

مکانیک تشکیل حباب هنگام ورود گاز از یک منفذ<sup>۱</sup> به درون مایعی در حال جریان  
 " راهنما برای طراحی صفحات توزیع در ستونهای تقطیر و جذب "

سورنا فخمی  
 دانشکده فنی

$$G < 17 \cdot \frac{U^5}{g^2}$$

صادق باشند، قطر حبابهای متشکله را از رابطه ی ،  
 $r_b^{10} + \left(\frac{11}{4g}\right)^2 (0.39U^2) r_b^8 = \left(\frac{11}{4g}\right)^2 \left(\frac{3G}{4\pi}\right)^4$   
 می توان محاسبه نمود .

مقدمه:

عمل انتقال جرم در واحدهای صنعتی، بر مبنای جذب و تقطیر از راه تماس دو فاز مایع و گاز، جاری در ستون، استوار می باشد. معمولاً در اینگونه واحدها جریان مایع از بالا به پایین و جریان گاز در جهت مخالف یعنی از پایین به بالا می باشد. این نحوه جریان در دو جهت مخالف باعث تماس مستقیم دو فاز جاری در ستون می گردد. معمولاً جهت ازدیاد سطح تماس، از ستونهای پر<sup>۲</sup> و یا از ستونهای سی از صفحات پخش کننده<sup>۵</sup> ستونی استفاده می شود.

ستونهای پردازای محدود دیتهای بخصوصی می باشند که کاربردشان فقط در برخی از موارد صنعتی امکان پذیر است، در صورتی که ستونهای صفحه دار، محدوده ی کاربرد بسیار وسیع تری را دارا می باشند و از اینرو در حال حاضر در غالب صنایع پالایش نفت، گاز و غیره مورد استفاده

چکیده:

در این مقاله، مکانیک تشکیل حباب هنگام ورود گاز از منافذ یک صفحه ی سوراخ سوراخ<sup>۲</sup> به درون مایع جاری در روی یک صفحه، مورد بررسی قرار گرفته است.

هدف از این مطالعات، بدست آوردن الگوهای ریاضی منطبق با نتایج تجربی برای محاسبه ی قطر حبابهای متشکله می باشد. سپس با در دست داشتن قطر حبابها، امکان محاسبه ی سطح موجود مابین فاز گاز و فاز مایع جهت انجام عمل انتقال جرم و نتیجتاً " محاسبه ی بهره دهی کار اینگونه صفحات توزیع کننده در ستونهای جذب و تقطیر امکان پذیر خواهد بود. نتایج حاصله از این تحقیقات به صورت زیر خلاصه می شوند:

۱- زمانی که شرایط گاز و مایع در رابطه ی

$$G \geq 17 \cdot \frac{U^5}{g^2}$$

صدق کنند، قطر حبابهای متشکله از رابطه ی،

$$r_b = \left(\frac{11}{4g}\right)^{1/5} \left(\frac{3G}{4\pi}\right)^{2/5}$$

بدست می آید.

۲- زمانی که شرایط جریان گاز و مایع در رابطه ی

1- Orifice

2- Multi-Orifice Plate

3- Counter-Current Flow

4- Packed Columns

5- Plate Columns

می‌باشند.

نوع صفحات توزیع کننده<sup>۱</sup> که در اینگونه واحدها جهت ازدیاد زمان تماس<sup>۲</sup> و حوزه‌ی تماس<sup>۳</sup> آبکار می‌روند متفاوت اند. که به عنوان مثال می‌توان از صفحات کلاهدک دار، صفحات یونیفلکس، صفحات بنچوری و صفحات سوراخ سوراخ نام برد. بهترین نوع این صفحات توزیع کننده، صفحات سوراخ سوراخ می‌باشند که از لحاظ ساختمان مکانیکی، تعمیرات، نگهداری و قیمت ساخت مقرون به صرفه می‌باشند. ولی به دلیل نبودن زمینه‌های نظری و فقدان تحقیقات کافی در مورد مکانیک جریان گاز و مایع در روی اینگونه صفحات، طرح کلی آنها از طریق یک الگوی ریاضی میسر نبوده و کاربرد آنها در واحدهای صنعتی بیشتر بر پایه‌ی تجربیات استوار می‌باشد.

شکل (۱) چگونگی تماس گاز و مایع را در روی یک صفحه‌ی سوراخ سوراخ نشان می‌دهد. مایع در جهت  $x$  با سرعت  $U_0$  در روی صفحه جاری می‌باشد و فاز گاز در جهت  $y$  با سرعت  $U_1$ ، از زیر صفحه به درون منافذ آن دمیده می‌شود. جریان مداوم گاز از منافذ، از سطح بالائی آنها به صورت حبابهای پی در پی به درون مایع توزیع می‌گردد. گرچه عبور گاز از منافذ به صورت مداوم می‌باشد ولی چگونگی خروج آن به صورت حبابهایی خواهد بود که متناوباً در روی هر منفذ تشکیل و پس از پیدا کردن حجم کافی از آن جدا گردیده و با سرعت معینی در مایع صعود خواهند کرد.

حجم و تواتر<sup>۴</sup> تشکیل حبابها، تابعی از دبی جریان گاز به درون هر منفذ (G)، قطر منفذ ( $d_0$ )، سرعت جریان مایع  $U_L$  و خواص فیزیکی مایع و گاز از قبیل چگالی و چسبناکی (لزجت) و غیره خواهد بود. چگونگی توزیع گاز به صورت حبابهای کوچک به درون مایع عامل بوجود آورنده‌ی حوزه‌ی تماس لازم جهت تبادل جرم بین دو فاز مایع و گاز می‌باشد و کمیت این حوزه‌ی تماس، همراه با زمان تماس نماینده‌ی کیفیت و کمیت انجام کار در روی هر سینی می‌باشد بنابراین جهت کاربرد موثر اینگونه صفحات توزیع کننده، طرح صحیح صفحه از نقطه‌ی نظر قطر منافذ ( $d_0$ )، فواصل منافذ (S) از یکدیگر، شدت جریان گاز و سرعت مایع جاری در روی صفحه حائز اهمیت فوق العاده می‌باشد. زیرا اگر شدت جریان گاز

زیاده از حد باشد و منافذ کوچک باشند گاز هنگام خروج از منافذ، در عوض تشکیل حبابهای کوچک و پی در پی، به صورت یک جریان پیوسته<sup>۵</sup> وارد مایع خواهد گردید و از طرف دیگر کمی شدت جریان گاز و بزرگ بودن قطر منافذ موجب تشکیل نامنظم حبابها همراه با پائین ریختن و چکه کردن<sup>۶</sup> مایع از منافذ صفحه<sup>۷</sup> توزیع کننده خواهد گردید. در هر یک از شرایط فوق الذکر، عمل انتقال جرم در روی صفحه به نحوی مختل می‌گردد و منجر به پائین آمدن کارایی صفحه‌ی توزیع کننده<sup>۷</sup> خواهد شد. علاوه بر این در طرح مکانیکی صفحه‌ی توزیع کننده، انتخاب قطر مناسب برای منافذ از نظر نظم تشکیل حبابها و چکه کردن و انتخاب صحیح فواصل منافذ<sup>۸</sup> از یکدیگر جهت جلوگیری از بهم چسبیدن حبابهای متشکله<sup>۹</sup> مهم می‌باشد. زیرا چکه کردن و یا بهم چسبیدن حبابها نیز خود موجب تقلیل بازدهی عمل انتقال جرم بین دو فاز مایع و گاز جاری در روی صفحه‌ی توزیع کننده می‌گردد.

از اینرو جهت طرح صحیح این صفحات باید نکات زیر مورد توجه قرار گیرند.

- ۱- تعیین قطر حبابهای گاز که به طور پیوسته از هر منفذ به درون مایع جاری بر روی صفحه، دمیده می‌شود.
- ۲- زمان توقف حبابهای گاز درون مایع جاری در روی صفحه، که خود به ارتفاع مایع در روی صفحه و حجم حبابهای متشکله بستگی دارد.
- ۳- جلوگیری از اتلاف حبابهای تشکیل شده.
- ۴- تعیین محدوده‌ی قابل قبول برای قطر منافذ جهت جلوگیری از چکه کردن و تشکیل مداوم حبابها.
- سپس از الگوهای ریاضی بدست آمده می‌توان طرح مکانیکی مناسبی برای کاربرد موثر صفحات توزیع سوراخ سوراخ در واحدهای صنعتی جذب، تقطیر و غیره ارائه نمود.
- درباره‌ی نکات ذکر شده، با اهمیت ترین آنها تعیین قطر حبابهای گاز می‌باشد و با در دست داشتن این کمیت نکات ۲ و ۳ به آسانی قابل حل بوده و در مورد نکته‌ی ۴، در مقاله‌ی بعدی یک الگوی ابتدایی به انضمام برخی دیگر از نکات مربوطه، عرضه خواهد گردید.

