

مطالعه تاثیر ارتعاش بر دینامیک قطرات و تخلیه آنها از داخل یک محیط متخلخل سه بعدی

اسلام عزت‌نشان^{۱*}، رضا صدرائی^۲

۱- استادیار، دانشکده فناوری‌های نوین و مهندسی هوافضا، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران، e_ezzatneshan@sbu.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فناوری‌های نوین و مهندسی هوافضا، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران، rezasadraei2@gmail.com

چکیده

در این تحقیق، اثر ارتعاش سطح بر سیال داخل محیط متخلخل در شرایط مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. در این راستا، یک الگوریتم عددی سه بعدی بر اساس روش شبکه بولتزمن و معادله آلن-کاهن توسعه داده شده و اثرات ارتعاش بصورت یک نیروی خارجی در حل عددی اعمال شده است. زمان اثرگذاری ارتعاش بر جدایش قطره، در قسمت بالا (top) و پایین (bot) محیط متخلخل، محدود اثرگذاری ارتعاش با دامنه و فرکانس بی بعد مختلف، همچنین محدوده اثرگذاری ارتعاش در زاویه تماس سطح‌های مختلف، درصد تخلیه فاز مایع از محیط متخلخل با زاویه تماس سطح ۴۵، ۹۰ و ۱۲۰ درجه با چهار دامنه بی بعد مختلف مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. این مطالعه نشان می‌دهد که با افزایش فرکانس بی بعد، محدوده اثرگذاری ارتعاش کاهش یافته و در دامنه‌های بی بعد کوچکتری جدایش قطره اتفاق می‌افتد. در فرکانس بی بعد ثابت با افزایش زاویه تماس سطح، به علت کاهش اثرات چسبندگی سطح محیط متخلخل، قطره با دامنه بی بعد کمتری جدایش و تخلیه اتفاق می‌افتد. مشاهده شده است که در دامنه بی بعد ۱۲۰ و در زاویه تماس ۱۲۰ درجه با فرکانس بی بعد ۰.۵، ۱۰۰ درصد تخلیه کامل داریم. با افزایش دامنه بی بعد زمان اثرگذاری ارتعاش کاهش پیدا می‌کند.

واژه های کلیدی: ارتعاش سطح، محیط متخلخل سه بعدی، دینامیک قطرات، روش شبکه بولتزمن، معادله آلن-کاهن

۱- مقدمه

مطالعه تاثیر ارتعاش یک محیط متخلخل بر فاز مایع داخل آن در کاربردهایی مانند فیلتر سوخت، فیلترهای روغن و سیستم‌های تراوشی در بال هواپیما و تجهیزات فضایی از اهمیت زیادی برخوردار است. اگر چه مطالعات متعددی بر روی نفوذپذیری سیال به محیط متخلخل انجام شده، اما توجه کمتری به اثرات ارتعاش سطح بر تخلیه سیال از محیط متخلخل شده است. با توجه به ارتعاشی بودن سطوح در بسیاری از کاربردهای صنعتی، بررسی تأثیرات ارتعاش در کنار سایر مشخصات مانند زاویه تماس سطح و مشخصات فیزیکی بر نفوذپذیری و تخلیه سیال از محیط متخلخل از اهمیت زیادی برخوردار است. آقای هانگ و همکاران نشان دادند که روش شبکه بولتزمن توانایی خوبی در مطالعه محیط متخلخل را به علت سادگی حل گر، توانایی در بررسی اثرات خیس شونده‌گی و توانایی بررسی نسبت چگالی زیاد در جریان‌های دو فازی دارد [۱]. آقای مجیلو و همکاران نشان دادند که نفوذپذیری محیط متخلخل با همسو کردن اصولی الیاف در امتداد جهت جریان افزایش می‌یابد [۲]. آقای تانگ و همکاران نشان دادند که افزایش چگالی باعث افزایش نفوذ قطره شده و در منافذ در راستای نیروی گرانش،

مایع نفوذ بهتری دارد [۳]. ویزنسی و همکاران نشان داده‌اند که با اعمال ارتعاش بر روی یک سطح فوق آبگریز می‌توان زمان تماس را ۶۰٪ الی ۱۶۰٪ تغییر داد که اهمیت زیادی در کنترل دینامیک قطرات روی سطوح دارد [۴]. رومان و همکاران نشان داده‌اند که فرکانس پایین ارتعاش همراه با دامنه‌های بالا منجر به جابجایی جانبی قطره می‌شود. همچنین آنها نشان دادند که زمان تماس به فرکانس ارتعاش نیز بستگی دارد و می‌تواند در فرکانس‌های بالاتر زمان تماس کاهش یابد [۵]. قطرات در معرض ارتعاش بسته به شیب سطح، فرکانس، دامنه، و جهت ارتعاش سطح، حالت‌های حرکتی متفاوتی از خود نشان می‌دهند [۶]. ارتعاش افقی به قطره کمک می‌کند تا بر موانع ناشی از ناهمگونی‌های سطح غلبه کند که منجر به حرکت لغزشی می‌شود [۷]. ارتعاش عمودی نیز باعث حرکت رو به بالای قطره می‌شود [۸]. قطرات تحت ارتعاش حتی می‌توانند به صورت جزئی یا کامل از سطح جدا شوند که در کاربردهای مرتبط با کنترل دینامیک قطرات روی سطوح کاربرد دارد [۹، ۱۰].

با وجود تحقیقات زیاد در حوزه تاثیر ارتعاش بر دینامیک قطره، بر اساس جستجوی نویسندگان مقاله حاضر، هیچ تحقیق مدونی در راستای مطالعه ارتعاش بر دینامیک قطره محبوس در یک محیط متخلخل و نحوه تخلیه یا نفوذ آن انجام نشده که در واقع نوآوری کار حاضر است. در تحقیق حاضر، تاثیر ارتعاش بر دینامیک یک قطره داخل محیط متخلخل سه بعدی در دامنه، فرکانس و زاویه تماس سطح مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. برای شبیه‌سازی این پدیده از روش شبکه بولتزمن و معادله آلن-کاهن استفاده شده و اثرات ارتعاش با استفاده از یک نیروی خارجی اعمال شده است. نتایج به دست آمده از تحقیق حاضر مورد بحث و بررسی قرار گرفته که در دانش بسیار خوبی راجع به زمان تخلیه یک قطره از محیط متخلخل ارائه می‌کند.

