



شبیه‌سازی عددی الگوی جریان لخته‌ای در کانال‌های T شکل به روش حجم سیال

محمدرضا انصاری^{1*}، سحر رفیعی اصل²، نیما سام‌خانیانی³

1- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

3- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* تهران، صندوق پستی 14115-143، mra_1330@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 09 تیر 1394

پذیرش: 03 مرداد 1394

ارائه در سایت: 03 شهریور 1394

کلید واژگان:

الگوی جریان لخته‌ای

اتصال T شکل تقسیم‌کننده

روش حجم سیال

اوپن فوم

چکیده

در مطالعه حاضر به بررسی الگوی جریان دوفازی لخته‌ای در اتصال T شکل تقسیم‌کننده منشعب در دو گروه منظم و نامنظم پرداخته شده است. شبیه‌سازی صورت گرفته توسط نرم‌افزار متن‌باز اوپن‌فوم، با استفاده از روش یک سیالی و مدل حجم سیال (VOF) به تعقیب سطح مشترک جریان دو فازی مایع-گاز پرداخته شده است. شرط مرزی سرعت ثابت برای ورودی، فشار ثابت برای مرزهای خروجی و شرط مرزی عدم لغزش برای دیواره‌ها در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه الگوی جریان لخته‌ای یکی از پیچیده‌ترین الگوهای جریان دو فازی است که نوسانات ناشی از آن می‌تواند صدمات جبران‌ناپذیری را به تجهیزات موجود در پایین‌دست وارد کند، تمرکز اصلی تحقیق حاضر به بررسی کاهش الگوی جریان لخته‌ای با استفاده از اتصال T شکل است. استنتاج شده است که با استفاده از تقاطع، دامنه نوسانات فشار و سرعت کاهش می‌یابد. اگرچه ورودی شاخه عمودی با ابعاد سطح مقطع $5 \times 5 \text{ cm}^2$ ، در کاهش لخته‌های بالادست به طور کامل موثر نیست، با این حال با افزایش ابعاد ورودی شاخه جانبی عمودی از $5 \times 5 \text{ cm}^2$ به $10 \times 5 \text{ cm}^2$ و $20 \times 5 \text{ cm}^2$ نوسانات فشار جریان دو فازی در کل کانال کاهش یافته و محدوده جریان لخته‌ای در پایین‌دست کاهش و گستره جریان تویی افزایش می‌یابد. همچنین به منظور اثبات درستی شبیه‌سازی عددی، به صحت‌سنجی مدل‌سازی حاضر با کارهای انجام شده معتبر قبلی پرداخته شد که توافق خوبی را بین نتایج نشان می‌دهد.

Numerical simulation of slug flow pattern in T junction using volume of fluid method

Mohammad Reza Ansari*, Sahar Rafiei Asl, Nima Samkhaniani

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

* P.O.B. 14115- 143 Tehran, mra_1330@modares.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 30 June 2015

Accepted 25 July 2015

Available Online 25 August 2015

Keywords:

Slug flow regime

dividing T-junction

Volume of fluid method

OpenFOAM

ABSTRACT

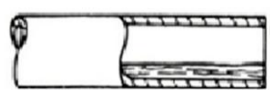
In this research two-phase slug flow regime in a T-junction branching divider is examined in two regular and irregular groups. Simulation is accomplished by OpenFOAM™ open source software. Simulation uses single fluid with volume of fluid (VOF) method to follow gas-liquid two-phase flow interface. Constant velocity boundary condition for inlet, constant pressure for outlet boundaries and no slip boundary condition are considered for fixed walls. Since slug flow regimes are one of the most complex two-phase flow regimes whose behavior could result in serious damages to the downward equipment, the present research concentrates on the examination of slug flow behavior in the downstream of the T-junction. This study has concluded that using T junction eliminates flow fluctuation so the pressure and air velocity values decrease. Although the inlet of the vertical branch with cross section of $5 \times 5 \text{ cm}^2$ is not fully effective in decreasing upward slugs, with the size of the inlet vertical side-branch from $5 \times 5 \text{ cm}^2$ to $10 \times 5 \text{ cm}^2$ and $20 \times 5 \text{ cm}^2$, pressure value of two-phase flow in the whole duct decreases. The consequences are the slug flow decreases in downstream but the plug flow rises which means the objectives of the research have been accomplished. To verify the numerical results, comparison was made with the well justified previous works. The agreement was encouraging.

