Archive of SID

شبیه سازی حرکت حباب هوا درتونل های آب بربا شیب کم

ابوالفضل شمسایی [i] ; فاطمه نظری [ii]

چکیده

یکی از کاربردهای تونل های آب بر طویل، انتقال آب بین حوضه های دور از هم است. این تونل ها دارای شیب ها ناچیز هستند و در شرایطی امکان ورود هوا به آنها وجود دارد. پدیده بازگشت حباب عبارت است از حرکت بسته های بزرگ هوا در خلاف جهت جریان آب که در ورودی مجاری آب بر تحت فشار می تواند مخرب باشد. در این مقاله با استفاده از نرم افزار فلوئنت (FLUENT) و روش حجم سیال، حرکت حباب های بزرگ هوا در مجاری با شیب و دبی بی بعد ناچیز (شرایط مجاری طویل) شبیه سازی شده است. نتایج نشان می دهند که پدیده حرکت حباب هوا بر خلاف جهت جریان در شرایط مجاری طویل و با شیب کم رخ نمی دهد.

کلمات کلیدی: **مجاری طویل، بازگشت حباب، نرم افزار فلوئنت، روش حجم سیال.**

تاریخ دریافت مقاله: ۸۹/۴/۱ تاریخ پذیرش مقاله: ۸۹/۷/۱۲

[i] نویسنده مسئول، استاد دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی-واحد علوم و تحقیقات، shamsai@sharif.edu .
[ii] کارشناس ارشد؛ دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شریف، fatemenazari83@yahoo.com.

۱- مقدمه

مجرای طویل عموما به مجرایی گفته می شود که نسبت طول به قطر آن بیش از ۳۰ باشد[۸]. این نوع از مجراها، در سیستم های انتقال و انحراف آب مانند تونل و شبکه های لوله کشی و سازه های هیدرولیکی جانبی سد ها به کار می روند. به طور کلی ورود هوا به مجرای آب خصوصا مجراهایی که طراحی تحت فشار داشته باشند، می توانند باعث مشکلاتی مانند تغییرات سطح مقطع و ظرفیت لوله، تغییرات مدول بالک مخلوط آب و هوا نسبت به آب، تاثیر منفی روی فیلترها و دستگاه های قرائت، ایجاد محیط غنی از اکسیژن برای رشد برخی موجودات در انتهای مجرا در اثر رها شدن هوا و... باشد. چنین مشکلاتی باعث نیاز به طرح مسائل مربوط به جریان های دوفازی مایع و گازشده اند. این جریان ها در عمل بسیار رایج اند و هوا از راه های متعددی می تواند وارد مجرا شود.

جریان های دوفازی از کلیه قوانین مکانیک سیالات تبعیت می کنند و با این حال از نظر تحلیلی به شدت پیچیده اند. جریان های دوفازی گاز- مایع(در اینجا آب و هوا) به سه دسته عمده تقسیم می شوند: جریان های جدا که دو فاز فصل مشترک مشخصی دارند، جریان های انتقالی که فصل مشترک دستخوش ناپایداری می گردد و جریان های پراکنده که فاقد فصل مشترک مشخص اند و یک فاز به صورت حباب هایی ریز درون فاز دیگر قرار می گیرد. موضوع کار این مقاله مربوط به حرکت حباب های بزرگ درون جریان آب است و در دسته اول جای می گیرد. در این دسته تمرکز اصلی رویکرد های ریاضی و عددی روی تعریف مکان فصل مشترک دو فاز می باشد. دشواری این موضوع مربوط به ناپیوستگی خواص و میدان فشار در این ناحیه باز می گردد که تحلیل عددی و تئوری این موضوع را پیچیده می کند. علیرغم مطالعات فراوان صورت گرفته روی جریان های دوفاز، همچنان کمبود اطلاعات مورد نیاز برای طراحی سازه های هیدرولیکی و سایر ابزارهای در معرض این نوع جریان وجود دارد و طراحان یا به ساخت مدل های فیزیکی روی می آورند و یا طراحی را با ضرایب اطمینان بزرگ انجام

www.SID.ir

Archive of SID

می دهند.

در مجاری بسته آب و در حیطه جریان های دوفاز، رژیم های مختلفی توسط پژوهشگران آزمایشگاهی مشاهده و دسته بندی شده اند. هر چند این طبقه بندی ها به شدت کیفی و بر اساس نظر آزمایشگر هستند، اما دارای اشتراکات اساسی نیز می باشند. عمده ترین رژیم های موجود در این دسته بندی ها عبارتند از رژیم چینه ای، موجی، لخته ای، حلقوی و کف آلود. این دسته بندی ها با توجه به اشتراکات و اختلافات وضعیت دو فاز جریان نسبت به یکدیگر در بسیاری از مراجع ارائه شده اند که کار پژوهشی تیتل و داکلر [۱۲] از نخستین و شاخص ترین آنهاست.

در بین رژیم های نام برده شده، رژیم چینه ای، موجی، لخته ای و حلقوی در ناحیه جریان های دوفاز جدا قرار می گیرند و در مجاری بسته تحت فشار، رژیم های چینه ای، موجی و لخته ای مهم ترین الگوهای محتمل محسوب می شوند. در این بین رژیم لخته ای به علت مشکلاتی که در بهره برداری ایجاد می کند (مانند نوسانات فشار در حین تشکیل لخته هوا یا حرکت بسته های بزرگ هوایی در مجرای تحت فشار) مورد بررسی و تحقیق بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. رویکرد بخش اعظم این محققان به جریان لخته ای، آزمایشگاهی بوده است.