1- Distributor-Plates

2- Contact Time

3- Interfacial area

4- Frequency

5- Continuous jet

6- Weeping

7- Plate efficiency

8- Orifice-Spacing

9- Bubble Coalescence

قرار داده و یک الگوی نظری پیچیده جهت محاسبه‌ی حجم حبابهای متشکله عرضه کرده اند، ولی نتایج حاصل از الگوی نظری اینان با فیزیک و شرایط مرزی<sup>۵</sup> دستگاه مغایرت داشته و ارزش کاربرد این الگو جهت طرح صنعتی اینگونه دستگاهها مورد سؤال می باشد، بدین نحو که نتایج حاصل از الگوی ریاضی آنها نشان دهنده این امر است که با ازدیاد  $u_L$  حجم حبابهای متشکله برای شدت جریان ثابت گاز، بزرگتر خواهد بود. در صورتیکه این نتیجه گیری مستقیماً " مغایر با فیزیک دستگاه بوده و قدر مسلم با ازدیاد  $u_L$  حبابها در روی منفذ وقت کمتری جهت رشد و تکامل دارند. از اینرو این مسأله در این تحقیقات مجدداً " مورد مطالعه قرار گرفته و نتایج حاصل از الگوی ریاضی بدست آمده با شرایط فیزیکی دستگاه مطابقت داشته و توسط نتایج تجربی نیز تأیید شده است.

(II) زمینه نظری و مدل ریاضی:

هنگامی که جریان مداوم گازی از درون یک منفذ به صورت حبابهای پی در پی به درون مایع جاری در بالای منفذ توزیع می گردد، بازده عمل انتقال جرم بین دو فاز مایع و گاز تابعی از سطح حبابهای متشکله و زمان اقامت آنها درون فاز مایع می باشد. زمان اقامت هر حباب درون فاز مایع وابسته به ارتفاع مایع در روی منفذ ( $h_L$ ) و سرعت صعود حباب ( $u_b$ ) در فاز مایع بوده، که این خود تابعی از حجم حباب ( $y_b$ )، شتاب ثقل زمین و مشخصات فیزیکی مایع و گاز می باشد. بنابراین تعیین حجم حبابهای متشکله از منفذ وابستگی این حجم به شدت جریان گاز ( $G$ )، سرعت جریان مایع ( $u_L$ ) و سایر متغیرهای دستگاه هدف اصلی این تحقیقات را تشکیل می دهد. در شکل (۲) مطابق با مشاهدات تجربی و سلسله مراتب تشکیل حباب هنگام ورود گاز از یک منفذ به درون مایع در حال جریان در بالای منفذ نشان داده شده و اکنون با مراجعه به شکل (۲) مفروضات زیر را جهت حل مسأله می توان ذکر کرد:

(الف): تشکیل حباب گاز در یک مایع غیر لزج با شدت جریان ثابت گاز مد نظر است، زیرا در غالب کاربردهای عملی اینگونه صفحات در واحدهای بزرگ جذب و تقطیر این فرض صائب بوده و قابل قبول می باشد.

تعیین قطر حبابهای گاز که به طور مداوم از هر منفذ به درون مایع جاری در روی صفحه دمیده می شوند.

معرفی زمینه ی تجربی و نظری موجود:

هنگامی که جریان مداوم گاز از درون یک منفذ به صورت حبابهای پی در پی به داخل مایع ساکن در بالای منفذ توزیع می گردد، (۱) دیویدسون و شولر<sup>۱</sup> برای دو حالت، جریان ثابت گاز به درون منفذ و فشار ثابت گاز در زیر منفذ، مکانیسم تشکیل حبابهای گاز از منفذ به درون مایعات لزوج ( $11.10 \text{ c.p.} > \mu > 500 \text{ c.p.}$ ) و مایعات غیر لزوج ( $0.99 \text{ c.p.} \leq \mu \leq 11.10 \text{ c.p.}$ ) را بتفصیل مورد بررسی قرار داده و در هر رژیم، توسط یک الگوی نظری حجم حبابهای متشکله را به صورت تابعی از شدت جریان گاز، مشخصات فیزیکی گاز و مایع و شتاب ثقل زمین توصیف کرده اند که مورد تأیید و منطبق با نتایج وسیع تجربی آنان می باشد. در مورد تشکیل حباب هنگام ورود گاز از یک منفذ به درون مایعات ساکن غیر لزج<sup>۲</sup>، نتایج تحقیقات نامبردگان حاکی از اینستکه مکانیسم تشکیل حباب برای دو نحوه ی مختلف دمیدن گاز به درون منفذ کم و بیش با یکدیگر منطبق بوده و تفاوت فاحشی ندارند، نظریه یی که توسط این افراد پیشنهاد شده، بر مبنای حرکت عمودی مرکز حبابی که در حال تشکیل شدن تحت تاثیر نیروهای مختلفی غوطه وری<sup>۳</sup> و ماند مایع اطراف حباب قرار دارد، بنا شده که شعاع و حجم حبابهای متشکله از منفذ به درون مایعات غیر لزج را به صورت

$$r_b = \left(\frac{11}{4g}\right)^{1/5} \left(\frac{3G}{4\pi}\right)^{2/5} \quad (1) \quad \text{و}$$

$$v_b = 1.378 \frac{G^{6/5}}{g^{3/5}} \quad (2) \quad \text{و}$$

بدست داده که توسط نتایج تجربی در محدوده وسیعی از شدت جریان گاز ( $G$ ) تأیید گردیده.

برای حالتی که مایع در روی منفذ با سرعت  $u_L$  در جهت افقی جاری می باشد، (۲) سالیوان<sup>۴</sup> و همکاران مکانیسم تشکیل حباب گاز از منفذ به درون مایع جاری را مورد بررسی

1- Davidson, J, F, & Schuler

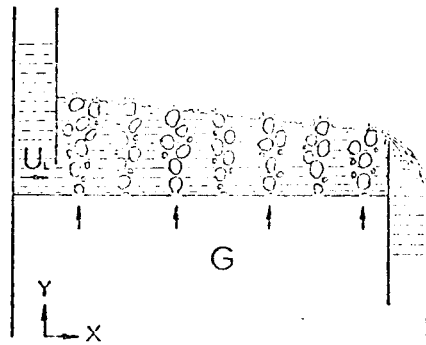
2- Inviscid Liquids

3- Bouyancy

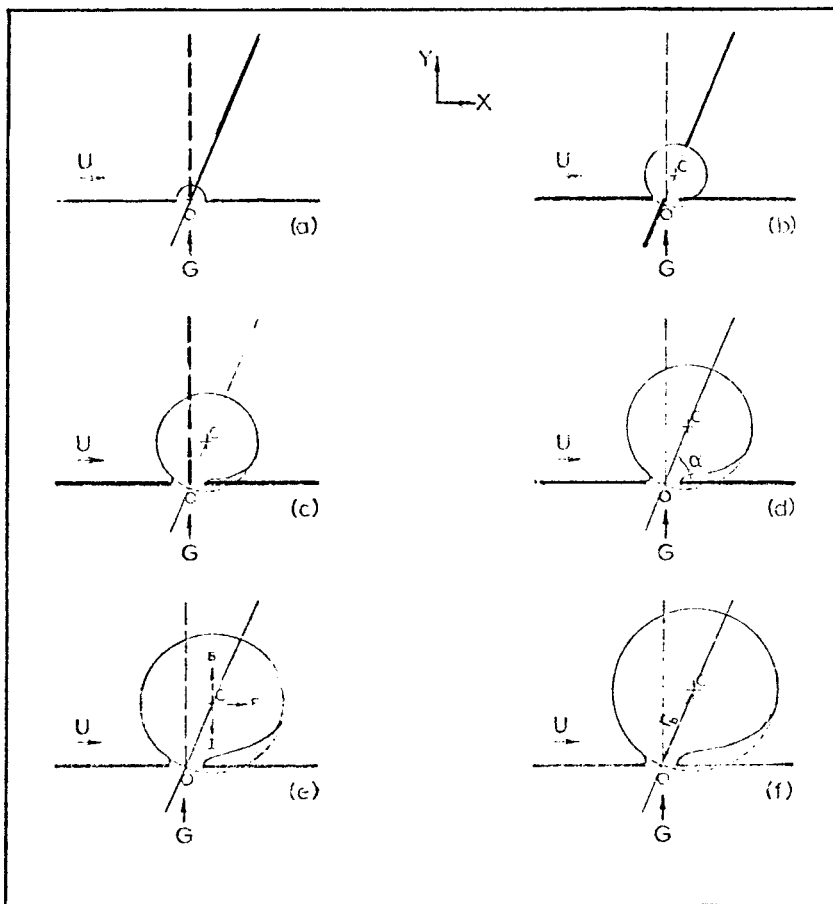
4- Sullivan Etal

5- Boundary Conditions

6- Inviscid



شکل (۱)



شکل (۲)

نیروهای وارده بر حباب را در هر لحظه متعادل کرده و مکانیسم تشکیل حباب را مورد بررسی قرار داد .

(II<sub>A</sub>): تعادل نیروهای وارده بر حباب در جهت Y:

با توجه به شکل (۲) می توان در هر لحظه حباب را در حال تعادل فرض کرده و نیروی ارشمیدس (B) را برابر با شدت تغییرات مقدار حرکت<sup>۷</sup> مایع پیرامون حباب در جهت عمودی قرار داد . اگر جرم مایع برابر P<sub>L</sub>، شدت جریان دمیدن گاز G، زمان دمیدن گاز t، حجم حباب در هر لحظه V<sub>b</sub> و سرعت انتقال مرکز جرم حباب در جهت عمودی برابر  $\frac{dy}{dt}$  باشد با توجه به شکل (۳) از تعادل نیروهای وارده بر حباب در جهت Y خواهیم داشت:

$$P_L V_b g = \frac{d}{dt} \left( \frac{11}{16} P_L \cdot V_b \cdot \frac{dy}{dt} \right) \quad (3)$$

شدت تغییرات مقدار حرکت مایع در اطراف حباب در جهت Y مساوی نیروی ارشمیدس در جهت Y، کمیت  $(\frac{11}{16} P_L V_b)$  برابر جرم مجازی حباب می باشد که نحوه ی محاسبه آن در (۳) ذکر گردیده است .