۱- معادلات حاکم

برای یک سیستم چندفازی دوجزئی، معادله پیوستگی به صورت زیر بیان می‌شود [۱۱]:

$$\frac{\partial \tilde{\rho}_i}{\partial t} + \nabla \cdot \tilde{\rho}_i \mathbf{u}_i = 0, \quad i = 1, 2 \quad (1)$$

که در آن، $\tilde{\rho}_i$ چگالی موضعی و \mathbf{u}_i سرعت موضعی هستند. این پارامتر با چگالی ظاهری هر جز ρ_i و سرعت متوسط سیستم \mathbf{u} مرتبط است:

$$\rho_i \mathbf{j}_i = \tilde{\rho}_i (\mathbf{u}_i - \mathbf{u}), \quad i = 1, 2 \quad (2)$$

\mathbf{j}_i نشان‌دهنده نرخ جریان حجمی در جزء i است. می‌توان با فرض عدم وابستگی بین دبی و چگالی، رابطه بین نرخ جریان حجمی بین دو جزء را $\mathbf{j}_1 = -\mathbf{j}_2 = \mathbf{j}$ در نظر گرفت. بر این اساس، غلظت سیستم چندفازی

$$e_\alpha = \begin{cases} (0,0,0) & \alpha = 0 \\ (\pm 1, 0, 0), (0, \pm 1, 0), (0, 0, \pm 1) & \alpha = 1-6 \\ (\pm 1, \pm 1, 0), (\pm 1, 0, \pm 1), (0, \pm 1, \pm 1) & \alpha = 7-18 \end{cases} \quad (11)$$

$$\omega_\alpha = \begin{cases} \frac{1}{3} & \alpha = 0 \\ \frac{1}{18} & \alpha = 1-6 \\ \frac{1}{39} & \alpha = 7-18 \end{cases} \quad (12)$$

مشخصات هیدرودینامیکی جریان چندفازی شامل فشار و سرعت بر اساس روش شبکه بولتزمن با استفاده از تابع توزیع جدید g_α بصورت معادله زیر بیان شده است:

$$g_\alpha(x + e_\alpha \delta t, t + \delta t) = g_\alpha(x, t) + \Omega_\alpha(x, t) + F_\alpha(x, t) \quad (13)$$

پارامتر Ω_α عملگر برخورد است که جهت افزایش پایداری با تکنیک زمان آرامش چندگانه بصورت رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\Omega_\alpha = -M^{-1} \hat{S} M (g_\alpha - \bar{g}_\alpha^{eq}) \quad (14)$$

در رابطه (۱۴) پارامتر M ماتریس متعامد و \hat{S} ماتریس مورب است که به صورت زیر تعریف می شود:

$$\hat{S} = (1, 1, 1, 1, S_v, S_v, S_v, S_v, 1, \dots, 1) \quad (15)$$

در رابطه (۱۵)، پارامتر S_v از رابطه زیر بدست می آید:

$$S_v = \frac{1}{\tau + 0.5} \quad (16)$$

تابع توزیع تعادلی \bar{g}_α^{eq} و نیروی F_α از روابط زیر محاسبه می شود:

$$\bar{g}_\alpha^{eq} = g_\alpha^{eq} - 0.5 F_\alpha \quad (17)$$

$$F_\alpha = \delta t \frac{\omega_\alpha e_\alpha \cdot F}{\rho c_s^2} \quad (18)$$

پارامتر g_α^{eq} به صورت زیر تعریف می شود:

$$\bar{g}_\alpha^{eq} = p^* \omega_\alpha + (\Gamma_\alpha - \omega_\alpha) \quad (19)$$

پارامتر $p^* = \frac{p}{\rho c_s^2}$ نشان دهنده فشار نرمال و F نشان دهنده نیروهای وارده است که از مجموع نیروهای تنش سطحی F_s ، حجمی F_b ، فشاری F_p و ویسکوزیته F_μ و ارتعاش F_A است:

$$F = F_s + F_b + F_p + F_\mu - F_A \quad (20)$$

که بصورت زیر محاسبه می شوند:

$$F_s = \mu_\phi \nabla \phi \quad (21)$$

$$F_b = -\rho G \quad (22)$$

$$F_p = -p^* c_s^2 \nabla \rho \quad (23)$$

$$F_\mu = \nu [\nabla u + (\nabla u)^T] \cdot \nabla \rho \quad (24)$$

$$F_A = \rho a_w \quad (25)$$

دوجزئی $C = \frac{\partial i}{\rho i}$ در موقعیت x و در زمان t بر اساس معادله زیر بدست می آید:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (uC) = -\nabla \cdot j \quad (3)$$

برای محاسبه چگالی موضعی نیز از رابطه $\rho = C\rho_1 + (1-C)\rho_2$ استفاده نمود. عبارت چشمه در رابطه (۳) بصورت رابطه زیر محاسبه می شود:

$$j = -M\nabla \cdot \left[\nabla \phi - \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \frac{1 - 4(\phi - \phi_0)^2}{\xi} \right] \quad (4)$$

که در آن، $\phi(x, t)$ تابع شاخص برای تعیین رابطه بین میدان غلظت و چگالی، M ضریب ثابت مثبت، ξ ضخامت فصل مشترک $\phi_0 = \frac{(\phi_L + \phi_H)}{2}$ است. ϕ_H و ϕ_L به ترتیب برابر ۰ و ۱ به عنوان شاخص سیالهای سبک و سنگین است. بر این اساس برای مقاردهی اولیه ϕ در فصل مشترک بین دو فاز می توان از رابطه زیر استفاده کرد:

$$\phi = \phi_0 \pm \frac{\phi_H - \phi_L}{2} \tanh\left(\frac{2(x - x_0)}{\xi}\right) \quad (5)$$

در نهایت، معادله آلن-کاهن رابطه میدان فاز را بصورت معادله (۶) بیان می کند:

$$M\nabla \cdot \left[\nabla \phi - \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \frac{1 - 4(\phi - \phi_0)^2}{\xi} \right] = \frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\phi u) \quad (6)$$

۱-۱- معادلات روش شبکه بولتزمن آلن-کاهن

شکل گسسته شده معادله آلن-کاهن بر اساس روش شبکه بولتزمن بصورت معادله زیر بیان می شود:

$$h_\alpha(x + e_\alpha \delta t, t + \delta t) = h_\alpha(x, t) - \frac{h_\alpha(x, t) - \bar{h}_\alpha^{eq}(x, t)}{\tau + 0.5} + F_\alpha^\phi(x, t) \quad (7)$$