1- مقدمه

رسانش می‌باشند. وقتی این دو سیال در یک کانال جریان پیدا می‌کنند، بسته به میزان دبی آب و هوا و اساساً به دلیل خواص فیزیکی متفاوت دو سیال، الگوها و اشکال مختلفی در سطح مشترک دو فاز ایجاد می‌شود که به الگو یا رژیم جریان¹ موسوم هستند.

امروزه با توسعه صنعت نفت و گاز، برای بهره‌برداری از مخازن زیردریایی، مطالعه تکنولوژی حمل‌ونقل جریان‌های دو فازی نقش بسزایی پیدا کرده است. در چنین جریان سیالاتی، دو سیال به طور همزمان در کنار هم در حال حرکت هستند، که غالباً دارای خاصیت فیزیکی متفاوت از قبیل دما، چگالی و

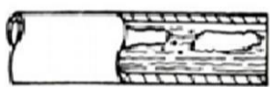
1- Flow Regime



شکل 1- الف



شکل 1- ب



شکل 1- ج



شکل 1- د

شکل 1 الگوهای جریان دو فازی در کانال افقی (الف: لایه‌ای، ب: موجی، ج: تویی، د: لخته‌ای)

اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی برای همان محدوده آزمایش شده معتبر هستند، درحالی‌که حل‌های عددی چنین محدودیتی ندارند.

از جمله روش‌های عمده در شبیه‌سازی جریان‌های دو فازی، روش یک سیال⁵ و روش دو سیال⁶ است. روش یک سیال به عنوان روش مستقیم حل جریان دو فاز شناخته می‌شود [2]. در این روش با حل معادله جابه‌جایی، حرکت سطح مشترک به طور مستقیم بدست می‌آید. این روش تنها نیاز به حل یک دسته از معادلات پایستاری برای حل هر دو فاز دارد.

روش‌های متنوعی برای تعیین موقعیت سطح مشترک دو فاز وجود دارد. این روش‌ها به دو زیرگروه روش‌های اویلری همچون: روش حجم سیال⁷ [3]، روش سطوح هم‌تراز⁸ [4] و روش‌های لاگرانژی: روش ردیابی پیشانی⁹ [5] تقسیم می‌شوند.

روش حجم سیال (VOF) بر اساس نحوه پیگیری سطح به دو دسته عمده تقسیم می‌شوند: (1) تعقیب سطح از طریق بازسازی سطح (2) تعقیب سطح از طریق فشردگی سطح و استفاده از روش‌های درجه بالا¹⁰ [6].

2- مروری بر تحقیقات پیشین

الگوی جریان لخته‌ای در دامنه‌های وسیعی از نرخ‌های جریان دو فازی وجود دارد. موج‌های مشاهده‌شده در ناحیه الگوی جریان موجی، به اندازه کافی برای پر کردن لوله رشد کرده و لخته‌هایی از مایع تشکیل داده و جریان گاز را مسدود می‌کنند. اکثر مطالعات انجام شده در زمینه الگوی جریان لخته‌ای را کانال‌های افقی تشکیل می‌دهد، که برخی از آن‌ها به شرح زیر است:



شکل 2 طرحواره‌ای از اتصال T شکل

جهت لوله به دلیل تأثیر زیاد جاذبه بر فاز مایع، تأثیر مهمی در الگوی جریان ایجاد می‌کند [1]. بدیهی است که تعداد کثیری از عوامل موثر بر الگوی جریان دو فازی وجود دارند اما این عوامل را می‌توان در دو گروه که به جهت لوله مربوط می‌شوند، یعنی افقی و عمودی، تقسیم‌بندی کرد. در ادامه به تشریح الگوهای جریان دو فازی در کانال افقی پرداخته شده است.

