

## شبیه‌سازی رشد لایه‌های نازک در حضور ذرات فعال و ناخالصی

حمیدرضا امامی پور\*، محمدجواد نیک نژاد

گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

### چکیده

در این مقاله در چارچوب مدل انباشت بالستیک به شبیه‌سازی رشد لایه‌های نازک در حضور دو نوع ذره فعال (A) و ناخالصی (C) می‌پردازیم و نمای مقیاسی رشد  $\beta$  و نمای مقیاسی زبری  $\alpha$  را به دست می‌آوریم و آن‌ها را با کلاس جهانی ارائه شده توسط کاردار-پاریزی-ژانگ (KPZ) مقایسه می‌کنیم. نتایج به دست آمده وجود یک احتمال بحرانی  $P_C$  را نشان می‌دهند، به گونه‌ای که به ازای مقادیر کوچکتر از  $P_C$ ، مدل انباشت مورد نظر ما در کلاس جهانی KPZ قرار می‌گیرد، در حالی که به ازای مقادیر بزرگتر از  $P_C$  مدل مطالعه شده در این مقاله از کلاس جهانی KPZ تبعیت نمی‌کند.

**کلیدواژگان:** رشد لایه‌های نازک، انباشت بالستیک، نماهای مقیاسی، کلاس جهانی

با گذشت زمان حالت صافی خود را از دست داده و با توجه به انباشت ذرات جدید، غیریکنواخت و زبر می‌شود که این پدیده فیزیکی باید مطالعه شود و پارامترهای دخیل در این قالب رشد را مطالعه کرد. برای تشریح فرآیند رشد دو تابع معرفی می‌شوند [۱،۲،۳].  
(i) ارتفاع میانگین سطح  $\bar{h}$  به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$\bar{h}(t) \equiv \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L h(i,t) \quad 1$$

که  $h(i,t)$  ارتفاع سطح در ستون  $i$  و در زمان  $t$  است و  $L$  اندازه زیرلایه سیستم مورد بررسی است. مثلاً در یک سیستم با اندازه  $L=100$ ، جایگاه‌های  $i$  از ۱ تا ۱۰۰ خواهد بود. اگر مرتبه انباشت (شمار ذرات رسیده به مکان مناسب) ثابت باشد، یعنی تعداد اتم‌ها یا ذراتی که در واحد زمان به واحد سطح زیرلایه می‌رسد، ثابت باشد، ارتفاع به طور خطی با زمان افزایش می‌یابد [۱].

$$\bar{h}(t) \sim t \quad 2$$

(ii) پهنای سطح، که مشخص کننده ناهمواری سطح

### مقدمه

امروزه رشد لایه‌های نازک به دلیل اینکه از لحاظ پیشرفت فناوری حائز اهمیت است، موضوعی قابل توجه و یکی از مسائل مهم و شگفت‌انگیز برای شناخت رشد سطوح در مواد و درک ساختار نهایی در لایه‌های نازک و بررسی فرآیند شکل‌گیری آن برای پژوهشگران می‌باشد. برای درک پیچیدگی فرآیند رشد لایه‌های نازک رهیافت فیزیک آماری سرآغاز خوبی برای درک آن است. این رهیافت صرف‌نظر از جزئیات، بسیاری از پدیده‌ها را با چند متغیر محدود و قراردادن در کلاس‌های جهانی مشخص توصیف می‌کند.

یکی از مدل‌های رشد که با استفاده از آن توان‌های مقیاسی مورد مطالعه قرار می‌گیرد، مدل انباشت بالستیک است. مدل انباشت بالستیک دارای قاعده‌های انباشت مختلفی است که می‌توان پارامترهای مقیاسی را برای هر قاعده به طور مجزا به دست آورد و مورد تجزیه و تحلیل قرار داد. شروع رشد به این صورت است که سطح در ابتدا کاملاً یکنواخت و صاف است و رفته‌رفته

این رفتار، مقیاسی برای سیستمها و مدل‌های گوناگونی مطالعه شده و کلاس جهانی ارائه شده است. یک نظریه تقریباً موفق، تقریب  $KPZ$  است که مخفف، کاردار-پاریزی-ژانگ است، که اساس آن نظریه ادواردز-ویلکینسون ( $E-W$ ) می‌باشد. معادله  $KPZ$  یک معادله غیر خطی و یک کلاس جهانی در رشد لایه‌های نازک است [۵].