از طرف دیگر در شرایط شدت جریان ثابت دمیدن گاز، می توان حجم حباب در حال تشکیل را در هر لحظه به صورت

$$V_b = Gt = \frac{4}{3} \pi r_b^3 \quad (4)$$

بیان کرد . پس با قرار دادن کمیت V<sub>b</sub> از معادله ی (۴) در معادله ی (۳) خواهیم داشت:

$$P_L \cdot Gt \cdot g = \frac{d}{dt} \left( \frac{11}{16} P_L \cdot Gt \cdot \frac{dy}{dt} \right)$$

که با فرض ثابت بودن P<sub>L</sub> و G به صورت ساده ی زیر درخواهد آمد:

$$g t = \frac{d}{dt} \left( \frac{11}{16} \cdot t \cdot \frac{dy}{dt} \right) \quad (5)$$

رابطه ی (۵) یک معادله ی دیفرانسیل درجه ی دوم می باشد که حرکت مرکز جرم حباب را در جهت Y برحسب زمان تعیین می کند و شرایط مرزی صادق در معادله ی (۵) با توجه به شکل (۲) و فیزیک مسأله به قرار زیر است:

$$\frac{dy}{dt} = 0 \quad , \quad t = 0 \quad \text{در لحظه}$$

(ب): حباب در تمام مراحل تشکیل خود کروی بوده و از اثرات دیواره ی مجاور مصون است .

(ج): حباب تحت تاثیر نیروی ارشمیدس (B) مایل به حرکت صعودی در جهت (Y) بوده و در حالی که نیروی ماند (I) از مایع اطراف حباب در جهت مخالف نیروی (B) بر روی حباب عمل می کند . زمانی که نیروی ارشمیدس در اثر رشد نهایی حباب، برابر نیروی ماندو یا بزرگتر از آن گردد حباب از سطح منفذ جدا گردیده و به صورت یک حباب مجزا<sup>۱</sup> در داخل مایع صعود خواهد کرد .

(د): حرکت مایع پیرامون حباب در حال تشکیل شدن، بدون چرخش<sup>۲</sup> و جدا نشده<sup>۳</sup> فرض می شود . در این شرایط ماند موثر مایع بر روی حباب، در هر لحظه به صورت  $(\frac{11}{16} \cdot P_L \cdot V_b)$  توسط (۳) میلند تا میسون<sup>۴</sup> داده می شود . (ه): در حین رشد حباب، امتدادی که مرکز جرم حباب (C) را به مرکز منفذ (O) متصل می کند تحت تاثیر نیروی جنبشی مایع در جهت x از حالت عمودی خارج و با محور x زاویه ی بی برابر α که کوچکتر از (π/2) است می سازد . زاویه ی α در طی مراحل مختلف تشکیل حباب، متغیر و تابعی از سرعت جریان مایع و سطح موثر حباب<sup>۵</sup> در هر لحظه می باشد . ولی جهت ساده کردن مسأله، مسیری که توسط مرکز جرم حباب از بدو تشکیل تا لحظه ی جدا شدن طی می شود به صورت خط OC با زاویه ثابت α فرض گردیده است . این فرض فقط در مواردی صادق است که سرعت جریان مایع کم و زمان تشکیل حباب کوتاه باشد . و چون شرایط کار در روی غالب صفحات سوراخ سوراخ مورد استفاده در واحدهای صنعتی، پیرو این محدودیت ها می باشد، از اینرو فرض ثابت بودن زاویه ی α از نقطه ی نظر الگوسازی در این تحقیقات مورد قبول می باشد .

(و): در مراحل مختلف تشکیل حباب از موجودیت نیروی کشش سطحی<sup>۶</sup> مایع در مقایسه با سایر نیروهای موجود صرف نظر گردیده و لحظه ی جدا شدن حباب از منفذ زمانی است که پیرامون تحتانی حباب به مرکز منفذ (O) برسد، یعنی فاصله ی OC برابر شعاع حباب گردد . حال با توجه به شکل (۲) و فرضیات بالا می توان

- |                    |                          |                    |
|--------------------|--------------------------|--------------------|
| 1- Discrete bubble | 2- Irrotational          | 3- Unseparated     |
| 4- Mlilen-Thompson | 5- Bubble Projected area | 6- Surface Tension |
| 7- Momentum        |                          |                    |

(II<sub>B</sub>) تعادل نیروهای وارده بر حباب در جهت x با مراجعه به شکل (۳) و توجه به فیزیک مسأله، در مراحل تشکیل و رشد حباب، تحت تاثیر فشار کششی<sup>۲</sup> مایع، حرکت مرکز جرم حباب در جهت x حاصل می‌گردد و شدت تغییرات مقدار حرکت<sup>۳</sup> مایع اطراف حباب (در نیمکره‌ی محیط پستی آن یعنی در قسمتی که باید به مایع اطرافش فشار بیاورد) در جهت افقی در هر لحظه برابر با فشار حاصل از نیروی جنبشی مایع بر سطح موثر حباب در جهت جریان مایع می‌باشد. بنابراین مطابق شکل (۴) و فرض (ه) تعادل نیروهای وارده بر حباب در جهت x را به صورت

$$\left(\frac{1}{2} \rho_L \cdot U_L^2\right) \cdot A_b = \frac{d}{dt} \left(\frac{11}{32} \rho_L \cdot v_b \cdot \frac{dx}{dt}\right) \quad (10)$$

می‌توان نوشت. در حالی که A<sub>b</sub>، سطح دایره‌ی عظیمه‌ی کره‌ی بشعاع x<sub>b</sub>، که همان سطح موثر حباب است به صورت

$$A_b = \pi x_b^2 \quad (11)$$

و حجم حباب در هر لحظه به صورت

$$V_b = Gt = \frac{4}{3} \pi x_b^3 \quad (4)$$

بیان شده‌اند. از ترکیب معادلات (۴)، (۱۱) و (۱۰) می‌توان شکل نهایی تعادل نیروهای وارد بر حباب در جهت x را به صورت زیر نوشت:

$$\left(\frac{3}{8}\right) U_L^2 \cdot \left(\frac{4\pi}{3G}\right)^{1/3} \cdot t^{2/3} = \frac{d}{dt} \left(\frac{11}{32} t \cdot \frac{dx}{dt}\right) \quad (12)$$

حال رابطه‌ی (۱۲) یک معادله‌ی دیفرانسیل درجه‌ی دوم می‌باشد که حرکت جرم حباب را در جهت x بر حسب زمان بیان می‌کند.

شرایط مرزی صادق در معادله‌ی (۱۲) را با توجه به شکل (۲) و فیزیک مسأله به صورت زیر می‌توان بیان کرد:

$$\frac{dx}{dt} = 0 \quad t = 0 \quad \text{در لحظه‌ی}$$

$$x = 0 \quad t = 0 \quad \text{و هم چنین برای}$$

حل معادله دیفرانسیل درجه‌ی دوم (۱۲) را با در نظر گرفتن شرایط مرزی فوق به صورت زیر می‌توان بیان کرد.

$$x = \left(0.39 U_L^2\right) \left(\frac{4\pi}{3G}\right)^{1/3} \cdot t^{5/3} \quad (13)$$

و همچنین برای t = 0 ، y = 0 حل معادله‌ی دیفرانسیل درجه‌ی دوم (۵) را با در نظر گرفتن شرایط مرزی ذکر شده به صورت زیر می‌توان نوشت:

$$y = \frac{4}{11} g t^2 \quad (6)$$

حال با توجه به شکل (۲-f) و فرض (ه) می‌توان نوشت، در زمانی که y = r<sub>b</sub> . sin α باشد حباب متشکله از منفذ جدا گردیده و به صورت یک حباب مجزا در مایع صعود خواهد کرد. بنابراین طبق معادله‌ی (۶) و فرض (ه) در لحظه‌ی جدا شدن، شعاع حباب متشکله از منفذ را به صورت

$$r_b = \left(\frac{4}{11}\right) \left(\frac{g t^2}{\sin \alpha}\right) \quad (7)$$

می‌توان نوشت. از طرف دیگر معادله‌ی (۴) رابطه‌ی بین

r<sub>b</sub> و t را به صورت

$$t = \left(\frac{4}{3G}\right) \cdot r_b^3 \quad (8)$$

بیان می‌نماید. با قرار دادن کمیت t از معادله‌ی (۸) در معادله‌ی (۷) پس از ساده کردن خواهیم داشت.

$$r_b = \left(\frac{11}{4g}\right)^{1/5} \left(\frac{3G}{4\pi}\right)^{2/5} \cdot (\sin \alpha)^{1/5} \quad (9)$$

رابطه‌ی (۹) قطر حباب را در لحظه‌ی جدا شدن حباب از منفذ بر حسب شدت جریان گاز (G)، شتاب ثقل زمین (g) و تابعی از زاویه‌ی α بیان می‌کند. حال اگر  $\alpha = \frac{1}{2} \pi$  رابطه‌ی (۹) معادل رابطه‌ی (۱) خواهد گردید بدین معنی که مکانیسم تشکیل حباب هنگام ورود گاز از یک منفذ به درون مایعات در حال جریان و ساکن مشابه خواهند بود، ولی جریان مایع در جهت افقی موجب انحراف مسیر مرکز جرم حباب از امتداد عمودی می‌گردد و نتیجتاً زاویه‌ی α کوچکتر از  $\left(\frac{1}{2} \pi\right)$  خواهد شد. بنابراین از مقایسه‌ی رابطه‌های (۱) و (۹) مشهود است که در شرایط یکسان (از نظر شدت جریان گاز، ارتفاع مایع در بالای منفذ و غیره) حجم حبابهای متشکله هنگام ورود گاز از یک منفذ به درون مایع جاری کوچکتر از حجم حبابهای متشکله هنگام ورود گاز از همان منفذ به درون مایع ساکن خواهد بود و این تقلیل حجم تابعی از (sin α) است که خود وابسته به سرعت جریان مایع در جهت x و سطح موثر حباب<sup>۱</sup> در مراحل مختلف تشکیل می‌باشد. که باید از روی تعادل نیروهای وارده بر حباب در جهت افقی محاسبه گردد.