در سرعت‌های خیلی پایین مایع و گاز، فاز گازی در قسمت فوقانی و فاز مایع در قسمت تحتانی کانال جریان دارند و سطح مشترک دو فاز مجزای گاز و مایع تقریباً صاف است. در این حالت در اصطلاح جریان لایه‌ای خواهد بود (شکل 1- الف).

با افزایش سرعت گاز در جریان لایه‌ای، موج‌هایی در سطح مشترک شکل گرفته و الگوی جریان موجی را تشکیل می‌دهند. اندازه دامنه موج‌ها وابسته به سرعت نسبی فازها است. قله‌ی موج‌ها به قسمت فوقانی کانال نمی‌رسد (شکل 1- ب) و موج‌ها درحالی‌که فیلم نازکی از مایع را در پشت خود وامی‌گذارند، از طرفین کانال بالا می‌روند.

با افزایش سرعت گاز، بسته‌های گاز که به شکل حباب‌های کشیده شده و گاهی بسیار بلند هستند و معمولاً اندازه‌های متفاوت دارند، در اثر ادغام تعداد زیادی حباب‌ها بصورت متناوب به وجود می‌آیند. قطر حباب‌های بلند کمتر از قطر کانال بوده و فاز مایع در امتداد قسمت پایین کانال و زیر حباب‌های بلند کشیده شده، جاری است. الگوی جریان مذکور به الگوی جریان تویی معروف است (شکل 1- ج).

در سرعت‌های بالای گاز، قطر حباب‌های کشیده شده به اندازه قطر کانال نزدیک می‌شود و لخته‌های مایع که معمولاً کف‌آلود¹ هستند، بصورت متناوب تشکیل می‌شوند و با سرعت زیاد در کانال بصورت الگوی جریان لخته‌ای حرکت می‌کنند. تشکیل جریان لخته‌ای به صورتی است که با رشد موج‌های ایجادشده در سطح مشترک دو فاز و رسیدن به سطح بالایی کانال، جریان گاز مسدود شده و مایع جلوی خود را جمع می‌کند (شکل 1- د).

جریان لخته‌ای یکی از پیچیده‌ترین الگوهای جریان دو فازی است که به واسطه طبیعت آشفته و متناوب خود، همچنین پر کردن تمام مقطع عرضی کانال، قابل تشخیص است. رفتار متناوب این الگوی جریان، باعث ایجاد نوسانات در فشار و نرخ جریان می‌شود و از نظر طراحی لازم خواهد بود برای کنترل آن از دریچه‌ها، اریفیس² و یا تقاطع T شکل استفاده شود. در مطالعه حاضر به دلیل رفتار نوسانی الگوی جریان لخته‌ای و احتمال بروز خطرات ناشی از این الگوی جریان در تجهیزات پایین‌دست، به بررسی کاهش الگوی جریان مذکور با استفاده از اتصال T شکل پرداخته شده است.

اتصال T شکل به طور ساده، یک اتصال بین سه عدد لوله است که با زوایای 0، 90 و 180 درجه به هم متصل شده‌اند (شکل 2). این اتصال به دو دسته‌ی تقسیم‌کننده³ و ترکیب‌کننده⁴ جریان تقسیم می‌شود.

برای بررسی مسائل جریان دو فازی روش‌های تجربی، تحلیلی و عددی وجود دارد، که اکثر مطالعات بصورت آزمایشگاهی انجام شده است. مسائل جریان دو فازی برای مدل‌سازی جهت حل عددی، مشکلاتی دارند که عرصه را برای چنین حل‌هایی محدود کرده‌اند. از جمله مشکلات موجود در این مسائل، وجود سطح مشترک در بین سیالات است. این سطح مشترک سبب ناپیوستگی در کمیت‌ها در مرز مشترک می‌شود، این ناپیوستگی‌ها مدل‌سازی و اعمال شرایط مرزی را سخت و پیچیده می‌کنند. از طرفی نتایج

5- One Fluid method
6- Two Fluid method
7- Volume of fluid
8- Level Set Method
9- Front tracking Method
10- High Order Scheme