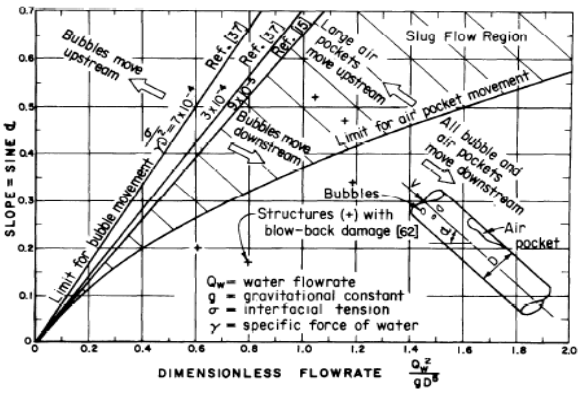
جریان لخته ای در مراجع مختلف به طیف گسترده ای از وضعیت های جریان دوفازی اطلاق می شود که وجه اشتراک آنها حرکت بسته های بزرگ هوا در مجرای تحت فشار پر از مایع است. در عمل این نوع جریان می تواند ناشی از رشد ناپایداری های سطحی و یا وقوع ناپایداری در ورودی مجرا باشد. رژیم لخته ای ناشی از رشد ناپایداری سطحی هنگامی پدید می آید که تحت شرایطی ناپایداری های سطحی و امواج کوچک موجود روی فصل مشترک آب و هوا رشد کنند و ابعاد آنها افزایش یابد تا هنگامی که سقف مجرا را لمس نمایند و فاز هوا به صورت ناپیوسته درآید. در این حالت بسته های بزرگ هوا در مجرای آب پدید می آیند. ناپایداری هایی نظیر وقوع گردابه در ورودی مجرا نیز می توانند به ایجاد چنین حباب های بزرگ هوایی بینجامند. بر همین اساس جریان لخته ای عموما از دو منظر مورد بررسی و پژوهش قرار می گیرد. در منظر اول نحوه تشکیل لخته های هوا و رژیم انتقالی محل بررسی است و در منظر دوم نحوه حرکت بسته ها یا لخته های هوا در جریان مجرای بسته مورد پژوهش قرار می گیرد. این مقاله در گروه دوم جای می گیرد.

موضوع حرکت حباب توسط بسیاری از پژوهشگران به صورت آزمایشگاهی (وایت [۱۵] و کالینسک[۱۰]) ، عددی (یوبینک[۱۳] و کارلسون[۷]) و تئوری (بنجامین[۵]) مورد توجه قرار گرفته است. نیرو های وارد برحرکت حباب در مجرای حاوی مایع، نیرو های شناوری و پسا هستند و این دو نیرو در تحلیل ابعادی تحت تاثیر لزجت، اینرسی و کشش سطحی می باشند [۸]. بنابراین عموما از اعداد بی بعدی برای توصیف نتایج کار استفاده می شود که حاصل نسبت این نیروها باشند. در بسیاری از آزمایش ها و همچنین تحقیقات عددی و نظری در حیطه حرکت حباب در جریان مایع، از اعداد بی بعد فرود جریان یا حباب هوا ($Fr = \frac{V}{\sqrt{gD}}$) ، عدد ایتوس[1] ($E = \frac{g(\rho_w - \rho_g)D^2}{\sigma}$) ، عدد دبی بی بعد ($\frac{Q^2}{gD^5}$) و عدد مورتون ($Mo = \frac{g\mu_w^4(\rho_w - \rho_a)}{\rho_w^2\sigma^3}$) استفاده می شود. در اینجا، V سرعت حباب هوا یا جریان آب (با توجه به نوع آزمایش انتخاب می شود)، D قطر مجرا، g شتاب گرانش، Q دبی جریان آب، ρ_w چگالی آب، ρ_a چگالی هوا، σ ضریب کشش سطحی و μ_w ضریب لزجت دینامیکی آب است. فالوی[۸] نتایج کار گروهی از پژوهشگران را ارائه می دهد که با استفاده از شیب مجرا و عدد ایتوس و دبی بی بعد، گرافی به دست آوردند که نشان می داد بین رفتار حباب های کوچک و بزرگ به لحاظ همراهی با جریان اختلاف وجود دارد (شکل ۱). در واقع تاثیر نیروی شناوری و نیروهای سطحی به گونه ای است که گاهی تحت تاثیر غلبه شناوری حباب ها به سمت بالا دست وخلاف جهت جریان حرکت می کنند و این تمایل در حباب های بزرگ بیشتر است. در این گراف شیب های ناچیز و دبی های بی بعد کوچک تونل های انتقال آب طویل در ناحیه بسیار کوچکی قرار می گیرند که عملا اطلاعات دقیقی از آن قابل استخراج نیست. در حرکت رو به بالای حباب ها، گاهی صدمه مخرب بازگشت حباب[2] اتفاق می افتد [۸] و از این رو روی آن حساسیت وجود دارد.

1- Eötvös
2- Blow Back

www.SID.ir

Archive of SID



شکل (۱): گراف رفتار بسته های هوایی بزرگ و کوچک در جریان مجاری [۸]

وایت و بردمور [۱۵] با استفاده از داده های آزمایشگاهی فراوان روی حباب های تیلور (حباب صعود کننده در مایع ساکن) دریافتند که وقتی عدد مورتون از حدود 10^{-11} و کمتر باشد، حرکت حباب از لزجت مستقل است. همچنین هنگامی که عدد ایتوس از حدود ۱۰۰ بیشتر باشد، این حرکت از کشش سطحی مستقل می شود. موسسه CAE[1] نیز در راهنمایی مربوط به جریان های دوفاز[۹] نیز عدد N_f را به صورت $N_f = \frac{D^{3/2} \times g^{1/2}}{\nu}$ معرفی نموده (ν ضریب لزجت سینماتیکی آب است) و عنوان کرده است که اگر این عدد از ۳۰۰ بزرگ تر باشد، اثرات لزجت قابل صرف نظر است.

یوبینک [۱۳] با استفاده از نتایج آزمایشگاهی بردمور و وایت مدل عددی CICSAM را برای جریان های دوفاز جدا ارائه و صحت یابی نموده است. این مدل در نرم افزار فلوئنت نیز قابل دسترسی است. کارلسون[۷] نیز با استفاده از نرم افزار فلوئنت حرکت یک حباب تیلور را شبیه سازی نموده و در رابطه با سرعت آن به نتایج قابل قبولی رسیده است. در این زمینه، به نسبت تحقیقات عددی و آزمایشگاهی کارهای نظری کمی انجام گرفته است.