1- Projected bubble area

2- Pressure-drag

3- Momentum



معادلات (۹) و (۱۵) را به ترتیب بصورت:

$$r_b^5 = \left(\frac{11}{4g}\right) \left(\frac{3G}{4\pi}\right)^2 \sin \alpha \quad (18)$$

$$r_b^4 = \left(\frac{3G}{4\pi}\right)^2 \cdot \frac{\cos \alpha}{(0.39 U_L^2)} \quad (19)$$

می توان نوشت. از تقسیم معادله ی (۱۸) به معادله ی (۱۹) خواهیم داشت:

$$r_b = \left(\frac{11}{4g}\right) (0.39 U_L^2) \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} \quad (20)$$

حال با قرار دادن کمیت  $r_b$  از معادله ی (۷) در معادله ی (۲۰) و با فرض  $a = \frac{(4g/11)^2}{0.39 U^2}$  خواهیم داشت:

$$\frac{\sin^2 \alpha}{\cos \alpha} = a t^2 \quad (21)$$

با رسانیدن طرفین معادله ی (۲۱) به توان ۲ و جایگزین کردن  $(1 - \sin^2 \alpha)$  بجای  $\cos^2 \alpha$  در آن، رابطه ی جدیدی بصورت:

$$\sin^4 \alpha + a^2 t^4 \sin \alpha - a^2 t^4 = 0 \quad (22)$$

حاصل می گردد که با قرار دادن  $Y = \sin^2 \alpha$  در آن، معادله ی درجه دوم زیر تبدیل می شود:

$$Y^2 + (a^2 t^4) Y - (a^2 t^4) = 0 \quad (23)$$

حل کلی معادله ی درجه دوم (۲۳) به صورت

$$Y = \sin^2 \alpha = \frac{1}{2} \left\{ -a^2 t^4 \pm \left( a^4 t^8 + 4 a^2 t^4 \right)^{1/2} \right\}$$

بدست می آید که پس از حذف ریشه منفی، به علت غیرقابل قبول بودن آن به صورت زیر خلاصه می گردد:

$$\sin^2 \alpha = \frac{a^2 t^4}{2} \left\{ \left( 1 + \frac{4}{a^2 t^4} \right)^{1/2} - 1 \right\} \quad (24)$$

حال اگر رابطه ی  $\left| \frac{4}{a^2 t^4} \right| < 1.0$  صادق باشد، می توان رابطه ی  $\left( 1 + \frac{4}{a^2 t^4} \right)^{1/2}$  را از روش دو جمله ای نیوتون<sup>۳</sup> به صورت زیر بسط داد:

$$\left( 1 + \frac{4}{a^2 t^4} \right)^{1/2} = 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{4}{a^2 t^4} \right) - \frac{1}{8} \left( \frac{4}{a^2 t^4} \right)^2 + \frac{1}{6} \left( \frac{4}{a^2 t^4} \right)^3 \dots \quad (25)$$

رابطه ی (۲۵) را با توجه به اینکه اصل

صادق می باشد، می توان به صورت تقریبی زیر عرضه کرد:

حال با توجه به شکل (۲-f) و فرض (ه) رابطه ی  $x$  و  $r_b$  را به صورت

$$x = r_b \cdot \cos \alpha \quad (14)$$

می توان بیان نمود. بنابراین از روابط (۸)، (۱۴) و (۱۳) کمیت  $\cos \alpha$  به صورت زیر بدست می آید:

$$\cos \alpha = \left( 0.39 U_L^2 \right) \left( \frac{4\pi}{3G} \right)^2 \cdot r_b^4 \quad (15)$$

الگوی کلی جهت پیش بینی قطر حبابهای متشکله هنگام ورود گاز از منافذ به درون مایعات جاری اگر معادله ی (۹) را به صورت

$$r_b^{10} = \left(\frac{11}{4g}\right)^2 \cdot \left(\frac{3G}{4\pi}\right)^2 \cdot \sin^2 \alpha \quad (16)$$

نوشته و کمیت  $(\sin^2 \alpha)$  را به صورت  $(1 - \cos^2 \alpha)$  از معادله ی (۱۵) در آن جای دهیم، پس از ساده کردن خواهیم داشت:

$$r_b^{10} + \left(\frac{11}{4g}\right)^2 (0.39 U_L^2)^2 r_b^8 = \left(\frac{11}{4g}\right)^2 \left(\frac{3G}{4\pi}\right)^4 \quad (17)$$

طبق قانون دکارت معادله ی درجه ی پنجم فوق فقط یک ریشه ی حقیقی مثبت دارد و سایر ریشه های آن منفی و یا مختلط<sup>۱</sup> خواهند بود که از نظر ما قابل قبول نیستند. متأسفانه حل (تحلیلی معادله ی (۱۷) جهت بدست آوردن تنها ریشه ی حقیقی و مثبت آن که  $r_b^2$  را بصورت تابعی از  $G$ ،  $U_L$  و  $g$  بدست خواهند داد غیر ممکن بوده و در صورت لزوم حل عددی توسط کامپیوتر توصیه می گردد.

### (III) قید شرایط محدود کننده در کاربرد الگوی

بدست آمده.

بطوری که در فوق مطرح گردید، حالت کلی مسأله منجر به حل معادله درجه پنجم (۱۷) و بدست آوردن تنها ریشه حقیقی و مثبت آن می گردد که از طریقه ریاضی میسر نمی باشد. اما با قید شرایط محدود کننده خاصی، می توان الگوی نظری را به صورت قابل حل ساده نمود. نتایج حاصل از الگوی ساده شده، جهت روشن کردن، نحوه مصرف و کاربرد این نظریه در طرح صنعتی اینگونه دستگاه ها بسیار مفید واقع خواهد گردید. از اینرو شرح روشن ساده کردن مدل نظری با قید شرایط محدود کننده مورد نظر و نتایج حاصله از الگوی ساده شده ذیلا " عرضه می گردد:



مستقل از سرعت حرکت مایع در روی صفحه سوراخ سوراخ بوده و در دو دستگاهی که تمام شرایط آنها یکسان باشد فقط در یکی مایع روی صفحه ساکن و در دیگری مایع در روی صفحه با سرعت  $U_L$  در جهت افقی جاری باشد، حجم حباب‌ها برابر می‌باشد. تحت این شرایط می‌توان از رابطه ی (۳۰) جهت تعیین قطر حبابهای متشکله در هر دو دستگاه استفاده نمود. در صورتی که شرایط جریان گاز و مایع طوری باشند که نامساوی (۳۳) به صورت:

$$G < 17.0 \frac{U_L^5}{g^2} \quad (34)$$

بیان گردد، آن وقت مکانیسم تشکیل حباب در درون مایع جاری با حالت مایع ساکن متفاوت خواهد بود و قطر حبابهای متشکله در این دستگاه باید از معادله ی (۱۷) برای شرایط داده شده  $U_L$  و  $G$  بطریق عددی محاسبه گردد.

در شکل (۵) رابطه ی (۳۳) به صورت تغییرات  $G$  بر حسب  $U_L$  ترسیم گردیده و در آن مناطق دو گانه زیر مشخص گردیده اند:

۱- ناحیه I، که در آن  $G \gg 17.0 \frac{U_L^5}{g^2}$  می‌باشد و حجم حبابهای متشکله در دستگاه های مایع جاری وساکن برابر بوده و از رابطه ی (۳۰) محاسبه می‌گردند.

۲- ناحیه II، که در آن  $G < 17.0 \frac{U_L^5}{g^2}$  می‌باشد و حجم حبابهای متشکله در دستگاه های جاری وساکن متفاوت میباشند، یعنی حجم حبابهای متشکله در دستگاه مایع جاری کوچکتر از حجم حبابهای متشکله در مایع ساکن بوده و از رابطه ی (۱۷) بطریق عددی محاسبه می‌گردد.

(IV) دستگاه آزمایشگاهی و نتایج تجربی بدست آمده.