در رابطه (۷)، پارامترهای h_α تابع توزیع، e_α سرعت ذره، τ زمان آرامش و $c_s = \frac{1}{\sqrt{3}}$ سرعت صوت در واحد شبکه است. برای به دست آوردن تابع نیروی F_α^ϕ و تابع توزیع تعادل میدان فاز \bar{h}_α^{eq} از روابط زیر استفاده می شود:

$$F_\alpha^\phi(x, t) = \partial t \frac{[1 - 4(\phi - \phi_0)^2]}{\xi} \omega_\alpha e_\alpha \cdot \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \quad (8)$$

$$\bar{h}_\alpha^{eq} = h_\alpha^{eq} - 0.5 F_\alpha^\phi \quad (9)$$

در رابطه (۹)، $h_\alpha^{eq} = \phi \Gamma_\alpha$ و پارامتر Γ_α از رابطه (۱۰) به دست می آید.

$$\Gamma_\alpha = \omega_\alpha \left[1 + \frac{e_\alpha u}{c_s^2} + \frac{(e_\alpha u)^2}{2c_s^4} - \frac{(uu)}{2c_s^2} \right] \quad (10)$$

پارامتر سرعت ذره e_α و تابع وزنی ω_α در میدان حل دوبعدی از روابط زیر قابل محاسبه است:

$$\rho \nabla = (\rho_H - \rho_L) \nabla \phi \quad (39)$$

۲-۱- اعمال ارتعاش

همان طور که در رابطه (۲۵) مشخص است، نیروی حاصل از ارتعاش سطح F_A وابسته به دو پارامتر چگالی ρ و شتاب سطح a_w است. در تحقیق حاضر، برای محاسبه شتاب سطح از یک رابطه مرتبط با ارتعاش سینوسی سطح به صورت زیر استفاده می شود [۱۳]:

$$a_w = -(2\pi f)^2 A \sin(2\pi f t + \varphi) \quad (40)$$

که در آن، φ نشان دهنده زاویه فاز، A دامنه ارتعاش سطح و f فرکانس ارتعاش است. در حل عددی حاضر، از فرم بی بعد دامنه و فرکانس بصورت روابط زیر استفاده شده است:

$$A^* = A/R \quad (41)$$

$$f^* = f/f_r \quad (42)$$

که در آن، R شعاع قطره و f_r فرکانس ارتعاش طبیعی قطره است که از رابطه (۴۳) محاسبه می شود.

$$f_r = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{2\sigma}{\rho_H R^3}} \quad (43)$$

برای بی بعدسازی زمان، حجم و طول در نتایج تحقیق حاضر نیز از رابطه (۴۴)، (۴۵) و (۴۶) استفاده شده است.

$$t^* = \frac{t}{\left(\frac{\rho R^3}{\sigma}\right)^{\frac{1}{2}}} \quad (44)$$

$$V^* = \frac{V}{V_0} \quad (45)$$

$$L^* = \frac{L \times R_0}{2} \quad (46)$$

۲- نتایج حل

در این بخش، نتایج حاصل از حل عددی حاضر برای دینامیک قطره داخل محیط متخلخل دارای ارتعاش سینوسی ارائه شده است. لازم به ذکر است که در تمامی نتایج ارائه شده، مقدار غلظت ۰.۲ به عنوان فصل مشترک بین فاز مایع و گاز در نظر گرفته شده است.

۲-۱- توصیف میدان حل

میدان حل مورد استفاده در این مطالعه در شکل های ۱ و ۲ مشاهده می شود. ابعاد میدان حل $100 \times 100 \times 260$ واحد شبکه (lu) در نظر گرفته شده که یک محیط متخلخل با ساختار منظم به ابعاد $93 \times 93 \times 49$ در میانه آن قرار گرفته است. به همین ترتیب، یک قطره به شعاع $D/2 = 23$ واحد شبکه در مرکز محیط متخلخل مقداردهی اولیه شده که نسبت چگالی و لزجت آن با گاز اطراف به ترتیب برابر ۸۱۵ و ۴۹ و عدد لاپلاس (Laplace number) $La = \sigma \rho D / \mu^2 = 91660$ در نظر گرفته شده است.

در روابط بالا، G شتاب گرانشی، ρ چگالی، a_w شتاب سطحی و $\mu \phi$ پتانسیل شیمیایی هستند. پارامترهای ρ و $\mu \phi$ به ترتیب از روابط (۲۷) و (۲۶) به دست می آیند.

$$\mu \phi = 4\beta(\phi - \phi_L)(\phi - \phi_H)(\phi - \phi_0) - \kappa \nabla^2 \phi \quad (26)$$

$$\rho = \rho_L + (\phi - \phi_L)(\rho_H - \rho_L) \quad (27)$$

پارامترهای β و κ به تنش سطحی σ و ضخامت فصل مشترک ξ وابسته هستند.

$$\kappa = \frac{\beta \xi^2}{8} \quad (28)$$

$$\sigma = \frac{\sqrt{2\kappa\beta}}{6} \quad (29)$$

زمان آرامش τ برای یک سیستم چندفازی را می توان تابعی از پارامتر ϕ تعریف کرد که بر دقت و پایداری حل عددی تأثیرگذار است. پارامتر τ را به صورت یک تابع خطی یا تابع معکوس می توان تعریف کرد که به صورت روابط زیر به دست می آید:

$$\tau = \tau_L + (\phi - \phi_L)(\tau_H - \tau_L) \quad (30)$$

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_L} + (\phi - \phi_L)\left(\frac{1}{\tau_H} - \frac{1}{\tau_L}\right) \quad (31)$$

ویسکوزیته سینماتیکی ν در رابطه (۲۴) به صورت $\nu = c_s^2 \tau \delta t$ تعریف می شود. یک روش دقیق تر برای محاسبه زمان آرامش توسط فخاری و همکاران [۱۲] ارائه شده که از روش درون یابی خطی برای محاسبه ویسکوزیته دینامیکی استفاده می کند.

$$\mu = \mu_L + (\phi - \phi_L)(\mu_H - \mu_L) \quad (32)$$

با توجه به رابطه بالا، زمان آرامش به صورت زیر بازنویسی می شود:

$$\tau = \frac{\mu}{\rho c_s^2 \delta t} \quad (33)$$

برای اعمال عملگرهای گرادیان و لاپلاس پارامتر دلخواه Q در معادلات حاکم، از روش گسسته سازی مرکزی مرتبه دوم استفاده می شود:

$$\nabla Q = \frac{c}{c_s^2 \delta x} \sum_{\alpha} e_{\alpha} \omega_{\alpha} Q(x + e_{\alpha} \delta t, t) \quad (34)$$

$$\nabla^2 Q = \frac{2c^2}{c_s^2 (\delta x)^2} \sum_{\alpha} \omega_{\alpha} [Q(x + e_{\alpha} \delta t, t) - Q(x, t)] \quad (35)$$