در این رابطه نیکلین [۱۱] سرعت حرکت حباب را تابع پیچیده ای از نیروی شناوری و متوسط جریان معرفی می کند و این رابطه را برای توصیف آن پیشنهاد می نماید:

$$V = C_0 U + V_\infty \qquad (۱)$$

که V_∞ به معنای سرعت حباب در یک مایع ساکن و U سرعت متوسط جریان در ناحیه ای دور از حباب است. البته این عبارت به معنای یک تابع خطی از U نیست، بلکه C_0 پارامتری بی بعد است که می تواند به U و سایر ویژگی های جریان وابسته باشد. در مجرا های افقی و مایل برای یافتن C_0 پژوهش هایی انجام شده است. یکی از شاخص ترین این پژوهش ها، متعلق به بنجامین[۵] است. ایشان با صرف نظر از کشش سطحی و در نظر گرفتن شرایط دو بعدی در مجرایی افقی، پاسخ هایی به شکل سری تیلور برای C_0 و ضخامت فیلم مایع d (قطر لوله منهای قطر حباب) و عدد فرود حباب (سرعت بی بعد شده حباب با استفاده از قطر مجرا) به دست آورده است. این پاسخ ها برای اعداد فرود کوچک مایع ($Fr_L \ll 1$) ارائه شده اند. این روابط برای دو حالت جریان لایه ای و یک حالت جریان آشفته تنظیم شده اند و بیان می کنند که حتی در شرایط جریان آشفته نیز، سرعت حرکت حباب بیش از هر عاملی تحت تاثیر فرود جریان است.

در خصوص مجاری طویل به علت محدودیت های آزمایشگاهی، پژوهش های بسیار اندکی انجام شده است. از جمله این پژوهش ها می توان به کار آزمایشگاهی یامادا [۱۶] و همکاران اشاره کرد که در آن به تولید و انتقال لخته های هوا در مجاری با نسبت طول به قطر زیاد (تا ۱۶۳۱۶) پرداخته می شود. بخشی از این کار آزمایشگاهی به سرعت انتقال بسته های بزرگ هوا در مجرای با طول زیاد می پردازد. با توجه به نتایج این بخش می توان گفت هراندازه بسته هوایی در طول مجرا پیش رود، سرعت انتقال آن نیز افزایش می یابد و میزان تغییرات در مجاری با طول بلند بیشتر است. لازم به ذکر است که مجرای مورد استفاده در این آزمایش ها افقی بوده است و بنابراین پدیده بازگشت حباب در آن مطرح نیست.

۲- مفاهیم و روش کار

یکی از پرکاربرد ترین روش های مدلسازی عددی جریان های جدا، روش حجم سیال یا VOF[2] است. در این روش کمیتی به نام کسر حجمی (در اینجا با علامت α) برای فاز i تعریف می کند که به معنای میزان سیال i در سلول محاسباتی است. اگر سلول از سیال i پر باشد، $\alpha = 1$، اگر خالی باشد $\alpha = 0$ و اگر نیمه پر باشد $0 < \alpha < 1$ خواهد بود. به این ترتیب فصل مشترک مکانی است که در آن $0 < \alpha < 1$ باشد.

1- Commissariat a' l'Energie Atomique

2- Volume Of Fluid

www.SID.ir

Archive of SID

در این روش معادلات پایه که به ازای هر حجم کنترل حل می شوند عبارتند از :

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla.(\vec{U}.\alpha) = 0 \qquad (۲)$$

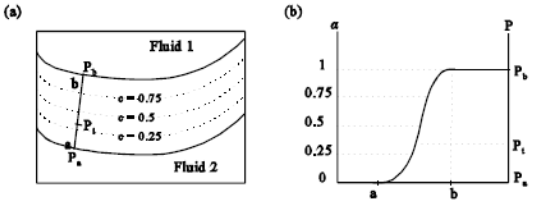
$$\nabla.\vec{U} = 0 \qquad (۳)$$

$$\frac{\partial \rho \vec{U}}{\partial t} + \nabla.\rho(\vec{U}.\vec{U}) + \nabla.P = \rho g + F_s + \nabla.[\mu(\nabla.\vec{U} + \nabla.\vec{U}^T] \qquad (۴)$$

معادله ۲ مربوط به بقای کسر حجمی و معادلات ۳ و ۴ به ترتیب معادله پیوستگی و مومنتوم می باشند که در آنها $\vec{U}$ بردار سرعت، F_s ترم کشش سطحی و بالانویس T به معنای عملگر ترانهاده ماتریس است. در روش حجم سیال کلیه کمیت های نرده ای مانند چگالی با توجه به کمیت کسر حجمی در کل قلمرو محاسباتی میانگین گیری می شوند. مثلا برای چگالی هر سلول:

$$\rho_{\text{سلول}} = \alpha \rho_1 + (1 - \alpha)\rho_2 \qquad (۵)$$

روش حجم سیال از نظر محاسباتی پر هزینه است. این روش در ناحیه واسطه بین دو سیال از تکنیک نیروی پیوسته سطحی یا CSF[1] برای ایجاد پیوستگی خواص سیال و تعریف نیروی کشش سطحی در ناحیه فصل مشترک استفاده می کند یوبینک [۱۳]. توزیع کسر حجمی مربوط به این روش در شکل (۲) نمایش داده شده است. در گراف سمت راست شکل (۲)، محور فشار در سمت راست و محور کسر حجمی در سمت چپ نمایش داده شده اند و در گراف سمت چپ همین توزیع به صورت متناظر روی ناحیه فصل مشترک نمایش داده شده است.



شکل (۲): توزیع پیوسته CSF یوبینک[۱۳]

بر اساس این توزیع پیوسته و غیر واقعی از کمیت کسر حجمی که در ناحیه فصل مشترک اعمال می شود، کمیت لزجت نیز مانند سایر کمیت های نرده ای در ناحیه واسطه توزیع می شود و در برآورد مقدار تنش برشی بین دو سیال تاثیر جدی و نامطلوبی می گذارد. از این رو بیشترین موفقیت روش حجم سیال در مواردی بوده است که نیروهای اینرسی در پدیده مورد نظر غالب و یا تا حدود زیادی موثر بوده اند (مانند پدیده شکست سد). در مورد نحوه توزیع کسر حجمی در این روش، همچنان اصلاحاتی روی روش حجم سیال و بازسازی فصل مشترک انجام می گیرد [۶]. در این پژوهش، از نرم افزار فلوئنت برای شبیه سازی حرکت حباب در مجرای طویل استفاده شده است که برای جریان های جدا از روش حجم سیال بهره می گیرد.