۶ 
$$\frac{\partial h(x,t)}{\partial t} = \nu \nabla^2 h + \frac{\lambda}{2} (\nabla h)^2 + \eta(x,t)$$
 هر چه نتایج به لحاظ عددی و رفتاری به این کلاس جهانی نزدیک‌تر باشد، اعتبار مدل بالاتر است. نتایج به‌دست‌آمده در این مقاله در بخش بعد ارائه می‌گردد. نتایجی که از کارهای دیگران به‌دست آمده است مثلاً در [۴]  $\beta$  بین ۰٫۲ تا ۰٫۲۵ تغییر می‌کند و در [۶] حدود ۰٫۳ به‌دست آمده است و در [۷] با توجه به مدل انباشت پس از افزایش احتمال کاهش‌یافته و مقدار آن از ۰٫۲۴ به ۰٫۱ می‌رسد و در [۸] پس از افزایش احتمال از مقدار ۰٫۶ تا ۰٫۳ کاهش می‌یابد و در [۹] برای  $\alpha$  مقدار ۰٫۳۸ به‌دست آمده و در [۱۰] برای  $\alpha$  مقدار ۰٫۴۵ به‌دست آمده و در [۱۱] برای  $\alpha$  مقدار ۰٫۳۹ به‌دست آمده است. در این موارد که اشاره شد در بعضی از موارد نتایج شبیه به نتایج به‌دست آمده در این مقاله است اما در بعضی دیگر متفاوت است که این تفاوت به‌دلیل قاعده انباشت است.

### قاعده انباشت در یک سیستم دو ذره‌ای

در این مدل، ذرات به‌صورت عمود بر سطح، بارش می‌کنند و باعث رشد لایه به لایه سطح می‌گردند. در واقع در رشد مواد واقعی باید انواع ذره گوناگون را به‌عنوان ناخالصی‌های موجود در مواد در نظر گرفت که در ساختمان انباشت شرکت دارند. بنابراین در سیستم رشد ممکن است که برهم‌کنش‌های مختلفی از ذرات

است، رفتار مقیاسی است که فمیلی و ویسک آن را دریافتند و پهنای سطح  $W(L,t)$  را به‌صورت رابطه ۳ تعریف کردند [۱،۲]:

$$W(L,t) \equiv \sqrt{\frac{1}{L} \sum_{i=1}^L [h(i,t) - \bar{h}(t)]^2} \quad ۳$$

سطح در ابتدا شبیه به یک سطح هموار است اما پس از فرآیند انباشت به‌تدریج ناهموار می‌شود. تکامل تدریجی در دو ناحیه زمانی شکل می‌گیرد که مرز بین دو ناحیه زمان  $t_x$  است.

(i) پهنای به‌وسیله‌نمایی از زمان افزایش می‌یابد:

$$W(L,t) \sim t^\beta \quad [t \ll t_x] \quad ۴$$

$\beta$  نمای رشد است که مشخصه بستگی زمانی فرآیند دینامیکی ناهمواری است.

(ii) قانون توانی اجازه نمی‌دهد که پهنای به‌طور نامحدود زیاد شود. اما تا حدی که به اشباع برسد ادامه می‌یابد.

$$W_{sat}(L) \sim L^\alpha \quad [t \gg t_x] \quad ۵$$

$\alpha$  نمای زبری (ناهمواری) است و به نمای رشد  $\beta$  ، با رابطه  $z = \frac{\alpha}{\beta}$  ربط پیدا می‌کند که  $z$  نمای دینامیکی است و این یعنی این سه نمای مقیاسی از هم مستقل نیستند.

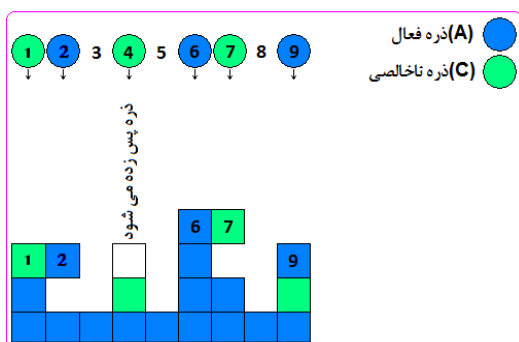
یک قانون مقیاسی هم به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$W(L,t) = L^\alpha f\left(\frac{t}{L^z}\right)$$