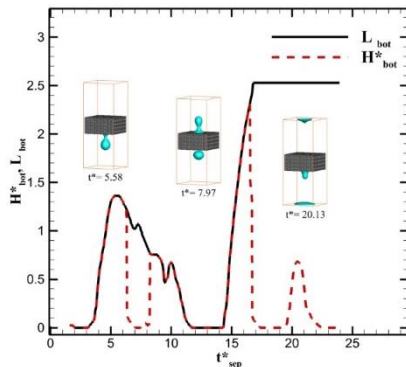
مقادیر ϕ ، فشار نرمال شده p^* و سرعت u به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\phi = \sum_{\alpha} h_{\alpha} \quad (36)$$

$$p^* = \sum_{\alpha} g_{\alpha} \quad (37)$$

$$u = \sum_{\alpha} g_{\alpha} e_{\alpha} + \frac{F}{2\rho} \delta t \quad (38)$$

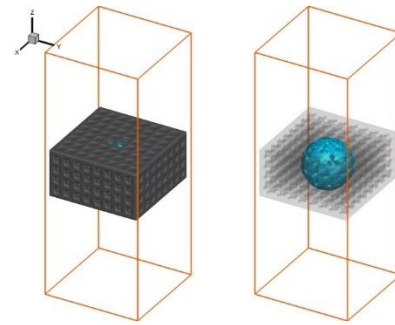
لازم به ذکر است که گرادیان چگالی $\nabla \rho$ در معادلات را می توان به صورت زیر بازنویسی کرد:



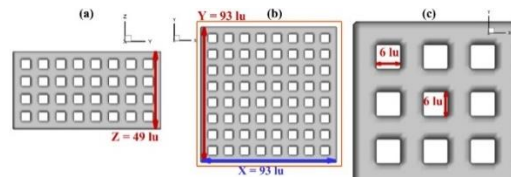
شکل ۴ - نمودار بیشترین فاصله بی‌بعد واحد شبکه دارای سیال از محیط متخلخل و بیشترین فاصله بی‌بعد واحد شبکه دارای سیال به صورت پیوسته در قسمت پایین محیط متخلخل در زمان بی‌بعد

در شکل ۵، زمان اثرگذاری ارتعاش در قسمت بالای محیط متخلخل و شکل قطره در زمان‌های بی‌بعد از چپ به راست به ترتیب ۵.۷۹، ۱۸.۹۲، ۷.۹۷ و ۳۳.۳۹ را نشان می‌دهد. از آنجا که ارتعاش فقط به محیط متخلخل اعمال می‌شود، اثرگذاری ارتعاش با کاهش فاز مایع در محیط متخلخل و تأثیر ارتعاش بر فاز مایع کاهش می‌یابد. در زاویه تماس سطح ۹۰ درجه و دامنه بی‌بعد (A^*) ۴۵، فاز مایع در قسمت پایین محیط متخلخل (bot) در زمان کمتری خارج می‌شود. همچنین، در این حالت حجم مایع بیشتری نسبت به حالت زاویه تماس سطح ۹۰ درجه و دامنه بی‌بعد ۴۰ خارج می‌شود. پس می‌توان نتیجه گرفت که در زاویه تماس سطح ۹۰ درجه و دامنه بی‌بعد ۴۵، مایع کمتری در داخل محیط متخلخل باقی می‌ماند. از این رو زمان اثرگذاری ارتعاش در قسمت بالای محیط متخلخل (top) در حالت دامنه بی‌بعد ۴۵ نسبت به حالت با دامنه بی‌بعد ۴۰ افزایش می‌یابد. با افزایش دامنه بی‌بعد، روند کاهشی در زمان اثرگذاری ارتعاش مشاهده می‌شود. برای بحث دقیق‌تر در مورد این پدیده، تغییرات زمانی نیروی ارتعاش محیط متخلخل به قطره در شکل ۶ نشان داده شده است. با توجه به این شکل، شروع سیکل دوم اعمال نیروی ارتعاش روبه بالا از زمان بی‌بعد ۴.۴۴ است. با افزایش دامنه بی‌بعد، این نیروی اعمالی افزایش یافته و تأثیر سریع‌تر در جدایش قطره دارد.

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که در زاویه تماس سطح ۱۲۰ درجه، با افزایش دامنه بی‌بعد به بالاتر از ۸۰، زمان بی‌بعد اثرگذاری ارتعاش بر قطره در محدوده $t_{VET}^* = 4$ تغییرات کمی دارد. به عبارتی، دینامیک قطره در این زاویه تماس با سیکل اول ارتعاش اعمالی از طرف محیط متخلخل رقم خورده و به دلیل تخلیه قطره از محیط متخلخل قبل از شروع سیکل دوم، زمان اثرگذاری ارتعاش مربوط به سیکل اول ارتعاش است. با افزایش دامنه بی‌بعد، نیروی ارتعاش بر تأثیرات نیروی چسبندگی سطح در سیکل اول غلبه کرده و زمان اثرگذاری کاهش محسوس می‌یابد. در تحقیق حاضر، به این دامنه بی‌بعد، دامنه بحرانی می‌گوییم. با کاهش زاویه تماس سطح به ۴۵ درجه، نیروی چسبندگی سطح افزایش یافته و افزایش این نیرو باعث می‌شود که جدایش قطره و اثرگذاری ارتعاش در سیکل اول با دامنه بی‌بعد بزرگتری اتفاق بیفتد.



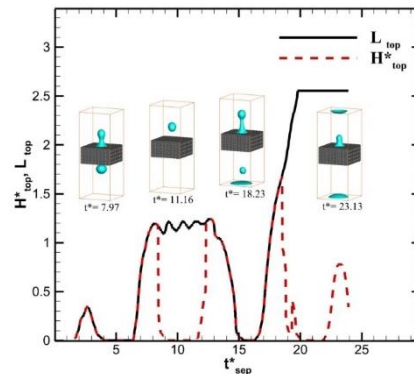
شکل ۱- نحوه قرارگیری قطره و محیط متخلخل در میدان حل