۲-۱- صحت سنجی مدل عددی:

با توجه به این که نیروهای دخیل در حرکت حباب در جریان داخل مجرا و حباب تیلور یکسان هستند (اینرسی، کشش سطحی و نیروهای ناشی از لزجت یا تنش های برشی سیال)، جهت صحت سنجی مدل عددی از تست حباب تیلور از یکی از نتایج آزمایشات وایت و بردمور[۱۵] استفاده شده است. در این آزمایشات که توسط یوبینک[۱۳] نیز برای صحت سنجی مورد استفاده قرار گرفته است، معیار صحت سنجی سرعت نهایی صعود حباب تیلور و شکل نهایی آن است. شبکه به کار گرفته شده برای این شبیه سازی، برابر قطاعی از یک استوانه عمودی است که حباب در آب ساکن آن در اثر شناوری صعود می کند. در عمل و در آزمایشگاه، از سنجش زمان طی شدن یک فاصله مشخص برای برآورد سرعت متوسط حباب های هوا استفاده می شود، اما در مدل عددی چنین روشی چندان عملی نیست. برای تعیین زمان به ثبات رسیدن شرایط صعود حباب تیلور از تعریف یک انتگرال در کل قلمرو محاسباتی استفاده شده است:

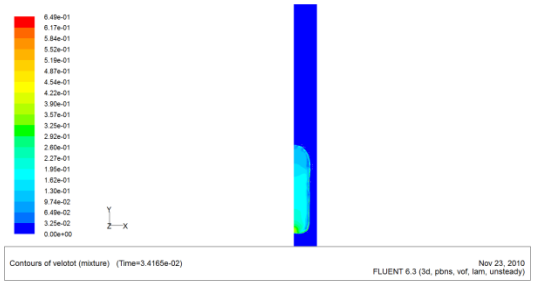
$$\int_{\text{کل قلمرو محاسباتی}} \alpha_{\text{هوا}} \times |\vec{U}|\, dv \qquad (۶)$$

هنگامی که مقدار این انتگرال در زمان ثابت شده باشد، به معنای رسیدن حباب به رفتار ثابت و نهایی خود است. در این زمان می توان به همین روش انتگرال های حجمی مولفه های سرعت را نیز برآورد نمود. با تقسیم این مقادیر به حجم حباب (که آن هم به همین روش به دست می آید)، می توان مقدار سرعت متوسط در هر جهت را برآورد نمود. با توجه به کانتورهای انتگرال تعریف شده در رابطه (۶)، می توان دید که مقدار آن در هر نقطه ای به جز حباب هوا صفر است. این موضوع در شکل (۳) نمایش داده شده است.

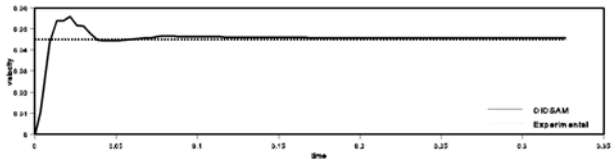
1 Continuum Surface Force

www.SID.ir

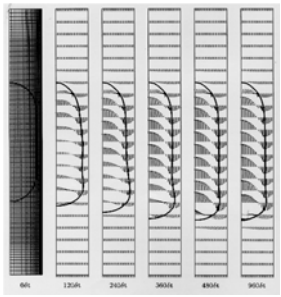
Archive of SID



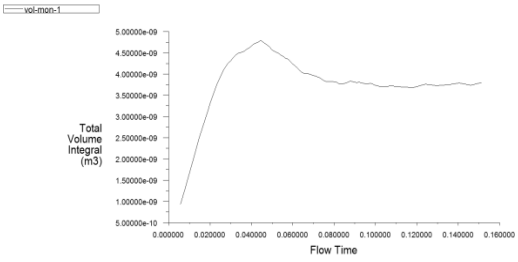
شکل (۳): کانتور ترسیم شده برای رابطه (۶)



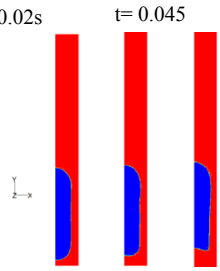
شکل (۴): نتیجه آزمایش عددی یوبینک[۱۳] در مقابل نتیجه وایت و بردمور [۱۵]که برآورد سرعت یکسانی را نشان می دهند.



شکل (۵): تکامل شکل نهایی حباب در مدل عددی یوبینک[۱۳]



شکل (۶): نمودار همگرایی اندازه سرعت و ثبات شرایط در پژوهش حاضر



شکل (۷): تکامل شکل نهایی حباب در پژوهش حاضر از t=۰/۰۲ تا t=۰/۰۴۵ ثانیه

مقدار نهایی به دست آمده برای انتگرال رابطه (۶) با جایگذاری سرعت قائم به جای تابع انتگرال و تقسیم بر حجم هوا، مقدار سرعت متوسط قائم را به دست می دهد. با مقایسه نتایج مشاهده می شود که از نظر برآورد مقدار سرعت نتایج دو مدل یکسان است، اما در شکل نهایی حباب اختلافی مشاهده می شود. این اختلاف به گوشه دار شدن انتهای حباب در پژوهش حاضر مربوط می شود. با توجه به نتایج مدل عددی یوبینک[۱۳]، وضعیت گوشه دار شدن انتهای حباب هوا مربوط به شرایطی با عدد مورتون پایین و تاثیر بسیار کم لزجت است. با توجه به این نتیجه و شواهد موجود در مراجع([۷] و [۱۳]) می توان گفت مدل حجم سیال موجود در فلوئنت، در برآورد تنش های برشی بین دو سیال عملکرد چندان خوبی ندارد.

۲-۲- مدل عددی در شبیه سازی حرکت حباب در مجرای کم شیب:

این شبیه سازی به منظور بررسی احتمال پدیده بازگشت حباب صورت می گیرد. برای فرآیند مدل سازی در پژوهش حاضر، مدل سازی ۱ کیلومتر از تونلی به قطر ۵/۵ متر، با شیب ۰/۰۵٪ و دبی ۳۶/۱ متر مکعب بر ثانیه به عنوان مبنای کار در نظر گرفته شده است. این تونل باید با آبگیری از مخزن سد کانی سیب در آذربایجان غربی آب مازاد آب سرشاخه های رودخانه زاب را به حوزه آبریز گدار چای و نهایتا به دریاچه ارومیه منتقل کند. این تونل در حال حاضر در دست طراحی می باشد. مسیر این تونل کاملا مستقیم و بدون انحنا و طراحی آن کاملا تحت فشار است.

برای برآورد خصوصیات زبری دیواره از جداول هیدرولیکی توصیفی استفاده می شود. در این جداول[۱] به عنوان ضریب زبری محتاطانه و حداقل برای سطوح بتنی با کیفیت و فلوم های با طول زیاد و مجرای بتنی ساخته شده با قالب فلزی روغن کاری، ضریب زبری مانینگ برابر ۰/۰۱۲ تعیین شده است. با توجه به گراف های موجود بین ضریب زبری مانینگ(n) و ضریب اصطکاک دارسی وایسباخ(f) [۳]، f برابر ۰/۰۱۵ به دست می آید.