با توجه به مطالبی که در مورد هدف از انجام این تحقیقات در قسمت (۲) ذکر گردید، برای بدست آوردن نتایج تجربی جهت تأیید نظریه عرضه شده در قسمت (۴)، طرح و ساختمان یک دستگاه آزمایشگاهی جهت اندازه گیری حجم حبابهای متشکله در درون مایع جاری و ساکن و در شرایط مختلف  $G$ ،  $U_L$  و  $h_L$  مورد نیاز بود.

#### الف- شرح دستگاه:

طبق شکل (۶)، دستگاه طرح شده از جنس شیشه مقاوم<sup>۳</sup> بوده و بدنه آن متشکل از استوانه ای به قطر داخلی

$$\left(1 + \frac{4}{a^2 t^4}\right)^{1/2} \approx 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{4}{a^2 t^4}\right) \quad (26)$$

بنابراین از جمع روابط (۲۶) و (۲۵) نتیجه ای به صورت زیر حاصل می‌گردد:

$$\sin \alpha = 1.0 \quad \text{و یا} \quad \sin^2 \alpha = 1.0 \quad (27)$$

مفهوم معادله ی (۲۷) اینستکه اگر رابطه:

$$\left(\frac{4}{a^2 t^4}\right) < 1.0 \quad (28)$$

صادق باشد، نظریه پیشنهاد شده نشان می‌دهد که  $\sin \alpha = 1.0$  خواهد بود. در این حالت حجم حبابهای تشکیل شده در درون مایع جاری، معادل حجم حباب تشکیل شده در درون مایع ساکن می‌باشد. سرعت مایع در روی صفحه، تاثیری بر روی مکانیسم تشکیل حباب ندارد و روابط زیر برای هر دو حالت صادق می‌باشد:

$$r_b = \frac{4}{11} g t^2 \quad (29)$$

و یا

$$r_b = \left(\frac{11}{4g}\right)^{1/5} \left(\frac{3G}{4\eta}\right)^{2/5} \quad (30)$$

حال با در نظر گرفتن مطالب فوق الذکر، می‌توان از رابطه ی (۲۸) برای تعیین محدوده کاربرد معادلات (۱۸) و (۳۰) در طرح صنعتی اینگونه دستگاه‌ها، بطریق زیر راهنمایی جست:

روابط (۲۹) و (۳۰) زمانی صادق میباشند که یکی از مساویهای زیر:

$$\left(\frac{4}{a^2 t^4}\right) < 1.0 \quad (28)$$

و یا

$$a t^2 > 2.0 \quad (31)$$

برقرار باشد.

حال با گذاردن  $G = \frac{(4g/11)^2}{(0.39U_L^2)}$  در رابطه ی (۳۱) و پس از ساده کردن آن خواهیم داشت:

$$\left(\frac{4}{11}\right) g t^2 > (0.78 U_L^2) \left(\frac{11}{4g}\right) \quad (32)$$

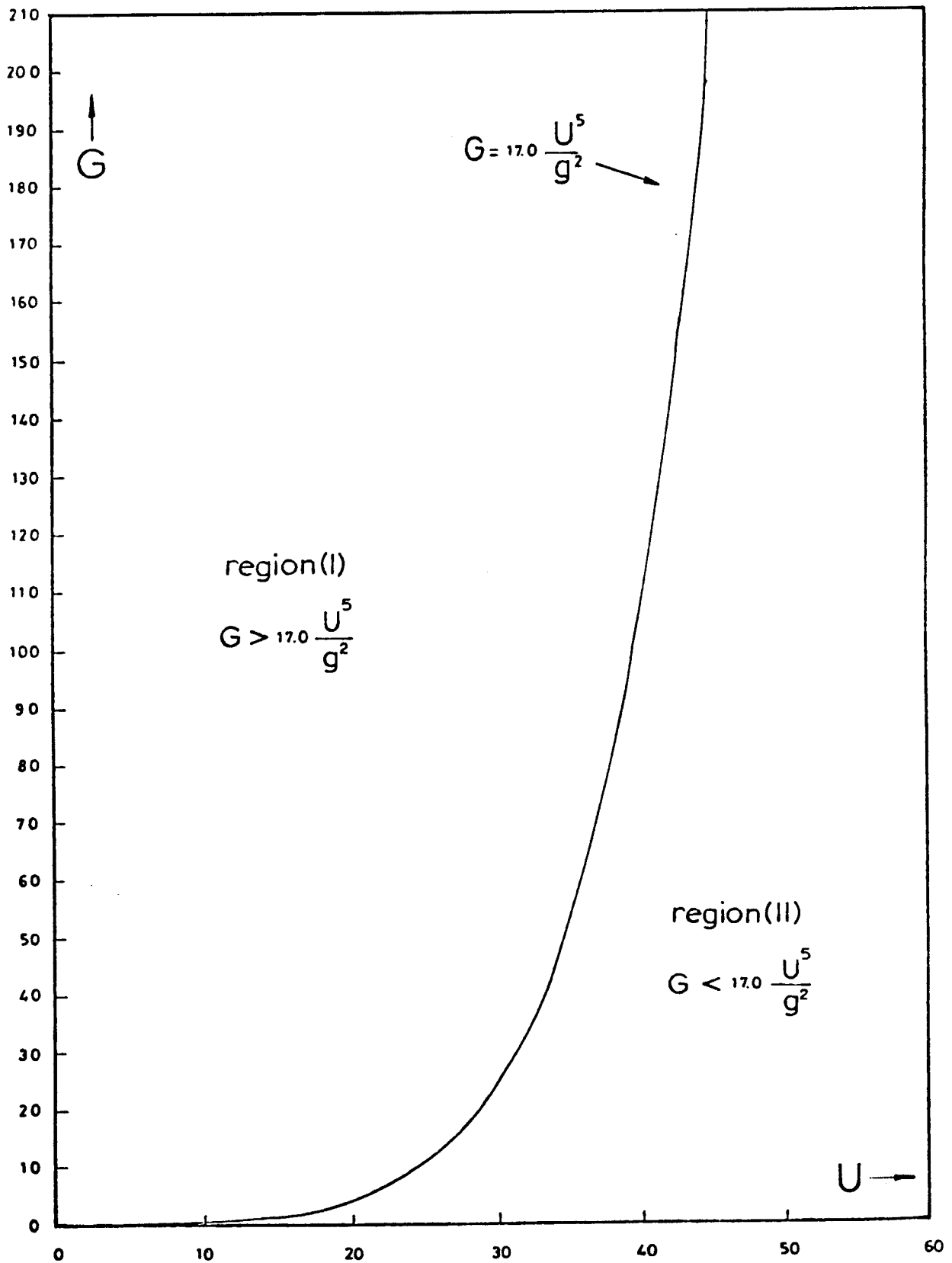
با تلفیق روابط (۲۹)، (۳۰) و (۳۲) رابطه جدید:

$$\left(\frac{11}{4g}\right)^{1/5} \cdot \left(\frac{3G}{4\eta}\right)^{2/5} > (0.78 U_L^2) \left(\frac{11}{4g}\right)$$

حاصل می‌گردد که پس از ساده کردن به صورت:

$$G \geq 17.0 \frac{U_L^5}{g^2} \quad (33)$$

نوشته می‌شود. بنابراین تا زمانی که نامساوی (۳۳) برقرار باشد،  $\sin \alpha = 1.0$  خواهد بود و مکانیسم تشکیل حباب،



شکل (۵)

تجربی حاضر و سایر دستگاه های مشابه مورد استفاده پژوهشگران قبلی وارد است .

**ب - روش آزمایشها**

برای اندازه گیری حجم حبابهای متشکله در درون مایع ، روش عکسبرداری سینمائی<sup>۷</sup> از حبابهای در حین تشکیل شدن استفاده شده است . فیلم مورد استفاده از نوع ۸ میلیمتری سوپر بوده و عکسبرداری با سرعت 32 تصویر در ثانیه<sup>۸</sup> انجام گرفته است . در حین آزمایشها ، از تشکیل بی دربی حبابها درون مایع ساکن و برای هر یک از شدت جریانهای مختلف گاز به مدتی در حدود یک دقیقه فیلم برداری نموده و سپس همین سلسله مراتب در مورد تشکیل حبابهای بی دربی در درون مایع جاری ( $u_L = 1.4 \text{ Cm/Sec}$ ) تکرار گردید . فیلم سینمائی حاصل توسط پروژکتور<sup>۹</sup> بر روی یک پرده ی بزرگ منعکس گردیده و از طریق شمارش تصویر به تصویر<sup>۱۰</sup> ، تعداد حبابهای تشکیل شده در فواصل زمانی معین اندازه گیری گردید .

برای تعیین دقیق این فواصل زمانی ، از شمارش دستگاه میلی ثانیه شماره T در تصویرها از ابتدا تا پایان هر آزمایش استفاده گردیده در هر آزمایش به ازاء شدت جریان معینی از گاز (G) ، در فاصله زمانی (t) تعداد حبابهای متشکله در دستگاه مایع ساکن ( $n_1$ ) اندازه گیری گردید و سپس با برقرار کردن جریان مایع و تکرار آزمایش فوق ، تعداد حبابهای متشکله در دستگاه مایع جاری ( $n_2$ ) در فاصله زمانی (t) بدست آمد .

