **2007**.
- L. Tower, "The strong influence of substrate conductivity on droplet evaporation", *J. Fluid Mech.*, 623, 329-351, **2009**.
- P. Kavehpour, B. Ovryn, G. H. Mckinley, "Evaporatively-driven Marangoni instabilities of volatile liquid films spreading on thermally conductive substrates", *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, 206, 409-423, **2002**.
- N. Arifin, N. Bachok, "Boundary effect on the onset of marangoni convection with internal heat generation", *World Academy of Science: Engineering & Technolog (WASET)*, 40, 20-24, **2008**.
- T. Köllner, K. Schwarzenberger, "Multiscale structures in solutal marangoni convection: three-dimensional simulations and supporting experiments", *Phys. Fluids*, 25, 092109(1-31), **2013**.
- K. E. Uguz, R. Narayanan, "Instability in evaporative binary mixtures. I. the effect of solutal marangoni convection", *Phys. Fluids*, 24, 094101(1-12), **2012**.
- J. Zhang, A. Oron, R. P. Behringer, "Novel pattern forming states for marangoni convection in volatile binary liquids", *Phys. Fluids*, 23, 072102 (1-5), **2011**.
- J. Zhang, R. P. Behringer, A. Oron, "Marangoni convection in binary mixtures", *Phys. Rev. E*, 76, 016306 (1-7), **2007**.
- D. J. Harris, J. A. Lewis, "Marangoni effects on evaporative lithographic patterning of colloidal films", *Langmuir*, 24, 8, 827-829, **2008**.
- K. Schwarzenberger, T. Köllner, H. Linde, "Pattern formation and mass transfer under stationary solutal marangoni instability", *Adv. Colloid Interface Sci.*, 206, 344-371, **2014**.
- M. Maillard, L. Motte, A. T. Ngo, M. P. Pileni, "Rings and hexagons made of nanocrystals: a marangoni effect", *J. Phys. Chem. B*, 104, 11871-11877, **2000**.
- M. Hsing, F. Chen, "Stability characteristics of the mush affected by the solid layer below", *J. Crystal Growth*, 255, 369-378, **2003**.
- J. P. Gu, C. Beckermann, A. F. Giamei, "Motion and remelting of dendrite fragments during directional solidification of a nickel-base superalloy", *Metall. and Mater. Transactions A*, 28, 1533-1542, **1997**.
- M. G. Worster, D. W. R. Jones, "Sea-ice thermodynamics and brine drainage", *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 373, **2015**.

31. F. A. L. I. N. Chent, "Experimental study of directional solidification of aqueous ammonium chloride solution", *J. Fluid Mech.*, 227, 567-586, **1991**.
32. J. S. Turner, "Double-diffusive phenomena", *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 6, 37-56, **1974**.
33. M. G. Worster, J. S. Wettlaufer, "Natural convection, solute trapping, and channel formation during solidification of saltwater", *J. Phys. Chem. B*, 5647, 96, 6132-6136, **1997**.
34. T. Nishimura, J. Sasaki, T. T. Htoo, "The structure of plumes generated in the unidirectional solidification process for a binary system", *Int. J. Heat Mass Tran.*, 46, 4489-4497, **2003**.
35. L. Pauchard, C. Allain, "Buckling instability induced by polymer solution drying", *Europhys. Lett.*, 62, 6, 897-903, **2003**.
۳۶. ف. میرجلیلی، س. مرادیان، ف. عامری شهراپی، "جلوه ظاهری روکش‌های خودرویی، بخش اول: مروری بر مهمترین ویژگی‌های ظاهری"، نشریه علمی ترویجی مطالعات در دنیای رنگ، ۲، ۴۰-۲۹، **۱۳۹۱**.
۳۷. ن. خلیلی، ف. عامری شهراپی، "مروری بر روش‌های کنترل جلوه ظاهری روکش‌های سطحی خودرویی"، نشریه علمی ترویجی مطالعات در دنیای رنگ، ۳، ۱۲-۳، **۱۳۹۲**.
38. S. Sakurai, C. Furukawa, A. Okutsu, "Control of mesh pattern of surface corrugation via rate of solvent evaporation in solution casting of polymer film in the presence of convection", *Polym.*, 43, 3359-3364, **2002**.
39. E. Bormashenko, R. Pogreb, O. Stanevsky, "Mesoscopic patterning in thin polymer films formed under the fast dip-coating process", *Macromol. Mater. Eng.*, 290, 114-121, **2005**.
40. E. Bormashenko, A. Malkin, A. Musin, "Mesoscopic patterning in evaporated polymer solutions: poly (ethylene glycol) and polyorganosilanes/ -siloxanes promote formation of honeycomb Structures", *Macromol. Chem. Phys.*, 209, 567-576, **2008**.
41. E. Bormashenko, S. Balter, R. Pogreb, "On the mechanism of patterning in rapidly evaporated polymer solutions: Is temperature-gradient-driven marangoni instability responsible for the large-scale patterning?", *J. Colloid Interface Sci.*, 343, 2, 602-607, **2010**.
42. P. G. De Gennes, "Instabilities during the evaporation of a film: non-glassy polymer/ volatile solvent", *Eur. Phys. J. E*, 6, 421-424, **2001**.
43. T. W. Dutton, L. R. Pate, D. K. Hollingsworth, "Imaging of surface-tension-driven convection using liquid crystal thermography", *J. Heat Transfer*, 132, 121601 (1-6), **2015**.
44. G. Toussaint, H. Bodiguel, C. Allain, "Experimental characterization of buoyancy- and surface tension-driven convection during the drying of a polymer solution", *Int. J. Heat Mass Transf.*, 51, 4228-4237, **2008**.
45. S. G. Yiantsios, S. K. Serpetsi, F. Doumenc, "Deformation and film corrugation during drying of polymer solutions induced by marangoni phenomena", *Int. J. Heat Mass Tran.*, 89, 1083-1094, **2015**.
46. B. Trouette, E. Chénier, F. Doumenc, "Transient rayleigh-bénard-marangoni solutal convection", *Phys. Fluids*, 24, 074108 (1-25), **2012**.
47. F. Doumenca, E. Chénier, B. Trouette, "Free convection in drying binary mixtures: solutal versus thermal instabilities", *Int. J. Heat Mass Tran.*, 63, 336-350, **2013**.