1- Frothy
2- Orifice
3- Dividing
4- Combining

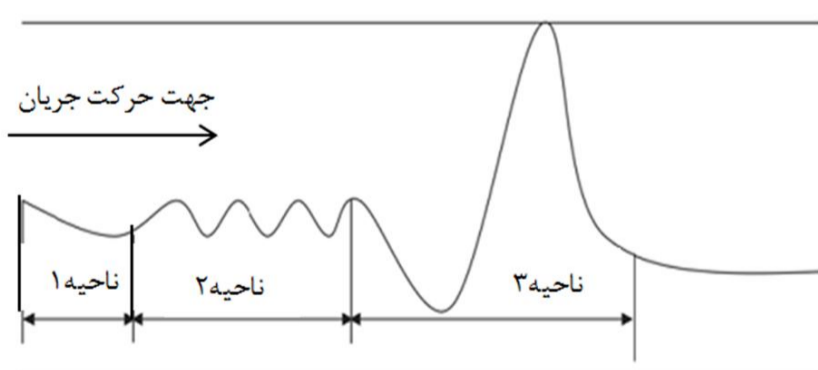
شاخه‌های اتصال برای پیش‌بینی توزیع فاز و افت فشار با در نظر گرفتن الگوی جریان دو فازی قبل از اتصال ارائه دادند و نتایج کار خود را با داده‌های آزمایشگاهی دیگر محققان مقایسه کردند. استنتاج شد که کارایی جداسازی در اتصال T شکل بطور عمده به مومنتوم فاز، الگوهای جریان موجود قبل از اتصال و نیروهای گرانشی بستگی دارد. ایشان در کار خود دامنه بسیار محدودی از الگوی جریان لخته‌ای را در نظر گرفتند.

بهزاد صادقی [13] در پایان‌نامه کارشناسی ارشد خود، با تعبیه اتصال T شکلی در کانال افقی به طول 36m در دو موقعیت متفاوت، به بررسی کاهش الگوی جریان لخته‌ای پرداختند. همچنین تأثیر اتصال T شکل را بر روی سایر الگوهای جریان دو فازی مایع-گاز بررسی کردند و استنتاج شد که استفاده از اتصال T شکل تأثیر زیادی در جابه‌جایی مرزهای جریان در ناحیه پایین دست اتصال دارد. همچنین با دور شدن از اتصال گستره الگوی جریان موجی کاهش می‌یابد و الگوی لایه‌ای و لخته‌ای تا سرعت‌های بالاتری از هوا وجود دارد. همچنین با افزایش سطح مقطع ورودی بازو، اثر میراکنندگی تقاطع بر الگوی جریان لخته‌ای افزایش پیدا می‌کند.

رن و همکاران [14]، جریان لخته‌ای را در اتصال T شکلی با قطر 0/005m بصورت آزمایشگاهی مطالعه کردند. آن‌ها تجزیه تحلیل تقسیم فاز را برای چهار سرعت فاز گازی و چهار سرعت فاز مایع مختلف که محدوده الگوی جریان لخته‌ای را شامل می‌شد، بررسی کردند. استنتاج شد که میزان توزیع درهم¹ فاز برای الگوی جریان لخته‌ای در اتصال T شکل با قطر کوچکتر، کم‌تر است، تفاوت معناداری بین تقسیم فازی الگوی جریان لخته‌ای و الگوی جریان حلقوی در اتصال T شکل با اندازه یکسان وجود دارد.

داس ریس و گلدستین [15] بصورت آزمایشگاهی به مطالعه تقسیم الگوی جریان لخته‌ای در اتصال T شکل تقسیم‌کننده افقی پرداختند. در مطالعه ایشان جریان دو فازی آب-هوا در اتصال T شکلی به قطر 3/4cm با طول 10m جریان داشت. آن‌ها در انتخاب شرایط و سرعت جریان از نقشه الگوی جریان تایتل و داکلر [16] استفاده کردند. آن‌ها در آزمایش خود بخش‌های مختلف یک واحد از الگوی جریان لخته‌ای را، متشکل از حباب‌های بلند² کشیده شده و لخته دانستند. نتیجه گرفتند که تجمع فاز مایع در شاخه اصلی بین محل اتصال و شیر کنترل، باعث جریان یافتن فازهای گاز و مایع در شاخه جانبی، افزایش سرعت جریان و افت فشار از ورودی تا شاخه جانبی و افزایش فشار از ورودی تا شاخه اصلی می‌گردد و بعد از محل اتصال الگوهای جریان لخته‌ای، پلاگ و موجی تحت شرایط حالت پایدار در قسمت پایین دست تشکیل می‌شود.