چون حجم کلی گاز دمیده شده (Gt) در هر سیستم ثابت بوده و از طریق گذرنج  $R_1$  و میلی ثانیه شماره T اندازه گیری میشود ، بنابراین حد متوسط حجم حبابهای متشکله در دستگاه مایع ساکن ( $v_{b1}$ ) حد متوسط حجم حبابهای متشکله در دستگاه مایع جاری ( $v_{b2}$ ) ، به ترتیب از روابط

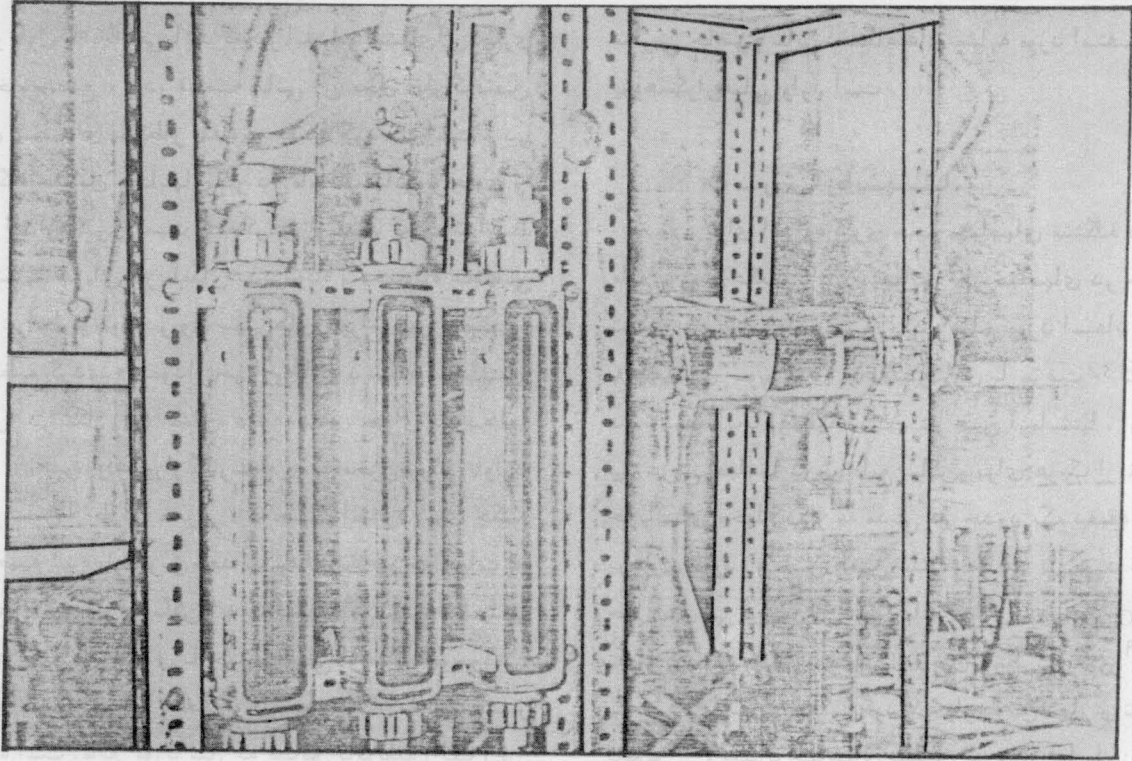
$$v_{b1} = \frac{G \bar{t}}{n_1} \quad (35)$$

$$v_{b2} = \frac{G \bar{t}}{n_2} \quad (36)$$

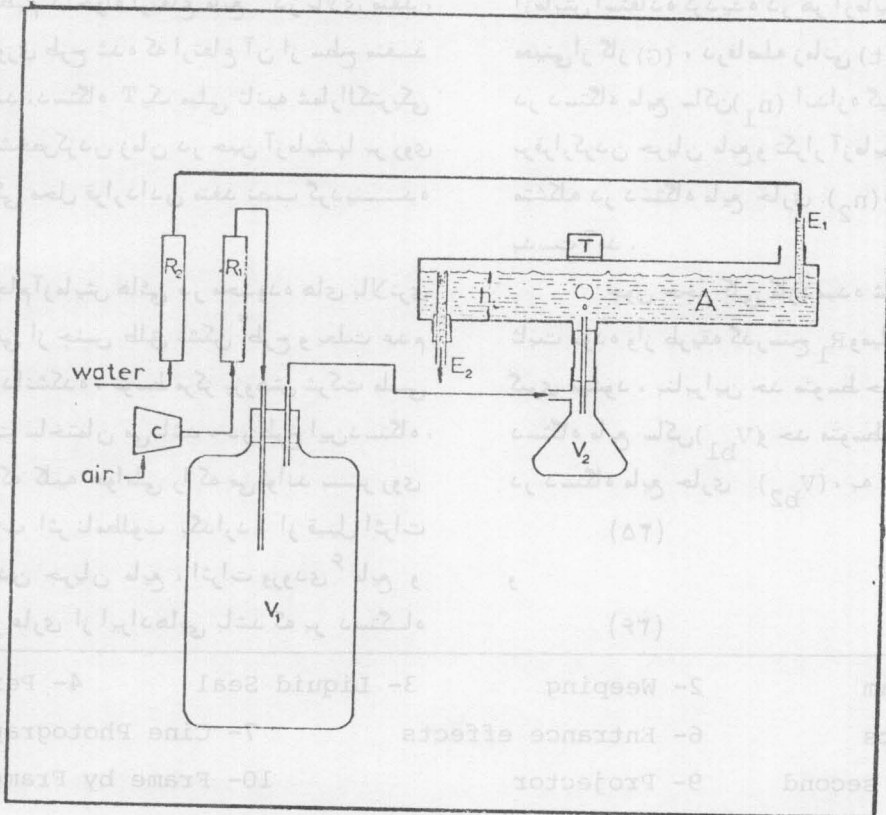
10Cm. و طول 60Cm می باشد که در ابتدا و انتهای آن مجاری ورود و خروج مایع ، و در قسمت میانی آن محل قرار گرفتن منفذهای شیشه ای با اقطار متفاوت تعبیه گردیده است . در این دستگاه تشکیل حبابهای گاز در مایعات ساکن و جاری و همچنین اندازه گیری کمیت چکه کردن از منفذ تحت شرایط مختلفه شدت جریان گاز ، امکان پذیر بوده و محدوده عملیاتی آن طبق شرایط موجود در روی سینی های سوراخ سوراخ صنعتی طرح و تنظیم گردیده . نمودار جریان گاز<sup>۱</sup> دستگاه و وسایل ضمیمه آن در شکل (۷) نشان داده شده . هوای فشرده از کمپرسور C ، پس از عبور از گذرنج  $R_1$  به مخزن بزرگ  $V_1$  وارد گردیده و سپس از طریق مخزن  $V_2$  که جهت اندازه گیری چکه کردن<sup>۲</sup> تعبیه شده ، از طریق منفذ شیشه ای به صورت حباب به درون مایع جاری (و یا ساکن) در A دمیده می شود . قطر منفذ مورد استفاده معادل با حد متوسطی از منافذ موجود در سینی های سوراخ سوراخ صنعتی ، در حدود 0.8Cm در نظر گرفته شده است . مایع مورد نیاز که مطابق با فرضیه (الف) در قسمت (۳) ، باید دارای لزجت کم باشد ، آب در نظر گرفته شده که پس از عبور از  $R_2$  در نقطه  $E_1$  وارد قسمت A گردیده و پس از عبور از روی منفذ از طریق مجرای  $E_2$  از دستگاه خارج می گردد . جهت تنظیم دلخواه ارتفاع مایع<sup>۳</sup> در بالای منفذ ، لوله خروجی  $E_2$  طوری طرح شده که ارتفاع آن از سطح منفذ قابل تنظیم می باشد . دستگاه T یک میلی ثانیه شمار الکتریکی میباشد که جهت مشخص کردن زمان در حین آزمایشها بر روی دستگاه و در نزدیکی محل قراردادن منفذ نصب گردیده است .

جهت انجام آزمایش هائی در محدوده های بالاتری از  $u_L$  و  $u_{Lc}$  دستگاهی از جنس پلک نشکن<sup>۴</sup> طرح و بعلت عدم وجود امکانات در دانشکده ، توسط مرکز پژوهش شرکت ملی نفت ایران در دست ساختمان می باشد . در طرح این دستگاه ، حداکثر سعی شده که کلیه عواملی را که می تواند بر روی مکانیسم تشکیل حباب اثر نامطلوب بگذارد ، از قبیل اثرات دیوار<sup>۵</sup> ناهمگن بودن جریان مایع ، اثرات ورودی<sup>۶</sup> مایع و غیره حذف شده و عاری از ایرادهایی باشد که بر دستگاه

- |                      |                     |                             |            |
|----------------------|---------------------|-----------------------------|------------|
| 1- Flow Diagram      | 2- Weeping          | 3- Liquid Seal              | 4- Perspex |
| 5- Wall effects      | 6- Entrance effects | 7- Cine Photography         |            |
| 8- Frames per second | 9- Projector        | 10- Frame by Frame Analysis |            |



شکل (۶) ل



شکل (۷)

چنانچه مشاهده می‌گردد نتایج نظری و تجربی کم و بیش با یکدیگر منطبق می‌باشد.