تابع مقیاسی  $f(x)$  برای رشد رفتاری به‌صورت زیر دارد:

$$f(x) = \begin{cases} x^\beta & x \ll 1 \\ \text{ثابت} & x \gg 1 \end{cases}$$

شکل ۱). یک حالت دیگر که ممکن است اتفاق بیفتد این است که ستون همسایه ستون انتخابی، ارتفاع بیشتری داشته باشد. اگر ستون همسایه ارتفاع بیشتری داشته باشد ذره جدید روی همان ستون انتخابی که قرار است انباشت روی آن شکل بگیرد پایین می‌آید اما در ارتفاعی برابر با ارتفاع ستون همسایه‌اش قرار می‌گیرد و دیگر نوع ذره‌ای که قبلاً روی ستون انتخابی انباشت کرده است اهمیت ندارد (ذره‌های ۲ و ۷ در شکل ۱). با دقت روی شکل ۱ متوجه می‌شویم که انباشت به چه صورتی است، مواردی که لازم به ذکر است ذرات ۲ و ۷ است که چون در میان همسایه‌ها برای ذره ۲ ستون ۱ از ستون ۳ ارتفاع بیشتری دارد به همین دلیل ذره ۲ در ارتفاعی برابر با ستون ۱ قرار می‌گیرد و برای ذره ۷ ارتفاع ستون ۶ از ستون ۸ بیشتر است و به همین دلیل ذره در ارتفاعی برابر با ستون ۶ انباشت می‌شود. در شکل ۱ نحوه انباشت ذرات نشان داده شده است.



شکل ۱. مدل انباشت بالستیک با دو نوع ذره.

نمودار ۱، رشد سطح در انباشت بالستیک را با تغییرات اندازه سیستم  $L$  از ۵۰ تا ۷۰۰، درحالی‌که  $P = P_C = 0.7$  است را نشان می‌دهد. پهنای سطح ابتدا خیلی سریع افزایش می‌یابد و پس از زمان  $t_x$  به اشباع می‌رسد. در این نمودار به وضوح قابل تشخیص است که هر چه سیستم دارای زیرلایه با اندازه بزرگتری باشد دیرتر به اشباع می‌رسد و زمان مشخصه  $t_x$  بیشتر

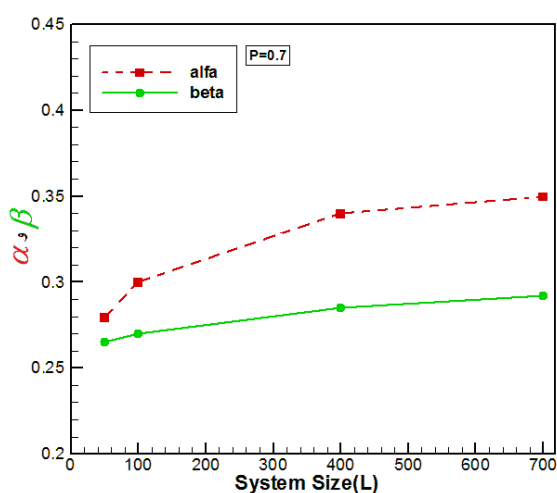
گوناگون و مکانیسم‌های رشد گوناگون وجود داشته باشند.

در این رهیافت انباشت با دو نوع ذره  $A$  و  $C$  تشریح خواهد شد. (ذره  $A$  با احتمال  $1-P$  و ذره  $C$  با احتمال  $P$ ). احتمال  $P$  به عنوان یک پارامتر پیوسته برای کنترل سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرد. رفتار مقیاسی رشد با شبیه‌سازی و حل کامپیوتری با اندازه سیستم‌های مختلف و احتمال  $P$  بررسی خواهد شد. در این شبیه‌سازی بارش برای یک‌صد و پنجاه هزار (۱۵۰۰۰۰) ذره روی زیرلایه‌های متفاوت انجام شده است.  $P_C$  که در قسمت‌های بعد به آن اشاره می‌شود احتمال بحرانی است که در آن گذار اتفاق می‌افتد یعنی مدل تحت بررسی از  $P=0$  تا  $P = P_C = 0.7$  از کلاس جهانی KPZ پیروی می‌کند و پس از آن پیروی نمی‌کند.

قاعده فرآیند انباشت به این صورت است که هر ذره به شکل کاملاً کاتوره‌ای روی یک ستون پایین می‌آید، اما اینکه دقیقاً در چه موقعیتی جای‌گزیده می‌شود بستگی به شرایطی دارد که ذکر خواهد شد.