در شبیه سازی حاضر، برای شیب ۰/۰۵٪ که متعلق به تونل کانی سیب است، از دبی طراحی موجود استفاده شده است. جهت بررسی میزان تاثیر شیب در وضعیت حرکت حباب، برای دو شیب ۰/۱٪ و ۰/۵٪ نیز با دبی های متفاوت مدل سازی انجام شده است. برای این دو شیب، دبی با توجه به گراف طراحی آبگذر های طولانی بتنی دایره ای با مقطع پر و با n=۰/۰۱۲ [۳] ، بر پایه طراحی موجود برآورد شده است. این دبی ها به صورت بی بعد

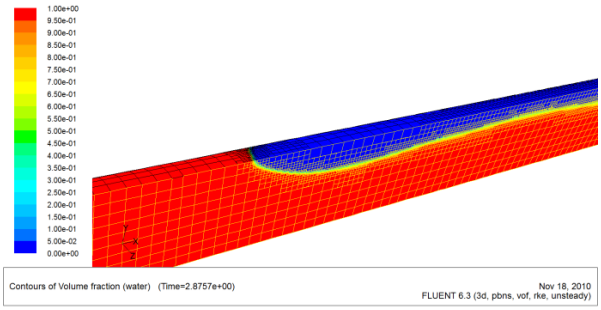
www.SID.ir

Archive of SID

در آمده و در مدل عددی اعمال می شوند.

موضوع با اهمیت دیگر، حجم محاسبات برای مدل سه بعدی است. به ازای هر سلول شبکه یک معادله پیوستگی، سه معادله مومنتوم، دو معادله آشفتگی، یک معادله تابع دیواره و یک معادله کسر حجمی به همراه معادلات سازگاری شبکه حل می شود که در تعداد زیاد سلول، حجم محاسبات را بسیار بالا می برد.

در اکثریت قریب به اتفاق مدل های عددی، کاهش گام های گسسته سازی زمانی و مکانی باعث افزایش دقت محاسبات می شود. اما این عمل هزینه محاسباتی را به سرعت بالا می برد. در این زمینه و در ارتباط با شبکه مکانی مسئله می توان از شبکه بندی سازگار استفاده کرد. این روش اجازه می دهد در نواحی خاصی از شبکه سلول ها ریزتر باشند. اغلب این ناحیه ها، مربوط به مناطق گرادیان های شدید یک متغیرند. به این ترتیب هر سلول شبکه بندی قبلی بر اساس روش سازگار نمودن شبکه، به تعدادی سلول ریزتر تقسیم می شود.این موضوع شبکه های بی سازمان پدید می آورد که باید در انتخاب روش حل مورد توجه قرار گیرد. روش های "ریز کردن سازگار مش" یا به اختصار AMR[1] می توانند با کمترین افزایش در هزینه محاسباتی دقت محاسبات را تاحد دلخواه بالا ببرند. هر چند کوچک کردن مش روی شرایط پایداری محاسبات [۱۴] و در نتیجه گام زمانی تاثیر می گذارد. در این پژوهش با توجه به ویژگی روش های CFS در پخش خواص فازها در فصل مشترک دوفاز، برای آنکه این توزیع روی سایر نواحی حل کمترین تاثیر را بگذارد، از روش AMR بر اساس گرادیان کسر حجمی استفاده می شود. به این ترتیب که هر کجا $\frac{\partial \alpha}{\partial x_i} \neq 0$ باشد، به معنای عوض شدن فاز و وجود فصل مشترک در آن نقطه است. این نرخ داخل هر فاز برابر صفر و روی فصل مشترک غیر صفر است. بنابراین می توان اندازه سلول های مستقر روی فصل مشترک را به مرتبه پایین تری از شبکه سایر نواحی کاهش داد. این موضوع علاوه بر افزایش وضوح فصل مشترک، اختلالات سرعت غیر واقعی را نیز در سطح موضعی نگه می دارد و تاثیر آن روی بقیه نقاط را کنترل می کند. این روش هرچند از افزایش تعداد کل سلول های قلمرو محاسباتی جلوگیری می کند، اما به ویژه در مواردی که تعداد گام های سازگاری بیشتر از یک و شبیه سازی سه بعدی باشد، موجب افزایش شدید سلول های فصل مشترک به صورت نمایی و به تبع آن تعداد کل سلول ها می شود. از این رو در این پژوهش از قید های مناسب استفاده شده است تا پس از عبور حباب از یک نقطه دوباره سلول ها در یک فاز قرار گرفته و کوچک شوند. در این جا معیار حد بالای گرادیان، ۰/۰۹ برای افزایش حجم و ۰/۲۱۹ برای کاهش حجم می باشد. شبکه سازگار در ناحیه فصل مشترک در شکل (۸) دیده می شود.



شکل (۸): سازگاری شبکه در ناحیه فصل مشترک

ناحیه دیگری که نیاز به توجه دارد، ناحیه نزدیک به دیواره است. هرچند با استفاده از توابع دیواره نیازی نیست تا معیارهای ارتفاع سلول مجاور دیواره مستقیما با توجه به y^+ برقرار شود، اما تابع دیواره استاندارد در نرم افزار فلوئنت با توجه به کمیت y^* تعریف می شود که تقریبا با y^+ مساوی است. روابط مربوط به تابع دیواره استاندارد از این قرارهستند:

$$U^* = \frac{1}{k}\ln(E\,y^*) \qquad (۷)$$

$$U^* = \frac{U_p C_\mu^{1/4} k_p^{1/2}}{\tau_w/\rho} \qquad (۸)$$

$$y^* = \frac{\rho C_\mu^{1/4} k_p^{1/2} y_p}{\mu} \qquad (۹)$$

معیار صحت رابطه لگاریتمی مربوط به برآورد سرعت در مجاورت دیواره این است که $۳۰ \leq y^+ \leq ۳۰۰$ برقرار باشد. با محاسبه مقدار y^+ با استفاده از روابط موجود [۴] و برای تونل به قطر ۵/۵ متر و دبی ۳۶/۱ متر مکعب بر ثانیه، مقدار ارتفاع سلول در بیشترین مقدار ممکن برای ارضای شرط صحت تابع دیواره برابر حدودا ۵ سانتی متر به دست می آید. این ابعاد برای اعمال در طول مشخصه سلول مجاور دیواره حتی با استفاده از سازگاری شبکه به معنای حدود ۵۰۰۰۰ سلول در مقطع

1- Adaptive Mesh Refinement

www.SID.ir

Archive of SID

مجراست.