در مطالعه حاضر با شبیه‌سازی عددی به مطالعه الگوی جریان دو فازی لخته‌ای در اتصال T شکل تقسیم‌کننده منشعب برای دو گروه منظم و نامنظم پرداخته شده است. شبیه‌سازی صورت گرفته با مدل حجم سیال (VOF) به



شکل 3 طرح‌واره شکل‌گیری الگوی جریان لخته‌ای [7]

1- Maldistribution
2- Elongated Bubble

انصاری [7]، بیان کرد که وقتی گاز بر سطح مایع صاف جریان می‌یابد، تعدادی امواج با طول موج کوتاه در سطح مشترک ایجاد می‌شود. یکی از این امواج با طول موج کوتاه رشد نموده و لخته‌ای با طول موج بلند را ایجاد می‌کند. انصاری جریان لخته‌ای را به طور تجربی در کانال مستطیلی به طول 10m و سطح مقطع $10 \times 5 \text{ cm}^2$ ، بررسی کرد. ایشان نتیجه گرفت که یک واحد موج جریان لخته‌ای از سه ناحیه تشکیل شده است (شکل 3).

ادیبی و انصاری [8]، اثر سرعت‌های ظاهری گاز-مایع ورودی و برای نخستین بار اثر کسر حجمی مایع بر محل آغاز الگوی لخته‌ای در جریان دو فازی آب و هوا بصورت تجربی بررسی و روابط تجربی برای محاسبه محل آغاز الگوی جریان لخته‌ای ارائه دادند. آزمایش‌های ایشان در سه کسر حجمی مایع 0/25، 0/5 و 0/75، در یک کانال افقی با مقطع مستطیلی به ابعاد $10 \times 5 \text{ cm}^2$ و طول 36m از جنس پلکسی گلاس انجام شده بود. محدوده سرعت ظاهری آب 0/11-0/56m/s و سرعت ظاهری هوا 1/8-13m/s بود. نتایج آزمایش‌های آن‌ها نشان داد، در کسر حجمی مایع 0/25، وابستگی محل آغاز به تغییرات سرعت ظاهری گاز و مایع به صورت صعودی است. در کسر حجمی مایع 0/5، محل آغاز الگوی لخته‌ای با تغییرات سرعت ظاهری گاز و مایع نسبت مستقیم دارد اما تغییرات آن نسبت به کسر حجمی مایع 0/25 کمتر و ملایم‌تر است. در کسر حجمی مایع 0/75، وابستگی محل آغاز به تغییرات سرعت ظاهری گاز و مایع به صورت نزولی است.

ادیبی و همکاران [9]، به تعیین فرکانس الگوی جریان لخته‌ای در کانال افقی طویل به روش تجربی پرداختند. کسر حجمی مایع در آزمایش‌های ایشان 0/75 در کانال افقی با مقطع مستطیلی به ابعاد $10 \times 5 \text{ cm}^2$ به طول 36m بود. ایشان اندازه‌گیری فرکانس را در سه مکان از ورودی کانال انجام دادند و استنتاج شد که در تمامی حالت‌های آزمایش، کمینه فرکانس در کمترین سرعت ظاهری مایع و بیشینه آن در بیشترین سرعت ظاهری مایع رخ می‌دهد. با افزایش ضریب لغزش، فرکانس الگوی جریان لخته‌ای کاهش می‌یابد. در سرعت‌های بالای فاز مایع، فرکانس الگوی جریان لخته‌ای در کانال افزایش می‌یابد. تأثیر سرعت ظاهری گاز بر فرکانس الگوی جریان لخته‌ای در هر سرعت ظاهری مایع، کاهش‌ی است و حرکت لخته در پایین دست کانال، سریع‌تر و با شتاب بالاتری انجام می‌گیرد.