ارتفاع آخرین ذرات جای‌گزیده در ستون همسایه و نوع ذره‌ای که بار قبل روی ستون انتخابی انباشت شده است برای جای‌گزیده شدن ذرات جدید، حائز اهمیت است. برای مثال، اگر ذره‌ای که پایین می‌افتد در امتداد ستون  $(i)$  باشد و این ستون انتخابی در میان همسایه‌هایش بیشترین ارتفاع را داشته باشد در صورتی‌که ذره جدید از نوع  $A$  باشد و با ذره  $A$  برخورد کند روی ستون  $(i)$  قرار می‌گیرد (ذره ۶ در شکل ۱) و همین‌طور اگر با ذره  $C$  مواجه شود انباشت می‌کند (ذره ۹ در شکل ۱). اما اگر ذره جدید از نوع  $C$  باشد در صورت مواجه شدن با ذره  $A$  انباشت می‌کند (ذره ۱ در شکل ۱)، اما اگر با ذره  $C$  مواجه شود بدون اینکه انباشت کند از سیستم پس زده می‌شود (ذره ۴ در

رشد تقریباً یکنواخت است اما باز با بزرگتر شدن اندازه سیستم  $L$ ، اندازه  $\beta$  اندکی متفاوت خواهد شد و آن اختلاف ناچیز هم ناشی از اندازه سیستم و بارش به صورت کاتوره‌ای در انباشت می‌باشد. که از فیزیک مسئله این انتظار می‌رود که شیب رشد افزایش یابد و سطح فلز اندکی دیرتر به اشباع برسد. این نتیجه مقیاسی برای نماهای زبری  $\alpha$  و رشد  $\beta$  با پیش‌بینی‌های کلاس جهانی KPZ که در جدول ۱ آمده مطابقت دارد.



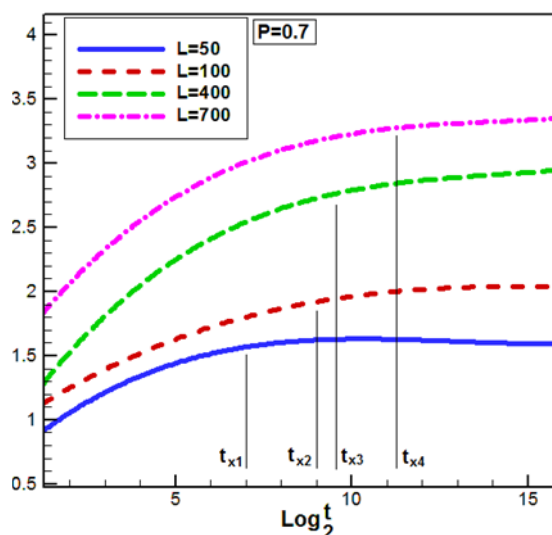
نمودار ۲. تغییرات  $\alpha$  و  $\beta$  با توجه به افزایش اندازه زیرلایه سیستم  $L$ .

معادله		$\alpha = \frac{1}{2}$
(K-P-Z)	$\frac{\partial h}{\partial t} = \nu \nabla^2 h + \lambda (\nabla h)^2 + \eta(x, t)$	و
		$\beta = \frac{1}{3}$

جدول ۱. پیش‌بینی‌های کلاس جهانی KPZ [1].

همچنین طرحی برای نمای  $\beta$  به شکل تابعی از احتمال برای چهار سیستم مذکور در بالا در نمودار ۳ نشان داده شده است و برای  $P < P_c = 0.7$  به وضوح مشخص است که  $\beta$  تقریباً با افزایش احتمال  $P$  تغییر آنچنانی نمی‌کند و سازگاری خوبی

خواهد بود به صورتی که در نمودار ۱ خواهد بود  $t_{x4} > t_{x3} > t_{x2} > t_{x1}$  است.