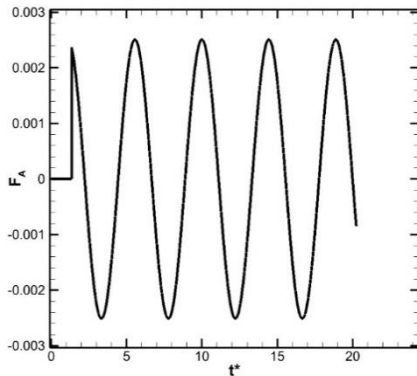
شکل ۲- ابعاد و اندازه‌های محیط متخلخل

۲-۲- زمان اثرگذاری ارتعاش

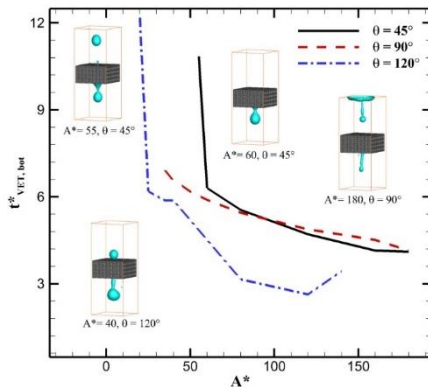
برای بررسی زمان اثرگذاری ارتعاش (vibration effect time) اولین زمان جدایش نمودار L و H^* را در نظر می‌گیریم که به ترتیب نشان‌دهنده بیشترین فاصله بی‌بعد واحد شبکه دارای فاز مایع از محیط متخلخل و بیشترین فاصله بی‌بعد واحد شبکه دارای فاز مایع به صورت پیوسته است. با توجه به نحوه قرارگیری محیط متخلخل در وسط میدان حل، این دو پارامتر برای قسمت بالای محیط متخلخل با زیرنویس top و برای قسمت پایین محیط متخلخل با زیرنویس bot مشخص شده است. در این بررسی، جدایش سیال از محیط متخلخل و فاز مایع پیوسته به آن در نظر گرفته شده است. بررسی‌ها با سه زاویه تماس سطح ۴۵، ۹۰ و ۱۲۰ درجه همچنین با فرکانس بی‌بعد ارتعاش ۰.۵، زاویه فاز ۰ درجه و دامنه بی‌بعد مختلف انجام شده است. با توجه به شکل‌های ۳ و ۴ که نشان‌دهنده L و H^* در زاویه تماس سطح، ۴۵ درجه و دامنه بی‌بعد ۶۰ است، اولین زمان اثرگذاری ارتعاش در قسمت top در زمان بی‌بعد ۸.۴۱ و اولین زمان اثرگذاری ارتعاش در قسمت bot در زمان بی‌بعد ۶.۳۰ است.



شکل ۳ - نمودار بیشترین فاصله بی‌بعد واحد شبکه دارای فاز مایع از محیط متخلخل و بیشترین فاصله بی‌بعد واحد شبکه دارای فاز مایع به صورت پیوسته در قسمت بالای محیط متخلخل بر اساس زمان بی‌بعد



شکل ۶ - نمودار تغییرات زمانی نیرو ارتعاش اعمالی بر محیط متخلخل



شکل ۷ - زمان اثرگذاری ارتعاش در قسمت پایین محیط متخلخل بر اساس دامنه بی بعد

در شکل ۸، دینامیک قطره داخل محیط متخلخل با سه زاویه تماس ۴۵، ۹۰ و ۱۲۰ درجه در فرکانس بی بعد ۰.۵ و دامنه بی بعد ۸۰ در چهار زمان مختلف نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، با تغییر زاویه تماس سطح، تفاوت حجم مایع تخلیه شده از محیط متخلخل مشهود است. با تغییر زاویه تماس سطح نحوه و میزان پخش شونده مایع در دیوار بالا و پایین نیز متفاوت پیش بینی شده است. در زاویه تماس ۴۵ درجه درصد پخش شونده مایع در دیواره ها بیشتر از حالت های دیگر است. با زاویه تماس سطح ۱۲۰ درجه، به علت آب گریز بودن دیواره ها و در اثر انرژی که مایع در حال حرکت به سمت دیواره ها دارد، قطره مجدداً در زمان بی بعد ۶.۳۸۹ از دیوار پایین جدا می شود. میزان تخلیه مایع از داخل محیط متخلخل در اثر نیروی ارتعاش با افزایش زاویه تماس سطح افزایش می یابد. همچنین با افزایش زاویه تماس سطح، نیروی کششی سطحی و نیروی ارتعاش بر چسبندگی سطح غالب شده و بر نحوه خروج قطره از داخل محیط متخلخل تأثیر می گذارد.

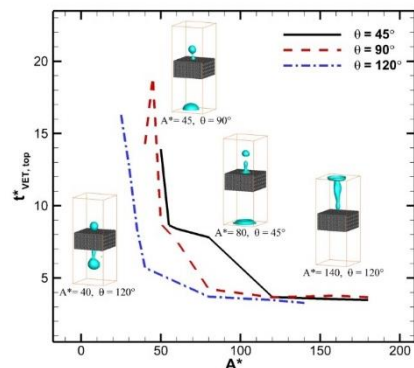
شکل ۷ زمان اثرگذاری ارتعاش در قسمت پایین محیط متخلخل و شکل فاز مایع بر اساس زمان های بی بعد از چپ به راست به ترتیب ۱۰.۷۶، ۱۸.۰۶، ۴۰.۶ و قسمت پایین به ترتیب از چپ به راست ۵.۷۹ و ۳.۳۹ را نشان می دهد. نتایج حاضر نشان می دهد که در زاویه تماس ۱۲۰ درجه، در دامنه بی بعد ۱۲۰ زمان اثرگذاری ارتعاش کمتر از دامنه بی بعد ۱۴۰ است. همان طور که قبلاً توضیح داده شد، به علت خروج سریع تر فاز مایع از قسمت بالای محیط متخلخل و کاهش حجم مایع در داخل محیط متخلخل و کاهش اثرگذار ارتعاش شاهد چنین پدیده ای هستیم.

با توجه به شکل های ۵ و ۷ مشاهده می شود که در اکثر دامنه های بی بعد مورد مطالعه، زمان اثرگذاری ارتعاش در قسمت پایین محیط متخلخل سریع تر از قسمت بالای آن است. با در نظر گرفتن الگوی نیروی ارتعاش در شکل ۶، در صورتی که دامنه بی بعد از دامنه بی بعد بحرانی کمتر باشد، ابتدا ارتعاش محیط متخلخل قطره را به سمت بالا انتقال می دهد. اما با توجه به این که فعلاً قطره از محیط متخلخل جدا نشده و به حالت پیوسته است، با کاهش نیروی ارتعاشی رو به بالا و در نهایت تغییر جهت آن به سمت پایین، در کنار تأثیر نیروی کشش سطحی و نیروی چسبندگی سطح محیط متخلخل، سبب کشیده شدن قطره با نیروی بیشتر از حالت قبل به سمت پایین محیط متخلخل می شود. به این ترتیب، سه حالت امکان دارد:

حالت اول: نیروی ایجاد شده به سمت پایین از نیروی کشش سطحی بیشتر باشد و جدایش اتفاق بیفتد. البته مقدار مایع جدا شده به نیروی چسبندگی سطح محیط متخلخل نیز مرتبط است. با افزایش زاویه تماس سطح، مقدار مایع جدا شده افزایش پیدا می کند.