در این مورد روش های سازگاری نیز کمک چندانی نمی کنند. این روش ها برای تغییر اندازه سلول های شبکه از توابع گام به گام در مکان استفاده می کنند. در هر گام از سلول ۶ وجهی مورد استفاده در این پژوهش، ۸ سلول ۶ وجهی کوچکتر تولید می شود. برای رسیدن به نتیجه مطلوب و وضوح فصل مشترک یا اندازه مناسب سلول مجاور دیوار، نیازبه سلول هایی کوچک تر از این نسبت داریم. از سوی دیگر اگر تعداد گام های سازگار کننده زیاد باشد، وجود سلول های بسیار بزرگ و بسیار کوچک در شبکه دیده می شود که می تواند منبع خطا یا واگرایی باشد. بنابراین می توان گفت ابعاد سلول های دور از دیواره نیز نمی تواند چندان رشد کند. بنابراین سلولهای موجود در سطح مقطع تونل بسیار پر تعداد خواهند بود و تکرار این تعداد در طول زیاد مجرا و با توجه به معادلات زیاد به ازای هر حجم کنترل، بررسی سه بعدی غیر دائم یک تونل طویل با ابعاد واقعی را کاملا غیر ممکن می سازد. برای رفع این مشکل، روشی برای کاهش معنادار ابعاد تونل مورد نیاز است. تحلیل ابعادی این روش را در اختیار ما می گذارد.

روش به کار گرفته شده در این پژوهش برای رفع این مانع کاهش ابعاد مجرا در مدل عددی به اندازه ۰/۰۱ ابعاد واقعی و برقراری تشابه ابعادی با توجه به عدد دبی بی بعد و فرود جریان است. با توجه به نتایج آزمایش های وایت و بردمور[۱۵] و راهنمای CAE [۹] می توان اصلی ترین نیروی جریان حباب در تونل را اینرسی در نظر گرفت. اعداد بی بعد مربوط به این نیرو، عدد فرود جریان و حباب و عدد دبی بی بعد هستند. این به معنای برابر بودن $\frac{Q^2}{gD^5}$ و $\frac{U}{\sqrt{gD}}$ (فرود جریان) و $\frac{V}{\sqrt{gD}}$ (فرود حباب) در هندسه مدل و هندسه اصلی است. در این باره لازم است توجه شود که:

الف) عدد N_f در تونل اصلی در حدود ۴×۱۰^{۷} و در مدل عددی برابر ۴×۱۰^{۴} و در هر دو از ۳۰۰ بزرگ تر است.

ب) عدد ایتوس در تونل در حدود ۴×۱۰^{۶} و در مدل حدود ۴۰۰ است و در هر دو از ۱۰۰ بزرگتر می باشد.

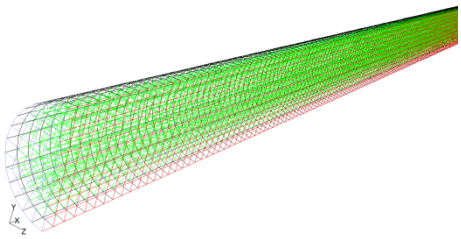
ج) عدد مورتون در تونل و مدل از مرتبه $۱۰^{-۱۱}$ است و در ناحیه عدم تاثیر لزجت قرار دارد.

بر این اساس، مدل عددی شامل یک مجرا به قطر ۵/۵ سانتی متر و طول ۱۰ متر است که از نظر دبی بی بعد و عدد فرود با مجرای اصلی در تشابه است. مقدار مشخصه طول برابر قطر مجراست.

در این راه با توجه به تنظیمات نرم افزار از روش های QUICK برای حل مومنتوم،Body force weighted برای فشار، CICSAM برای بازسازی فصل مشترک و مدل آشفتگی k-ε به همراه تابع دیواره استاندارد استفاده می شود. شرط پایداری محاسبات برابر ۰/۱ است، گسسته سازی زمانی صریح[1] است و از ۳ مرحله سازگاری در فصل مشترک استفاده می شود.

برای ناحیه ورودی آب از شرط دبی ثابت استفاده می شود. با توجه به آن که هد حداقل رقوم آبگیری طرح فرازآب تونل کانی سیب ۱/۷۸ برابر قطر مجرا بوده است، این نسبت در هد فشار ورودی در نظر گرفته می شود و سپس با استفاده از رابطه دارسی وایسباخ، مقدار افت فشار در یک کیلومتر محاسبه شده و به عنوان شرط فشار ثابت در خروجی گذاشته می شود. در این حالت، پاسخ جواب حالت دائم به دست می آید و از آن به عنوان شرط اولیه استفاده می شود. حباب های هوا با حجم مختلف از یک ورودی به داخل مجرا وارد می شوند و پس از آنکه به حجم مد نظر رسیدند، ورود هوا قطع می شود و روند به تعادل رسیدن آن آغاز می گردد.

از نیمی از مجرای دایره ای (به علت تقارن) به عنوان محدوده محاسباتی استفاده شده است که در شکل (۹) نمایش داده شده است.



شکل (۹): شبکه به کار رفته در مدل حرکت حباب

با توجه به مطالعات شرح داده شده در فصل ۲، حرکت حباب هوا تحت تاثیر فرود جریان، شیب مجرا، اندازه حباب و نیرو های سطحی است. عدد فرود جریان در اینجا ناشی از دبی جریان است که با توجه به شیب برآورد

1- Explicit

www.SID.ir

Archive of SID

شده است. در هر شیب، برای ۵ حجم متفاوت حباب هوا، اجرای برنامه صورت گرفته است. مقادیر دبی و حجم حباب هوا در شیب های مختلف در جدول های (۱) و (۲) نشان داده شده اند.