نمودار ۱. لگاریتم پهنای سطح،  $\log_2^W$ ، بر حسب لگاریتم

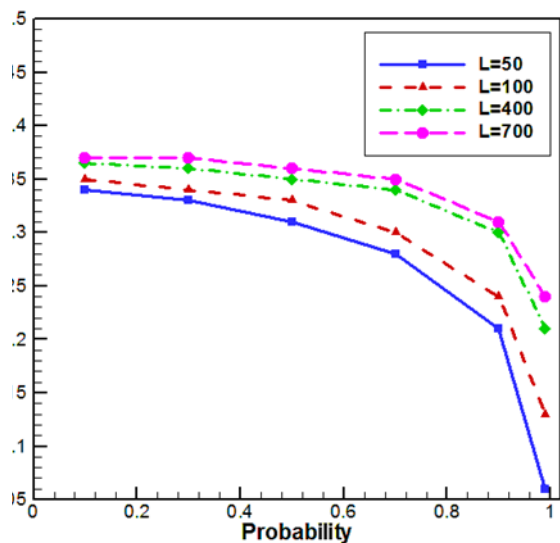
زمانی،  $\log_2^t$ ، برای سیستم‌های با اندازه زیرلایه‌های مختلف

درحالی که  $P = P_c = 0.7$

نمودار ۲ تغییرات  $\alpha$  و  $\beta$  را با تغییرات اندازه سیستم  $L$  از ۵۰ تا ۷۰۰، درحالی که  $P = P_c = 0.7$  است را نشان می‌دهد. نمودار قرمز رنگ تغییرات  $\alpha$  نشان دهنده این مطلب است که هرچه سیستم دارای زیرلایه بزرگتری باشد ساختار نهایی آن زبرتر خواهد بود و عملاً هم باید این گونه باشد، چرا که زمان مشخصه  $t_x$  بزرگتر بوده و ذرات بیشتری فرصت انباشت خواهند داشت و طبیعی است که تعداد قابل توجهی از این ذرات ناخالص بوده و در ساختار نهایی فلز تأثیر خواهد گذاشت و با توجه به مدل انباشت مورد بحث که ساختار جامد نهایی متخلخل می‌گردد با افزایش بارش تخلخل بیشتر شده و نهایتاً منجر به زبری بیشتری می‌گردد، به همین خاطر نمای زبری  $\alpha$  روندی صعودی داشته و با افزایش  $L$  بزرگتر می‌شود.

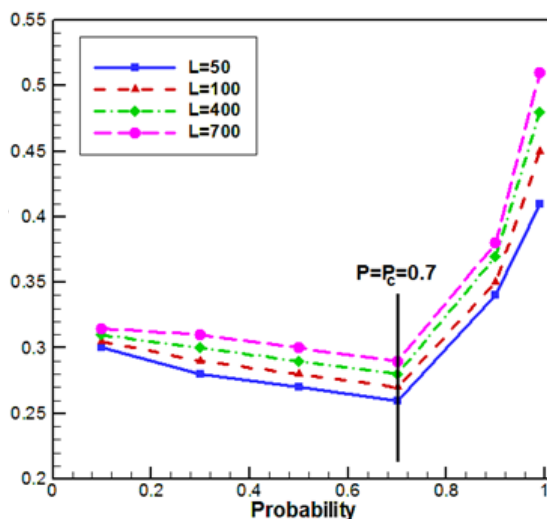
نمودار سبز رنگ تغییرات  $\beta$  نشان‌دهنده این مطلب است که در حالت  $P = P_c = 0.7$  تغییرات نمای

نمودار ۵ نمونه سطح رشد داده شده در حالت اشباع را برای  $L=700$  و  $P=0.7$  نشان می‌دهد، که در آن ارتفاع برحسب مکان سطح حاصل را نشان می‌دهد. نمودار ۶ و نمودار ۷ چگالی حضور ذرات ناخالصی (C) و فعال (A) را برحسب احتمال برای زیرلایه‌های مختلف نشان می‌دهند. هرگاه تعداد ذرات ناخالصی بیشتر و اندازه زیرلایه کمتر باشد سطح از تخلخل بیشتری برخوردار است و هرگاه تعداد ذرات ناخالصی کمتر و اندازه زیرلایه بیشتر باشد سطح دارای تخلخل کمتری است، که نمودارهای ۶ و ۷ این موضوع را به خوبی نشان می‌دهند. در اینجا چگالی برابر  $\rho = \frac{m}{hL}$  است. که در آن  $m$  تعداد ذرات بارش شده و  $L$  اندازه زیرلایه می‌باشد [۴].