(ب) - اگر شرایط جریان گاز و مایع در روی صفحه سوراخ سوراخ بنحوی باشد که رابطه  $G \geq 17.0 \frac{U_L^5}{g^2}$  صادق نباشد، یعنی نقطه معرف  $u_{L5}$  مشخص شده در شکل (۵)، در زیر منحنی  $G < 17.0 \frac{U_L^5}{g^2}$  قرار بگیرد، در این ناحیه مکانیسم تشکیل حبابهای گاز در مایع جاری متفاوت با حالت مایع ساکن بوده و نتیجتاً " باید طبق نظریه ارائه شده در قسمت (III)، شعاع حبابهای متشکله در درون مایع جاری را از رابطه ی (۱۷) در شرایط توصیف شده  $G$  و  $u_{L5}$  بطریق عددی محاسبه نمود.

(VI) بحث در پیرامون مسأله و نحوه استفاده از

نتایج بدست آمده

با توجه به مطالب عرضه شده در بخشهای فوق الذکر، مکانیسم تشکیل حبابهای گاز در موقع ورود گاز از منفذهای صفحات مسطح سوراخ سوراخ به درون مایع جاری و در سطح بالای صفحه، بستگی به شرایط کار صفحه یعنی شدت جریان دمیدن گاز از منافذ ( $G$ ) و سرعت جریان مایع ( $u_L$ ) در روی صفحه می‌باشد.

دو ناحیه مشخص بصورت تابعی از  $G$  و  $u_L$  توصیف گردید و در هر ناحیه رابطه خاصی جهت محاسبه حجم حبابهای متشکله ارائه شد. در ناحیه ی (۱)، یعنی وقتی که رابطه ی  $G = 17.0 \frac{U_L^5}{g^2}$  صادق باشد، نتایج نظری و تجربی حاکی از این هستند که مکانیسم تشکیل حباب، مستقل از سرعت جریان مایع بوده و حجم حبابهای متشکله را می‌توان از رابطه ی (۲) که منطبق بر نظریه (۱) دیویدسان و شولر برای محاسبه حجم حبابهای متشکله در مایع ساکن می‌باشند، محاسبه نمود.

در ناحیه (۲)، یعنی وقتی که رابطه  $G \geq 17.0 \frac{U_L^5}{g^2}$  صادق باشد، مکانیسم تشکیل حباب بستگی به جریان مایع بوده و حجم حبابهای متشکله متفاوت از حالت قبلی می‌باشند و باید از رابطه ی (۱۷) در شرایط داده شده  $G$  و  $u_L$  بطریق عددی محاسبه گردند. بدیهی است که در این حالت چون  $\sin \alpha < 1$  خواهد بود، شعاع حبابهای متشکله طبق

به ازاء هر شدت جریان معینی از گاز ( $G$ )، از نتایج تجربی حاصل، قابل محاسبه می‌باشند.

عکس یک نمونه از فیلم های گرفته شده از حبابها در شکل (۸) ارائه شده است و نتایج حاصل از شمارش تصویر به تصویر فیلم ها و محاسبه فرکانس تشکیل حبابها در شرایط مختلفه جریان گاز و مایع، در شکل شماره (۱۰) نشان داده شده است.

مقایسه نظری و نتایج تجربی بدست آمده

بطوریکه در پایان قسمت (III) اشاره شد، بررسی

الگوی نظری نشان می‌دهد که:

(الف) - اگر نامساوی  $G \geq 17.0 \frac{U_L^5}{g^2}$  صادق باشد، حجم حبابهای متشکله مستقل از سرعت جریان مایع بوده و شعاع حبابهای متشکله فقط تابعی از  $G$  و  $g$  می‌باشند که به صورت  $r_b = (\frac{11}{4g})^{1/5} (\frac{3G}{4\pi})^{2/5}$  بیان گردیده است. بنابراین در این ناحیه حجم حبابهای متشکله در درون مایع جاری و ساکن با هم برابر و باید توسط رابطه ی (۱) دیویدسان و شولر<sup>۱</sup> به صورت:

$$v_{b1} = v_{b2} = 1.378 \frac{G^{6/5}}{g^{3/5}} \quad (37)$$

توصیف‌گردند. از اینرو به ازاء شدت جریان گاز ( $G$ ) و سرعت جریان مایع ( $u_L$ ) که در این سری آزمایشها بکار برده شده، انتظار می‌رود که حجم حبابهای متشکله در درون مایع جاری، فقط تابعی از شدت جریان گاز بوده و حرکت مایع تأثیری بر روی مکانیسم تشکیل حباب گاز نداشته و چگونگی مسأله مشابه حالت مایع ساکن باشد و در این شرایط حجم حبابها که بطریق تجربی اندازه گیری شده، باید با پیش بینی های نظری حاصل از رابطه ی (۳۷) منطبق باشد.

در شکل (۹) جهت مقایسه حجم حبابهای متشکله در دو دستگاه مایع و ساکن و جاری برای شدت جریانهای متفاوت گاز، نسبت  $(v_{b1}/v_{b2})$  در مقابل ( $G$ ) ترسیم گردیده است. چنانچه مشاهده می‌شود، نتایج تجربی پیش بینی نظریه را در ناحیه  $G \geq 17.0 \frac{U_L^5}{g^2}$  تأیید می‌کنند. همچنین در شکل (۱۰) حجم حبابها که بطریق تجربی اندازه گیری شده‌اند، با حجم نظری بدست آمده از رابطه ی (۳۰) مقایسه گردید و





بنحوی که شرایط  $G \geq 17.0 \frac{UL^5}{g^2}$  تامین گردد، بدلیل چکیدن مفرط مایع از منفذ مقدور نبود، لذا نتایج تجربی حاصل، همگی در ناحیه I یعنی برای شرایط  $G \geq 17.0 \frac{UL^5}{g^2}$  بدست آمده است. ولی با تکمیل دستگاه ساخته شده در مرکز پژوهش شرکت ملی نفت ها امکان بوجود آوردن شرایط کار در ناحیه II میسر و آزمایشهای مربوطه و مقایسه آنها با پیش بینی های معادله ی (۱۷) انجام خواهد گرفت.

مسئله مهم از نقطه نظر طرح صحیح صفحات پخش کننده سوراخ سوراخ اینستکه، حبابهای متشکله پس از جدا شدن از منافذ، به صورت حبابهایی مستقل و جدا از هم در مایع بالا روند، و یا اینکه فاصله منافذ S از یکدیگر بنحوی ترتیب داده شوند که حداقل از اتصال<sup>۴</sup> حبابهای متشکله در نزدیکی سطح صفحه پخش کنند جلوگیری شود. زیرا اتصال حبابها باعث تقلیل سطح تماس موجود برای حجم داده شده گاز می گردد و موجب افت بازدهی عمل انتقال جرم خواهد گردید. با در دست داشتن قطر حبابهای متشکله برای شرایط معلوم  $G$  و  $u_L$ ، تصمیم گرفتن درباره حداقل فاصله لازم بین منافذ هم جوار،  $S_{min}$  جهت جلوگیری از بهم چسبیدن و اتصال حبابها<sup>۵</sup> امکان پذیر می باشد. اگر حوزه اعمال نفوذ هر حباب طبق پیشنهاد (۵) زنس<sup>۶</sup> برابر  $r_b$  در حجم مایع اطراف حباب فرض کنیم، مشاهده می شود که برای جلوگیری از عمل اتصال در نزدیکی صفحه پخش کننده باید رابطه ی  $S_{min} = 4r_b$  صادق باشد. چنانچه شرایط کار در روی صفحه به نحوی باشد که شرایط ناحیه I را تامین کند، شعاع حبابهای متشکله از منفذ طبق:

$$r_b = \left(\frac{11}{4g}\right)^{1/5} \left(\frac{3}{4}\right)^{2/5} \dots \dots \dots (2)$$

بیان شده است. بنابراین از تلفیق روابط (۲) و (۳۸) برای جلوگیری از بهم چسبیدن حبابها، رابطه ی بین حداقل فاصله منافذ و شدت جریان گاز به صورت