حالت دوم: نیروی ایجاد شده به سمت پایین کمتر از حالت بالا باشد. در این صورت، با در نظر گرفتن رفتار سینوسی ارتعاش و نیروی اعمالی ارتعاش به سمت پایین و نیروی کشش سطحی و اینرسی فاز مایع سبب جدا شدن بخشی از قطره به سمت پایین محیط متخلخل می شود. نتایج حاضر نشان دادند که با افزایش زاویه تماس سطح، مقدار سیال جدا شده در این حالت افزایش می یابد.

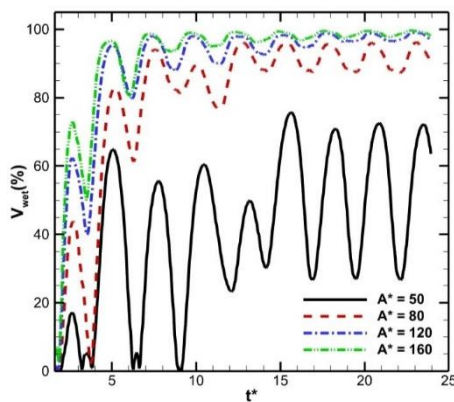
حالت سوم: اگر نیروی کمتری نسبت به حالت دوم ایجاد شود، نحوه حرکت و جهت حرکت فاز مایع با موج ارتعاشی منطبق می شود و باعث اتفاق افتادن حالت اول یا دوم در قسمت بالای محیط متخلخل می شود. این رفتار در دامنه های بی بعد کم نیز مشاهده شد. البته اگر مقدار دامنه بی بعد کم باشد، بعد از چند سیکل نوسانی شاهد این پدیده خواهیم بود.



شکل ۸ - زمان اثرگذاری ارتعاش در قسمت بالای محیط متخلخل بر اساس دامنه بی بعد

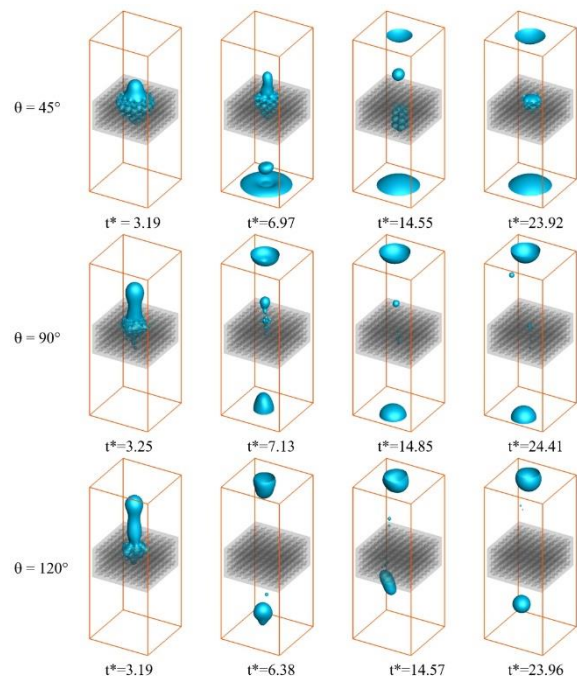
در شکل ۱۰ درصد تغییرات حجم سیال باقیمانده در محیط متخلخل با دامنه بی بعد ۵۰، ۸۰، ۱۲۰ و ۱۶۰ با فرکانس بی بعد ۰.۵ و با زاویه تماس سطح ۴۵ درجه نشان داده شده است. نتایج حاضر نشان می دهند که با افزایش دامنه بی بعد، درصد تخلیه افزایش می یابد. در زاویه تماس سطح ۴۵ درجه به علت آبدوست بودن محیط متخلخل و اثرات قابل توجه آن بر جدایش قطره، شاهد نوسانی بودن درصد تخلیه هستیم. علت این امر آن است که حجم مایع و درصد تخلیه فقط در داخل محیط متخلخل سنجیده شده است.

با توجه به شکل ۱۱ که دینامیک قطره در چهار زمان بی بعد با دامنه بی بعد ۵۰ و فرکانس بی بعد ۰.۵ را نشان داده، مشاهده می شود که بعد از خروج فاز مایع از محیط متخلخل، نیروی اعمالی توسط ارتعاش به اندازه ای نیست که باعث جدایش قطره شود. این پدیده در قسمت زمان اثرگذاری ارتعاش به صورت کامل توضیح داده شده است. بعد از خروج قطره از محیط متخلخل و عدم جدایش آن و با در نظر گرفتن اثرات نیروی های ارتعاش، کشش سطحی و نیروی چسبندگی سطح محیط متخلخل، با همسو شدن این نیروها قطره تمایل به بازگشت به داخل محیط متخلخل را از خود نشان می دهد. بعد از بازگشت به داخل محیط متخلخل حجم سیال داخل محیط متخلخل افزایش پیدا می کند به این علت درصد تخلیه کاهش می یابد و نمودار به حالت نوسانی در می آید. همین پدیده در دو طرف محیط متخلخل در قسمت بالا و قسمت پایین دیده می شود.



شکل ۱۰- درصد تخلیه مایع در دامنه های بی بعد ۵۰، ۸۰، ۱۲۰ و ۱۶۰ بر اساس زمان بی بعد برای زاویه تماس سطح ۴۵ درجه

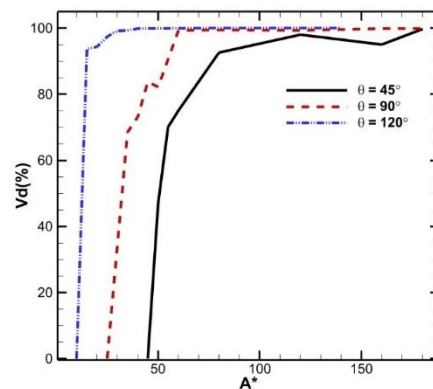
در شکل ۱۲، درصد تخلیه در زاویه تماس سطح ۹۰ درجه و فرکانس بی بعد ۰.۵ و دامنه های بی بعد ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۲۰ نشان داده شده است. در این زاویه تماس، شکل نوسانی درصد تخلیه در دامنه بی بعد ۴۰ اتفاق افتاده است که رفتاری مشابه دامنه بی بعد ۵۰ برای زاویه تماس ۴۵ درجه در شکل ۱۰ دارد. با مقایسه شکل ۱۲ و شکل ۱۰ مشاهده می شود که درصد تخلیه در زاویه تماس سطح ۹۰ درجه نسبت به زاویه تماس سطح ۴۵ درجه بیشتر است. زمان تخلیه زاویه تماس سطح ۹۰ درجه نسبت به زاویه ۴۵ درجه کمتر است. همچنین حالت نوسانی در دامنه بی بعد مشابه در زاویه تماس سطح ۹۰ درجه نسبت به حالت با زاویه تماس سطح ۴۵ کمتر است.