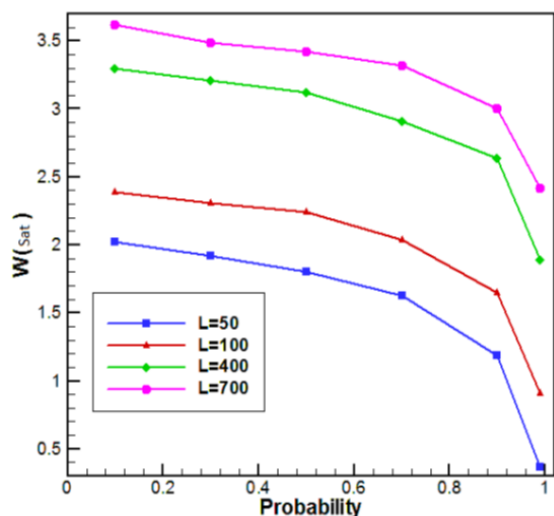


نمودار ۵. تغییرات نمای زبری  $\alpha$  برحسب احتمال برای سیستم‌های با اندازه متفاوت.

با کلاس جهانی KPZ دارد، اما به سرعت بعد از  $P_c$  تغییر می‌کند [۵]. با توجه به داده‌های شبیه‌سازی شده تغییرات نمای زبری  $\alpha$  که در نمودار ۴ آمده است این‌گونه تفسیر می‌شود که هر چه احتمال افزایش یابد یعنی احتمال حضور ذرات ناخالصی افزایش یابد آنگاه سیستم زودتر به اشباع می‌رسد و به همین دلیل زبری آن کمتر خواهد بود که در نمودار این موضوع مشخص است. البته با افزایش اندازه زیرلایه سیستم دیرتر به اشباع می‌رسد و زبری هم افزایش می‌یابد ولی برای زیرلایه‌های خاص با افزایش احتمال زبری کاهش می‌یابد. مثلاً زبری برای  $L=700$  در احتمال  $P=0.7$  بیشتر از مقدار آن با همین احتمال ولی  $L=400$  می‌باشد و به همین ترتیب برای دیگر زیرلایه‌ها همین الگو برقرار است. ولی زبری در  $L=700$  در حالت  $P=0.9$  کمتر از حالت  $P=0.7$  و در حالت  $P=0.1$  بیشترین مقدار خود را برای  $L=700$  دارد. برای دیگر زیرلایه‌ها هم به همین منوال است.

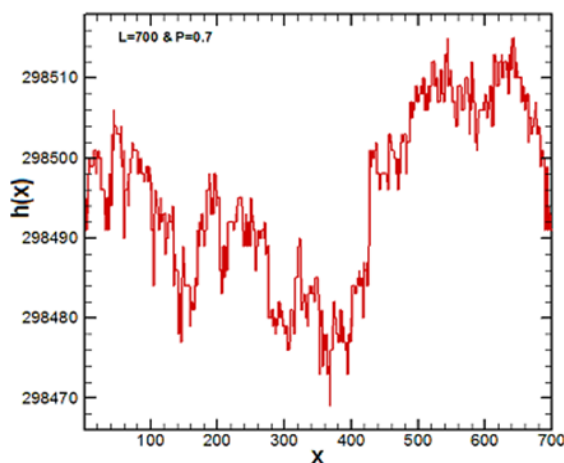


نمودار ۶. تغییرات نمای رشد  $\beta$  برحسب احتمال  $P$  برای رشد سطح در سیستم‌های با اندازه متفاوت.

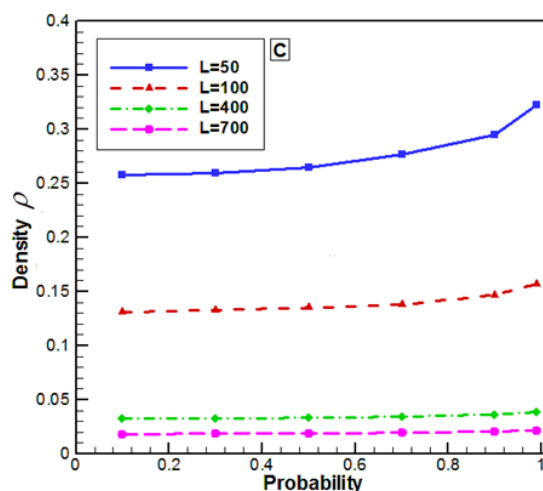


نمودار ۸. پهنای سطح اشباع برای زیرلایه‌های با اندازه‌های مختلف با افزایش احتمال.