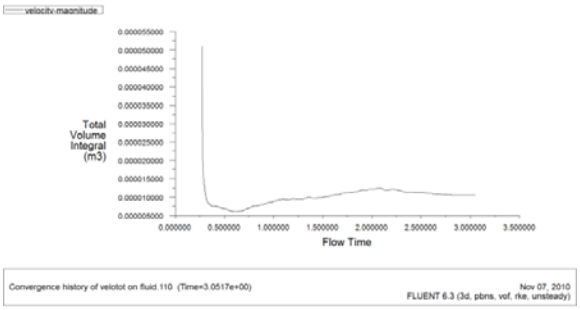
۳- نتایج شبیه سازی

هدف از شبیه سازی حرکت حباب های کشیده در مجرای طویل، بررسی این موضوع بوده است که آیا در شیب و دبی کم این نوع مجاری، امکان کاهش شدید سطح مقطع یا بازگشت حباب وجود دارد یا خیر. اشاره شد که با افزایش شیب مقاومت حباب های هوا در برابر حرکت به همراه جریان آب افزایش می یابد. اهمیت تاثیر حباب روی سطح مقطع جریان آن است که در صورت کاهش شدید مقطع جریان، امکان افزایش سرعت آب و کاویتاسیون موجود است. باز گشت حباب نیز همان طور که ذکر شد، می تواند باعث صدمات مخرب در مجرا باشد. برآورد سرعت حباب در مجرا نیز مشابه حباب تیلور در صحت سنجی بوده است و از طریق اندازه گیری انتگرال رابطه (۶) در زمان و یافتن مقادیر متوسط مولفه های سرعت صورت می گیرد. (شکل ۱۱)

نتایج نشان می دهند که حباب های هوا به علت تمایل به حرکت در بخش کم فشار مجرا، در بخش فوقانی آن قرار گرفته و در طول مجرا و ناحیه کم فشار فوقانی گسترش پیدا می کنند (شکل۵-۵). این امر به معنای افزایش بعد طولی آنها در برابر کاهش سطح مقطع است. با افزایش حجم حباب این رفتار تغییری نمی کند و همچنان تمایل به گسترش طولی حفظ می شود.

افزایش حجم حباب ها تاثیر اندکی روی سطح مقطع هوا دارد، زیرا توزیع حجم به صورت طولی انجام می گیرد. نتایج سرعت های برداشت شده حباب ها نمایانگر همراهی آنها با جریان است. این نتایج در جدول های شماره (۳) و (۴)و (۵) نمایش داده شده اند.

شکل (۱۰): نمای تغییر شکل حباب هوای شماره ۱ در زمان در شیب ۰/۵٪ از بالا (بخش متقارن اضافه شده است)



شکل (۱۱): نمونه همگرایی سرعت در نمونه ۲ شیب ۰/۰۰۵

با استفاده از نتایج موجود در جداول (۳) تا(۵) می توان ادعا کرد که با افزایش شیب، فاصله سرعت حرکت حباب ها با سرعت جریان اندکی بیشتر می شود. در واقع تاثیر شناوری در شیب بیشتر، کمی افزایش می یابد. با افزایش حجم حباب سرعت همراهی آن با جریان اندکی کاهش می یابد، زیرا مولفه شناوری بیشتر شده است.

با نگاهی کلی به نتایج سرعت های به دست آمده می توان گفت که تاثیر عدد فرود جریان بسیار بیشتر از سایر موارد است و فرود حباب بیش از هر چیز تابع فرود جریان است.

لازم به ذکر است که تعداد سلول های ۱۵ مورد شبیه سازی عددی، در ابتدای کار به طور متوسط در حدود ۶۰۰۰۰ عدد بوده اند و پس از اعمال سازگاری شبکه در ناحیه فصل مشترک به طور متوسط به حدود ۲۵۰۰۰۰عدد رسیده اند. زمان شبیه سازی هر ثانیه نیز بر روی پردازشگر ۳/۶ GHz به طور متوسط در حدود ۲۰ ساعت بوده است.

جدول (۱): دبی در شیب های مختلف

سرعت در مدل عددی (m/s)	سرعت بی بعد آب	سرعت اصلی آب (m/s)	دبی در مدل عددی (m^3/s)	دبی بی بعد	دبی اصلی (m^3/s)	قطردر مدل عددی(m)	قطر اصلی(m)	شیب
۰/۱۵۲	۰/۲۰۷	۱/۵۲	۳۶/۱ E -۴	۰/۰۲۶	۳۶/۱	۰/۰۵۵	۵/۵	٪۰/۰۵
۰/۱۹۲	۰/۲۶۱	۱/۹۲	۴۵/۳ E -۴	۰/۰۴۱	۴۵/۳	۰/۰۵۵	۵/۵	٪۰/۱
۰/۳۸۴	۰/۵۲۲	۳/۸۴	۹۱/۳ E -۴	۰/۱۶۹	۹۱/۳	۰/۰۵۵	۵/۵	٪۰/۵

www.SID.ir

Archive of SID

جدول (۲): حجم حباب های هوا در سه شیب

شیب	حجم۱(m^3)	حجم۲(m^3)	حجم۳(m^3)	حجم۴(m^3)	حجم۵(m^3)
٪۰/۰۵	۳/۱۶ E -۵	۸/۱۲ E -۵	۱/۵۹ E -۴	۲/۰۷ E -۴	۲/۵۴ E -۴
٪۰/۱	۱/۶۲ E -۵	۲/۷۳ E -۵	۴/۵۱ E -۵	۶/۸۴ E -۵	۱/۷۵ E -۴
٪۰/۵	۱/۲۹ E -۵	۲/۵۱ E -۵	۴/۱۳ E -۵	۶/۶۶ E -۵	۱/۴۵ E -۴

جدول شماره (۳): سرعت های برآورد شده در شیب ۰/۰۵٪ و دبی بی بعد۰/۰۲۶

شماره	حجم معادل در تونل(m^3)	سرعت برداشت شده(m/s)	سرعت بی بعد	سرعت معادل در تونل(m/s)
۱	۳۱/۵	۰/۱۳۸	۰/۱۸۸	۱/۳۸
۲	۸۱/۵	۰/۱۳۶۳	۰/۱۸۵	۱/۳۶
۳	۱۵۸/۸	۰/۱۳۶۵	۰/۱۸۶	۱/۳۶
۴	۲۰۷	۰/۱۳۵	۰/۱۸۴	۱/۳۴
۵	۲۵۴/۲	۰/۱۳۴	۰/۱۸۲	۱/۳۴