انصاری و همکاران [10] جریان دو فازی لخته‌ای را در کانال افقی شبیه‌سازی عددی کردند. در شبیه‌سازی از روش حجم سیال استفاده و بدین منظور معادلات بقای جرم، مومنتوم و معادله جابه‌جایی کسر حجمی را اعمال کردند. ایشان از شبیه‌سازی خود نتیجه گرفتند که در تشکیل الگوی جریان لخته‌ای، ابتدا ارتفاع فاز مایع در کانال کمی افزایش یافته و با رشد ناپایداری در سطح مشترک و ارضا شرط ناپایداری کلین-هلمهولتز، جریان لخته‌ای ایجاد می‌شود و به دلیل گرادیان فشار بزرگتر در ابتدای لخته نسبت به انتهای آن، طول لخته در امتداد کانال افزایش پیدا می‌کند.

انصاری و همکاران [11] جریان دو فازی هوا-آب در کانال افقی ریب‌دار، به طور تجربی و عددی را مطالعه کردند. ایشان با ارائه نقشه الگوهای جریان، استنتاج کردند که ریب‌گذاری محدوده الگوی جریان لخته‌ای در نقشه جریان را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد. با مقایسه دو کانال ریب‌دار مشخص شد که اولین لخته در کانال با ریب‌های کوچک در فاصله دورتر و زمان طولانی‌تر نسبت به ریب بزرگ تشکیل می‌شود.

مارگاریس [12]، جداسازی جریان دو فازی را در اتصال T شکل تقسیم‌کننده نامنظم با شاخه جانبی رو به بالا مدل‌سازی کرد. ایشان مدل‌سازی ریاضی را بر اساس معادلات اساسی بقا جرم، مومنتوم و انرژی در

$$\nabla \cdot (U) = - \sum_i \frac{1}{\rho_i} \left(\frac{\partial \rho_i}{\partial t} + U_i \cdot \nabla \rho_i \right) \alpha_i \quad , \quad i = l, g \quad (8)$$

یک ترم جابه‌جایی اضافی برای بدست آوردن توزیع دقیق سطح در نظر گرفته می‌شود. این ترم جابه‌جایی فقط در ناحیه سطح مشترک اعمال می‌شود و خارج از سطح مشترک صفر بوده و در حل آن تأثیری ندارد. این ترم که باعث فشردگی سطح مشترک شده، بقای کسر حجمی را تضمین می‌کند [17].

بنابراین معادله جابه‌جایی کسر حجمی بصورت زیر است:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha U) + \nabla \cdot (\alpha(1-\alpha)U_c) = - \sum_i \frac{1}{\rho_i} \left(\frac{\partial \rho_i}{\partial t} + U_i \cdot \nabla \rho_i \right) \alpha_i^2 \quad (9)$$

U_c سرعت تراکمی نامیده شده و طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$U_c = \min\{C_a|U|, \max|U|\} \frac{\nabla \alpha}{|\nabla \alpha|} \quad (10)$$

C_a فاکتور تراکم نامیده شده و شدت تراکم سطح مشترک را کنترل می‌کند. اگر مقدار این فاکتور برابر با صفر در نظر گرفته شود، ترم جابه‌جایی اضافی حذف خواهد شد. مقدار این فاکتور بین 1 تا 4 پیشنهاد شده است [18]

معادله بقای جرم بصورت زیر است:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (11)$$

معادله مومنتوم بصورت زیر است:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho U) + \nabla \cdot (\rho U U) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu[\nabla U + (\nabla U)^T]) - \nabla \cdot \left(\frac{2}{3} \mu \nabla \cdot U \right) + \rho g + F_s \quad (12)$$

در این رابطه ترم F_s ناشی از کشش سطحی است. مدل کشش سطحی استفاده شده در شبیه‌سازی‌ها، مدل نیروی سطحی پیوسته (CSF) است [19]. در این مدل نیروی حجمی وارده بصورت زیر محاسبه می‌شود.