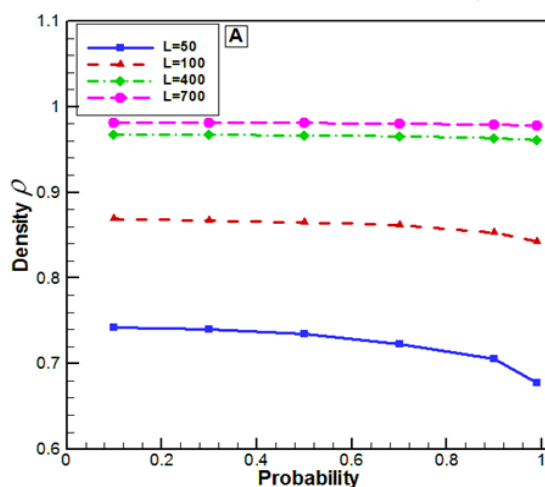
نمودار ۸ پهنای سطح اشباع را برای زیرلایه‌های با اندازه‌های مختلف با افزایش احتمال نشان می‌دهد، طبق مدل انباشت مورد بحث هر چه احتمال کمتر باشد یعنی تعداد ذرات فعال انباشت شده بیشتر باشد، سیستم دیرتر به اشباع می‌رسد چون از ذرات بارش شده برای انباشت با توجه به مدل انباشت، تعداد بیشتری انباشت کرده و جای‌گزیده می‌شوند. هرچه هم احتمال افزایش یابد یعنی احتمال حضور ذرات ناخالصی بیشتر است و سیستم زودتر به اشباع می‌رسد چون ذرات ناخالصی سطح را پس از مدت زمانی می‌پوشانند و دیگر ذرات جدید که عمدتاً آنها هم ناخالص هستند نمی‌توانند انباشت کنند چون قاعده انباشت اجازه جای‌گزیده شدن را نمی‌دهد و سیستم آنها را پس می‌زند. البته به این نکته باید توجه داشت که وقتی احتمال  $P=0.99$  است باز هم ذره فعال ممکن هست که بارش یابد اما تعدادشان بسیار کم است و در مقابل تعداد زیاد ذرات ناخالصی تأثیر چندانی نخواهد داشت و اتفاقاً همین تعداد نامساوی ذرات است که باعث زبر شدن سطح می‌گردد. در نمودار ۸ برای تمامی زیرلایه‌ها چگونگی اشباع در تمامی احتمال‌ها قابل مشاهده و تشخیص است



نمودار ۵. نمودار ارتفاع برحسب مکان پس از اشباع.



نمودار ۶. چگالی حضور ذرات ناخالصی (C) برحسب احتمال P برای سیستم‌های با اندازه مختلف.



نمودار ۷. چگالی حضور ذرات فعال (A) برحسب احتمال P برای سیستم‌های با اندازه مختلف.

### نتیجه‌گیری

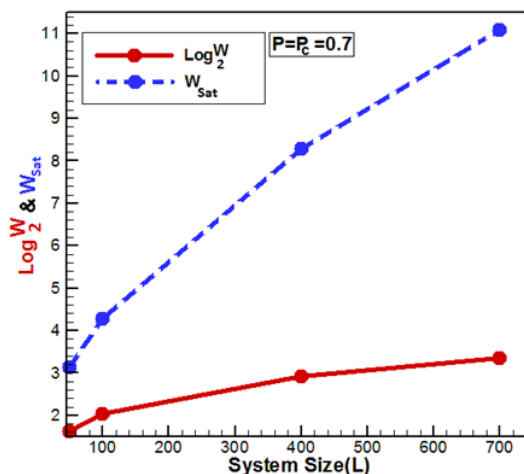
در بخش‌های قبلی مقایسه‌ها برای چهار زیرلایه با اندازه‌های زیری ۵۰، ۱۰۰، ۴۰۰ و ۷۰۰ انجام شد. توجه به نماهای مقیاسی بسیار اهمیت دارد. در شبیه‌سازی که انجام گرفته است نمای رشد  $\beta$  برای احتمال‌های گوناگون و برای زیرلایه‌های مختلف محاسبه گردید و ملاحظه شد که سازگاری خوبی با کلاس جهانی  $KPZ$  برقرار بود. این یعنی به‌راستی مدل انباشت بالستیک و  $KPZ$  تحت یک کلاس جهانی می‌باشند. هنگامی که  $P = 0$  باشد، این مدل به مدل بالستیکی که فقط یک نوع ذره در سیستم موجود است تقلیل می‌یابد. یعنی تمامی ذرات جدید که می‌خواهند بارش یابند همگی ذره فعال و از نوع  $A$  می‌باشند. از طرف دیگر برای  $P = 1$  رشد سطح پس از انباشت یک لایه از ذرات به سکون می‌رسد و انباشت ادامه نخواهد یافت. زیرا ذرات  $C$  در ابتدا سطح را کاملاً می‌پوشانند و دیگر رشد اتفاق نمی‌افتد چون ذرات جدید همگی از نوع  $C$  خواهند بود و اجازه نخواهند داشت که جای‌گزیده شوند. احتمال بحرانی که به‌دست آمد  $P = P_c = 0.7$  در مطالعات دیگری که انجام شده به‌صورت  $P = P_c = 0.5$  بوده است اما در مدلی که ما بررسی نمودیم نتیجه متفاوت از کارهای مشابه بود که این تفاوت ناشی از وجود دو نوع ذره فعال و ناخالصی و متفاوت بودن قاعده انباشت می‌باشد.