$$S_{min} = 0.7 G^{2/5} \text{ بیان خواهد شد.}$$

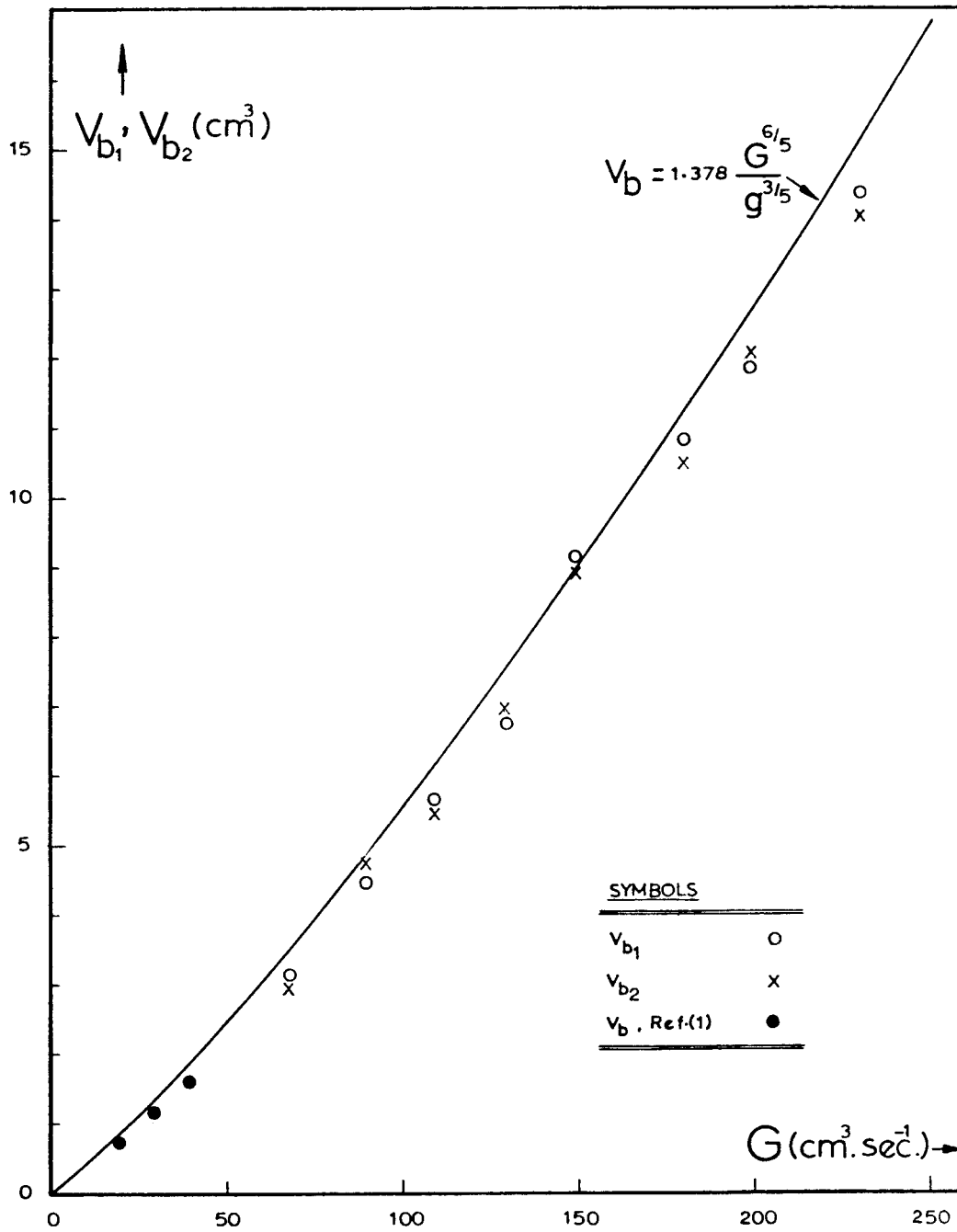
معادله ی (۹) کوچکتر از حالت قبلی بوده و در شرایط شدت جریان ثابت گاز، موجب ازدیاد فرکانس حبابهای تولید شده از هر منفذ خواهد گردید. این عمل باعث ازدیاد سطح تماس و همچنین زمان تماس مابین حبابها و مایع می گردد و نتیجتاً باید سبب بالا رفتن بازده عملکرد صفحه گردد. ولی در واحدهای بزرگ جذب و تقطیر که از صفحات توزیع کننده سوراخ سوراخ استفاده می شود، غالباً " شدت جریان دمیدن گاز  $G$  و سرعت جریان مایع  $u_L$  در روی صفحه به نحوی است که شرایط کار صفحه در ناحیه I می باشد، یعنی رابطه ی  $G \geq 17.0 \frac{UL^5}{g^2}$  صادق بوده و حجم حبابهای متشکله توسط رابطه ی (۲) محاسبه می گردد. این امر، مورد تأیید غالب نتایج بدست آمده از تحقیقات صنعتی که در این زمینه انجام گردیده می باشد. بعنوان مثال نتایج تجربی (۴) هوانگ و هادسون<sup>۱</sup> را که جهت تعیین محدوده شرایط کار سینی های سوراخ سوراخ در ستونهای تقطیر و جذب انجام گرفته، می توان ذکر کرد. این نتایج در شکل (۱۱) خلاصه گردیده و چنانچه ملاحظه می گردد در قسمت سایه خورده که عملیات در روی صفحه متعادل و مطلوب می باشد، همیشه رابطه  $G \geq 17.0 \frac{UL^5}{g^2}$  صادق است و مکانیسم تشکیل حبابهای گاز در درون مایعات جاری در روی صفحات سوراخ سوراخ این نوع واحدها، مستقل از سرعت جریان مایع در روی صفحه می باشد.

بررسی حالت  $G \geq 17.0 \frac{UL^5}{g^2}$  در مواردی مطرح می شود که در ستونهای تقطیر و جذب، بار مایع<sup>۲</sup> زیاد و شدت جریان گاز کم باشد. همچنین در طراحی سیستم هایی از قبیل راکتورهای گاز و مایع جاری<sup>۳</sup> که مایع با سرعت قابل توجه ای جاری می باشد و گاز بصورت حباب از منافذ به درون آن دمیده می شود، شرایط  $G \geq 17.0 \frac{UL^5}{g^2}$  صادق می باشد و حجم حبابهای متشکله را می توان با کاربرد معادله ی (۱۷) به طریق عددی محاسبه نمود.

در دستگاهی که توصیف شد، چون انجام آزمایشهایی با سرعت های زیاد قابل توجه برای مایع امکان پذیر نبود (حداکثر سرعت مایع جاری در روی صفحه به  $1.5$  سانتیمتر در ثانیه می رسید) و از طرف دیگر کاهش شدت جریان گاز

1- Chen Jung Huang and J.R. Hudson  
3- Gas-Liquid Flow Reactors  
5- Bubble Coalescence

2- Liquid Load  
4- Bubble Coalescence  
6- Zenz



شکل (۱۰)



نتیجه

در واحدهای مختلف صنعتی از قبیل ستونهای جذب و تقطیر که در آنها جهت ازدیاد سطح تماس مابین فازهای گاز و مایع از صفحات پخش کننده سوراخ سوراخ استفاده می شود، در اثر ساختمان مکانیکی اینگونه توزیع کننده ها، گاز به صورت حبابهای ریز کروی به درون مایع جاری و درروی صفحه پخش می گردد. برای بررسی بازده<sup>۱</sup> عمل انتقال جرم بین فاز گاز و مایع در روی چنین صفحاتی، باید سطح تماس<sup>۲</sup> و زمان تماس<sup>۳</sup> موجود بین دو فاز را تعیین نمود که هر دو تابعی از حجم حبابهای متشکله از منافذ می باشند. نظریه پیشنهاد شده در این مقاله، مکانیسم تشکیل حباب گاز در درون مایع جاری بررسی شده و دو الگو جهت محاسبه حجم حبابهای متشکله در شرایط مختلف جریان گاز و مایع ارائه گردیده است. حوزه عمل و نحوه کاربرد هر الگو جداگانه بررسی و مورد بحث قرار گرفته و امکانات استفاده از آنها در طرح صنعتی اینگونه صفحات پخش کننده، به اختصار خاطر نشان گردیده. بررسی تجربی قسمتی از نظریه و سایر اشکالات وابسته در طرح اینگونه پخش کننده ها، از قبیل مکانیسم و کمیت چکیدن<sup>۴</sup> مایع از منافذ به قسمت زیرین صفحه پخش کننده در مقاله دیگری عرضه خواهد گردید.

زمانی  $\bar{t}$  درون مایع ساکن  
 تعداد حبابهای متشکله در فاصله  $n_2$   
 زمانی  $\bar{t}$  درون مایع جاری  
 شعاع حباب گاز  $r_b$   
 فاصله منافذ از یکدیگر  $S$   
 حداقل فاصله مجاز بین منافذ  $S_{min}$   
 زمان تشکیل حباب  $t$   
 سرعت گاز درون منافذ جهت عمودی  $U_G$   
 سرعت مایع روی صفحه جهت افقی  $U_L$   
 حجم حباب گاز  $V_b$   
 حجم حبابهای متشکله از منفذ بدرون مایع ساکن  $V_{b1}$   
 حجم حبابهای متشکله از منفذ بدرون مایع جاری  $V_{b2}$   
 زاویه بین مسیر مرکز حباب و سطح افقی  $\alpha$   
 چگالی مایع  $P_L$   
 لزجت مایع  $\mu$   
 فهرست منابع

1/ Davidson, J. F. and Schuler, B. O. G. Trans. Instn. Chem. engrs, Vol. 38, 1960  
 2/ Sullivan, S. L. Jr., Hardy, B. W. and Holland, C. D., A. I. Ch. E. Journal November 1964.  
 3/ L. M. Milne-Thomson, Theoretical Hydrodynamics, 4th Edition, London Macmilan 1962  
 4/ Chen-Jung Huang and Hodson, J. R., Pet. Ref. vol. 37, 1958  
 5/ Zenz, F. A., 1968 I. Ch. E., Tripartite Chem. Eng. Conf., Montreal, session 32, p. 36

علامات اختصاری

a کمیت توصیف شده برابر با  $\frac{(4g/u)^2}{0,39U_L^2}$   
 $\Delta_b$  سطح دایره عظیمه کره بشعاع  $r_b$   
 $d_o$  قطر منفذ  
 g شتاب ثقل زمین  
 $G'$  جریان حجمی گاز بدرون منفذ  
 $h_L$  ارتفاع مایع جاری بر روی منافذ  
 $n_1$  تعداد حبابهای متشکله در فاصله