جدول شماره (۴): سرعت های برآورد شده در شیب ۰/۱٪ و دبی بی بعد۰/۰۴۱

شماره	حجم معادل در تونل(m^3)	سرعت برداشت شده(m/s)	سرعت بی بعد	سرعت معادل در تونل(m/s)
۱	۱۶/۲	۰/۱۵۰	/۲۰۴	۱/۵
۲	۲۷/۳	۰/۱۵۵	۰/۲۱۱	۱/۵۵
۳	۴۵/۱	۰/۱۵۵	۰/۲۱۱	۱/۵۵
۴	۶۸/۴	۰/۱۴۲	۰/۱۹۳	۱/۴۲
۵	۱۷۵	۰/۱۴۰	۰/۱۹۱	۱/۴

جدول شماره (۵): سرعت های برآورد شده در شیب ۰/۵٪ و دبی بی بعد ۰/۱۶۹

شماره	حجم معادل در تونل(m^3)	سرعت برداشت شده(m/s)	سرعت بی بعد	سرعت معادل در تونل(m/s)
۱	۱۲/۹	۰/۲۹۶	/۴۰۳	۲/۹۶
۲	۲۵/۱	۰/۲۸۱	۰/۳۸۳	۲/۸۱
۳	۴۱/۳	۰/۲۶۱	۰/۳۵۵	۲/۶۱
۴	۶۶/۶	۰/۲۵۴	۰/۳۶۴	۲/۵۴
۵	۱۴۵	۰/۲۵۲	۰/۳۴۵	۲/۵۲

٤- نتیجه

● رفتار حباب ها در این مجاری نشان میدهد که دو موضوع کاهش شدید سطح مقطع و یا بازگشت حباب در شیب های نزدیک به افقی و دبی های ذکر شده رخ نمی دهد. اصلی ترین عامل موثر روی رفتار حباب در شیب کم، عدد فرود است. دبی های اعمال شده در این پژوهش با توجه به شکل (۱) مقادیر کمی دارند. بنابراین می توان گفت با افزایش دبی (و به تبع آن عدد فرود جریان)، میزان سرعت حباب هوا افزایش می یابد و بازگشت حباب رخ نمی دهد. مقادیر به دست آمده برای سرعت نیز موید همراهی بسته هوایی با جریان آب می باشند و تا بازگشت در خلاف جهت جریان (مقدار منفی) فاصله زیادی دارند.

● افزایش شیب و حجم حباب تاثیر کمی روی رفتار حباب ها دارد. هر اندازه حجم حباب افزایش یابد، تمایل آن برای همراهی با جریان اندکی کاهش می یابد. با ۱۰ برابر افزایش شیب این موضوع تشدید می شود و اختلاف سرعت جریان و حباب در شیب ۰/۵٪ از شیب ۰/۰۵٪ بیشتر است. همچنین در شیب ۰/۵٪ حساسیت به افزایش حجم اندکی از شیب ۰/۰۵٪ بیشتر است که به دلیل افزایش

www.SID.ir

Archive of SID

تاثیر نیروی شناوری تحت تاثیر افزایش شیب می باشد.

• با توجه به عملکرد روش حجم سیال در ناحیه فصل مشترک و برآورد تنش های برشی، در پژوهش حاضر این امکان وجود دارد که نتایج کمی (مقادیر سرعت) نسبت به نتایج کیفی (عدم وقوع پدیده بازگشت حباب) دارای اختلاف با مقدار واقعی باشند.

۵- مراجع

[۱] ابریشمی، جلیل؛ حسینی، محمود؛ "**هیدرولیک کانال های باز**"، موسسه چاپ و نشر آستان قدس رضوی، ۱۳۷۶.

[۲] بهلولی، اصغر؛ برقعی، سید محمود؛ "**مدل شبیه سازی عددی جریان دوفاز با اختلاف چگالی بالا**"، مجموعه مقالات چهارمین کنگره مهندسی عمران، جلد چهارم، دانشگاه تهران، اردیبهشت ۱۳۸۷

[۳] شمسایی، ابوالفضل؛ "**طراحی و ساخت سدهای مخزنی (تاسیسات هیدرولیکی)**"، مرکز نشر دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۸۲.

[۴] شیمز، ایروینگ هرمن؛ انتظاری، علیرضا؛ "**مکانیک سیالات**"، نشر نوپردازان، ۱۳۸۲.

[۵] Benjamin, T. B; "**Gravity currents and related phenomena**". J. Fluid Mech., Vol. 31, pp. 209-248, 1968

[۶] Bohluly, A; Borghei, S. M; Saidi, M. H; "**A new method in two phase flow modeling of a non-uniform grid**", J. Scientica Iranica, Sharif University of Technology, Vol.16, No.5, 2009

[۷] Carlson, A; "**Numerical simulation of slug flow in micro channels**", M.S Thesis, Department of Energy and Process Eng. The Norwegian University of Science and Technology, 2007.

[۸] Falvey, H. T, "**Air-water flow in hydraulic structures**", Eng. Monograph, No. 41. US Department of the Interior, Water and Power Resources Service, 1980

[۹] Jamet, D; Lebaigue, O; Lemonnier, H; "**Test-cases for interface tracking methods** (Preliminary version of April 2004)", CAE, Grenoble

[۱۰] Kalinske, A. A; Robertson, J. M; "**Closed conduit flow**", Trans,. Am. sot. Civ. Eng., Vol. 108, pp. 1435- 1516, 1943

[۱۱] Nicklin, J; Wilkes, J. O; Davidson, J. F; "**Two-phase flow in vertical tubes**", Trans. Inst. Chem. Eng.,Vol. 40, pp. 61-68, 1962.

[۱۲] Taitel, Y; Duckler, A. E; "**A model for prediction flow regime transition in horizontal and near horizontal liquid flow**", AIChE, Journal, Vol.22, No.1, pp.47-55.

[۱۳] Ubbink, O; "**Numerical prediction of two fluid systems with sharp interface**", PHD Thesis, Department of Mechanical Eng. Imperial College of science, Technology and Medicine, 1997

[۱٤] Versteeg, H. K; Malalasekera, W; "**An Introduction to computational fluid dynamics, the finite volume methods**", Longman Scientific & Technical, Essex, England, 1995

[۱٥] White ,E. T; Beardmore, R. H; "**The velocity of rise of single cylindrical air bubbles through liquids**", J. Chemical Engineering Science, Vol. 17, pp. 351-361, 1962.

[۱٦] Yamada, Y; Goto, Y; Endo, Sh; "**Characteristics of flow distribution of ags-liquid slug flow in the long conduits**", Report of the research institute of industrial Technology, Nihon University.

www.SID.ir