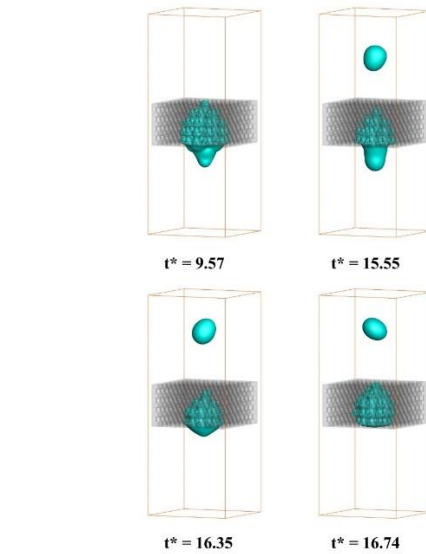
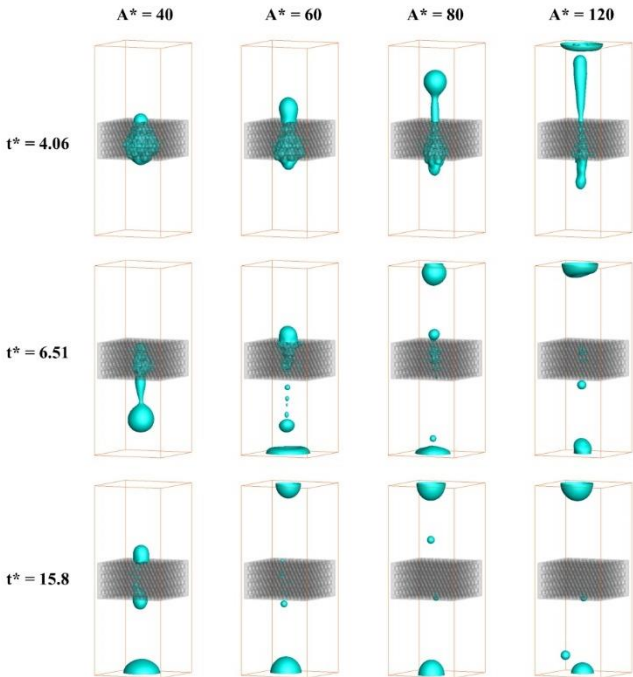
شکل ۸- دینامیک قطره داخل محیط متخلخل مرتعش در زاویه تماس سطح ۴۵، ۹۰ و ۱۲۰ درجه با فرکانس بی بعد ۰.۵ و دامنه بی بعد ۸۰ در چهار زمان مختلف

۳-۲- درصد تخلیه

در شکل ۹ درصد تخلیه مایع موجود در داخل محیط متخلخل در زمان بی بعد ۲۰ نسبت به زمان بی بعد ۱.۸۴ در سه زاویه تماس ۴۵، ۹۰ و ۱۲۰ درجه بررسی شده است که اثرات نیروی چسبندگی سطح را نشان می دهد. مشاهده می شود که با دامنه های بی بعد پایین تر از مقدار بحرانی، درصد تخلیه سیال صفر بوده و هیچ گونه جدایش قطره اتفاق نیافتاده است. با افزایش دامنه بی بعد، درصد تخلیه روند صعودی را نشان می دهد. در دامنه بی بعد ۸۰، درصد تخلیه با زاویه تماس سطح ۱۲۰ درجه ۹۹.۹ درصد، با زاویه تماس سطح ۹۰ درجه ۹۹.۴ درصد، و با زاویه تماس سطح ۴۵ درجه برابر ۹۲.۶ درصد است.

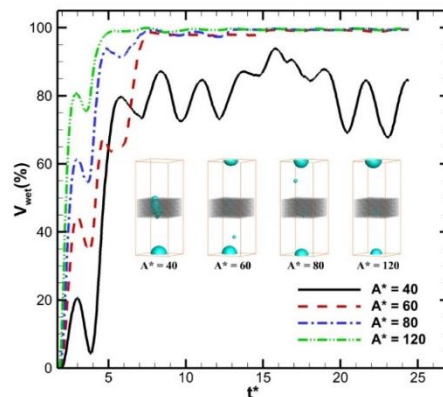


شکل ۹- درصد تخلیه مایع در زمان بی بعد ۲۰ نسبت به زمان بی بعد ۱.۸۴ بر اساس دامنه بی بعد در زاویه تماس سطح ۴۵، ۹۰ و ۱۲۰ درجه

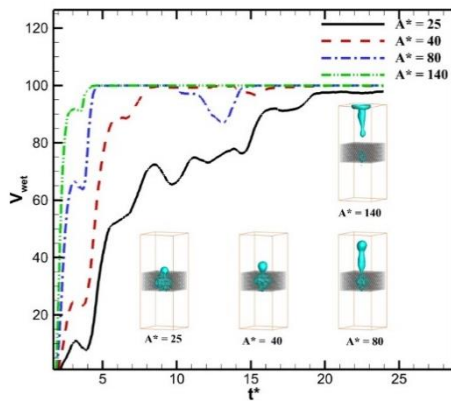


شکل ۱۱- دینامیک قطره داخل محیط متخلخل مرتعش در دامنه بی بعد ۵۰ در زمان های بی بعد ۹.۵۷، ۱۵.۵۵، ۱۶.۳۵ و ۱۶.۷۴۹

شکل ۱۳- دینامیک قطره داخل محیط متخلخل مرتعش در دامنه های بی بعد ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۲۰ در زمان های بی بعد ۴.۰۶، ۶.۵۱، ۱۵.۸۹ با زاویه تماس سطح ۹۰ درجه



شکل ۱۲- درصد تخلیه مایع در دامنه های بی بعد ۲۵، ۶۰، ۸۰ و ۱۲۰ بر اساس زمان بی بعد برای زاویه تماس سطح ۹۰ درجه