### مراجع

- [1] A.L. Barabasi, H.E Stanley, Fractal concepts in surface Growth Cambridge University press, Cambridge, (1995).
- [2] F. Family, T.Vicsek, Dynamics of Fractal Surfaces, World Scientific, Singapore, (1990).
- [3] H.F. El-Nashar, W. Wang, H.A. Cerdeira, Surface growth kinetics and morphological

که هرگاه احتمال مثلاً  $P=0.1$  باشد سیستمی که اندازه زیرلایه‌اش ۷۰۰ است دیرتر از سیستمی که اندازه زیرلایه‌اش کمتر از ۷۰۰ است، به اشباع می‌رسد ولی برای هر کدام از زیرلایه‌ها با افزایش احتمال سیستم زودتر به اشباع می‌رسد، چون ذرات ناخالصی بیشتر می‌شوند.

نمودار ۹ هنگامی که  $P = P_c = 0.7$  است پهنای سطح  $W_{sat}$  و لگاریتم پهنای سطح  $\text{Log}_2^W$  را برای زیرلایه‌های با اندازه مختلف نشان می‌دهد. این دو نمودار مؤید یکدیگر هستند، خط توپر نشان دهنده  $W_{sat}$  پهنای اشباع است و خط‌چین نشان دهنده  $\text{Log}_2^W$  است که لگاریتم همان خط آبی‌رنگ است. این نمودار نشان می‌دهد که در یک احتمال خاص،  $P = P_c = 0.7$  با افزایش اندازه زیرلایه، سیستم، دیرتر به اشباع می‌رسد.



نمودار ۹. پهنای سطح  $W_{sat}$  و لگاریتم پهنای سطح  $\text{Log}_2^W$  برای زیرلایه‌های با اندازه مختلف، هنگامی که  $P = P_c = 0.7$

structural transition in a (2+1)-dimensional deposition model, *Journal of Physics Condens. Matter* 8 (1996) 3271.

[4] H.F. El-Nashar, H.A. Cerdeira, A discrete surface growth model for two components, *Physica A* (2000) 283.

[5] M. Kardar, G. Parisi, Y.C. Zhang, Dynamic scaling of growing interfaces, *Physical Review Letters* 56 (1986) 889.

[6] A. Robledo, Ch.N. Grabill, S.M. Kuebler, A. Dutta, H. Heinrich, A. Bhattacharya, Morphologies from slippery ballistic deposition model: A bottom-up approach for nanofabrication, *Physical Review E* 83 (2011) 051604.

[7] H.F. El-Nashar, H.A. Cerdeira, Growth kinetics and morphology of a ballistic deposition model that incorporates surface diffusion for two species, *Physical Review E* 60 (1999) 1262.

[8] H.F. El-Nashar, H.A. Cerdeira, Dynamic Scaling in a ballistic deposition model for a binary system, *Physical Review E* 61 (2000) 6149.

[9] F.D.A. Aarão Reis, Universality in two-dimensional Kardar-Parisi-Zhang growth, *Physical Review E* 69 (2004) 021610.

[10] A. Christoph Haselwandter, D. Dimitri Vedensky, Scaling of ballistic deposition from a Langevin equation, *Physical Review E* 73 R (2006) 040101.

[11] F.A. Silveira, F.D.A. Aarão Reis, Surface and bulk properties of deposits grown with a bidisperse ballistic deposition model, *Physical Review E* 75 (2007) 061608.