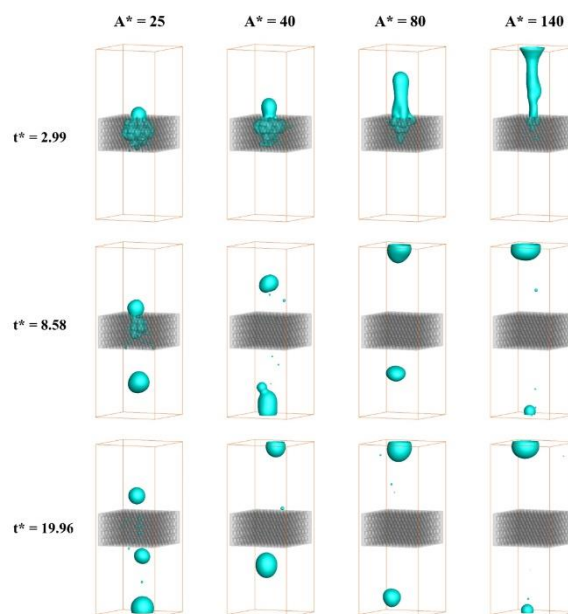


شکل ۱۴- درصد تخلیه مایع در دامنه های بی بعد ۲۵، ۴۰، ۸۰ و ۱۴۰ بر اساس زمان بی بعد برای زاویه تماس سطح ۱۲۰ درجه

در شکل ۱۳ خطوط همتراز در چهار دامنه بی بعد ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۲۰ در زمان بی بعد ۴.۰۶، ۶.۵۱ و ۱۵.۸۹ برای زاویه تماس ۹۰ درجه نشان داده شده است. با افزایش دامنه بی بعد، درصد تخلیه در زمان مشابه افزایش می یابد. همچنین همانند توضیحات داده شده در قسمت زمان اثرگذاری ارتعاش، با افزایش دامنه بی بعد حجم مایع تخلیه شده در قسمت بالای محیط متخلخل افزایش می یابد.

شکل ۱۴ درصد تخلیه در دامنه های بی بعد ۲۵، ۴۰، ۸۰ و ۱۴۰ درجه در دامنه بی بعد ۰.۵ و زاویه تماس سطح ۱۲۰ درجه را نشان می دهد. شکل سه بعدی دینامیک قطره در این شکل در زمان بی بعد ۳.۵۹ آورده شده است. درصد تخلیه سیال در زاویه ۱۲۰ درجه نسبت به زاویه تماس ۴۵ و ۹۰ درجه در یک زمان مشابه افزایش یافته است. به عبارتی، با افزایش زاویه تماس سطح، نیروی چسبندگی سطح کاهش پیدا کرده و نیروی ارتعاش در زمان کوتاهی اثر گذاشته است. در شکل ۱۵، خطوط همتراز در چهار دامنه بی بعد ۴۰، ۸۰ و ۱۴۰ نشان داده شده است. با توجه به افزایش درصد تخلیه با افزایش دامنه بی بعد، حجم سیال تخلیه شده در قسمت بالای محیط متخلخل افزایش می یابد و پدیده حالت ۱ اتفاق می افتد.

- [6] "Surface wave mechanism for directional motion of droplet on an obliquely vibrated substrate," *Physics of Fluids*, vol. 32, 2020.
- [7] R. Borcia, I. D. Borcia, and M. Bestehorn, "Can vibrations control drop motion?," *Langmuir*, vol. 30, pp. 14113-7, Dec 2 2014.
- [8] P. Brunet, J. Eggers, and R. D. Deegan, "Motion of a drop driven by substrate vibrations," *The European Physical Journal Special Topics*, vol. 166, pp. 11-14, 2009.
- [9] B. Vukasinovic, M. K. Smith, and A. R. I. Glezer, "Dynamics of a sessile drop in forced vibration," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 587, pp. 395-423, 2007.
- [10] Y. C. Jung and B. Bhushan, "Dynamic effects induced transition of droplets on biomimetic superhydrophobic surfaces," *Langmuir*, vol. 25, pp. 9208-18, Aug 18 2009.
- [11] E. Ezzatneshan, A. Asghar, and Khosroabadi, "Droplet spreading dynamics on hydrophobic textured surfaces: A lattice Boltzmann study," *Computers & Fluids*, vol. 231, 2021.
- [12] A. Fakhari, T. Mitchell, C. Leonardi, and D. Bolster, "Improved locality of the phase-field lattice-Boltzmann model for immiscible fluids at high density ratios," *Phys Rev E*, vol. 96, p. 053301, Nov 2017.
- [13] M. Moradi, M. H. Rahimian, and S. F. Chini, "Numerical simulation of droplet impact on vibrating low-adhesion surfaces," *Physics of Fluids*, vol. 32, 2020.



شکل ۱۵- دینامیک قطره داخل محیط متخلخل مرتعش در دامنه‌ها بی‌بعد
۲۵، ۴۰، ۸۰ و ۱۴۰ در زمان‌های بی‌بعد ۲.۹۹، ۸.۵۸ و ۱۹.۶۹ با زاویه تماس
سطح ۱۲۰ درجه

۳- نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر برای بررسی تاثیر ارتعاش بر یک قطره داخل محیط متخلخل نشان داد که با افزایش فرکانس بی‌بعد، محدوده اثرگذاری ارتعاش کاهش یافته و در دامنه‌های بی‌بعد کوچکتری جدایش قطره اتفاق می‌افتد. در فرکانس بی‌بعد ثابت و با افزایش زاویه تماس سطح، به علت کاهش اثرات چسبندگی سطح محیط متخلخل، جدایش و تخلیه قطره با دامنه بی‌بعد کوچکتری اتفاق می‌افتد. مشاهده شده که در دامنه بی‌بعد ۱۲۰ و در زاویه تماس ۱۲۰ درجه با فرکانس بی‌بعد ۰.۵، ۱۰۰ درصد تخلیه کامل داریم.

۴- مراجع

- [1] H. Huang, Z. Li, S. Liu, and X.-y. Lu, "Shan-and-Chen-type multiphase lattice Boltzmann study of viscous coupling effects for two-phase flow in porous media," *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, vol. 61, pp. 341-354, 2009.
- [2] D. Maggiolo, F. Picano, and M. Guarnieri, "Flow and dispersion in anisotropic porous media: A lattice-Boltzmann study," *Physics of Fluids*, vol. 28, 2016.
- [3] Y. Shi, G. H. Tang, H. F. Lin, P. X. Zhao, and L. H. Cheng, "Dynamics of droplet and liquid layer penetration in three-dimensional porous media: A lattice Boltzmann study," *Physics of Fluids*, vol. 31, 2019.
- [4] P. B. Weisensee, J. Ma, Y. H. Shin, J. Tian, Y. Chang, W. P. King, *et al.*, "Droplet impact on vibrating superhydrophobic surfaces," *Physical Review Fluids*, vol. 2, 2017.
- [5] K. A. Raman, R. K. Jaiman, Y. Sui, T. S. Lee, and H. T. Low, "Rebound suppression of a droplet impacting on an oscillating horizontal surface," *Phys Rev E*, vol. 94, p. 023108, Aug 2016.