$$F_s = \sigma k \nabla \alpha \quad (13)$$

کشش سطحی روی سطح مشترک محاسبه و در جهت عمود بر سطح در نظر گرفته می‌شود. انحنای سطح مشترک با رابطه‌ی (14) بیان می‌شود:

$$k = \nabla \cdot \left(\frac{\nabla \alpha}{|\nabla \alpha|} \right) \quad (14)$$

از آنجا که در پژوهش حاضر، هوا گاز قابل تراکم فرض شده است، با وجود اینکه شبیه‌سازی حاضر هم دما (ایزوترمال) در نظر گرفته شده است، جهت محاسبه چگالی حل معادله‌ی انرژی ضروری است. این معادله بصورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho T) + \nabla \cdot (\rho U T) - \nabla^2 (\alpha_d T) = - \left[\nabla \cdot (U P) + \frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \nabla \cdot (\rho U k) \right] \times \left(\frac{\alpha}{c_l} + \frac{(1.0 - \alpha)}{c_v} \right) \quad (15)$$

3-2- توصیف مسئله

طبق شکل 4، میدان حل، کانالی با اتصال T شکل به سطح مقطع $10 \times 5 \text{ cm}^2$ و طول $L = 50d$ است، (طول سطح مقطع است). اتصال شاخه عمودی به طول 1m، در فاصله 2/5m متری از ورودی بازوی افقی قرار دارد. در بررسی نتایج، اندازه سطح مقطع شاخه عمودی تغییر داده شده است.

در شرایط اولیه، مایع تا نصف ارتفاع شاخه افقی پر شده و در بقیه سیستم، فاز گازی وجود دارد. شرایط مرزی با فرض عدم لغزش برای تمامی دیواره‌ها در نظر گرفته شده است. شرط مرزی سرعت ثابت برای ورودی و

تعقیب سطح مشترک جریان دو فازی پرداخته است. با توجه به آشفتگی و تناوبی بودن الگوی جریان لخته‌ای و احتمال صدمه دیدن تجهیزات موجود در پایین دست، تمرکز اصلی تحقیق حاضر به بررسی کاهش الگوی جریان لخته‌ای با استفاده از اتصال T شکل در ابعاد سطح مقطع شاخه جانبی عمودی متغیر پرداخته شده و سطح مقطع ایده‌آل برای شاخه جانبی عمودی انتخاب شده است.

3- شبیه‌سازی عددی

در این بخش معادلات حاکم بر جریان دو فازی مطرح شده، سپس به توصیف مسئله و شرایط مرزی بکار رفته، پرداخته شده است.

3-1- معادلات حاکم

در شبیه‌سازی حاضر به منظور دنبال کردن سطح مشترک دو سیال از روش حجم سیال استفاده شده است. در این روش از تابع رنگ برای توصیف موقعیت هر فاز استفاده می‌شود که بصورت نسبت حجم هر فاز به حجم سلول تعریف می‌شود و از الگوی زیر پیروی می‌کند.

$$\alpha(x, t) = \begin{cases} 1 & \text{اول سیال} \\ 0 < \alpha < 1 & \text{مشترک سطح} \\ 0 & \text{دوم سیال} \end{cases} \quad (1)$$

کسر حجمی در این روش با حل رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + (U \cdot \nabla) \alpha = 0 \quad (2)$$

این معادله با روش‌های مختلفی حل شده است، اما به دلیل دیفیوژن عددی بالای برخی از این روش‌ها، سطح مشترک بطور دقیق بدست نمی‌آید. بنابراین تلاش‌های متعددی برای ایجاد طرحی برای جلوگیری از ناپایداری و دیفیوژن عددی وجود دارد. از جمله این روش‌ها توسط ولر [17] پیشنهاد شده است که در نرم‌افزار اوپن‌فوم نیز بکار می‌رود. کد مورد استفاده، از الگوریتمی با راه حل صریح (MULES¹) استفاده می‌کند. خواص فیزیکی دو فاز بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$\beta(x, t) = \beta_l \alpha + (1 - \alpha) \beta_g \quad (3)$$

که β نماینده خواص سیالات مانند، چگالی، ویسکوزیته و ... است. همانطور که در فرضیات ذکر شد، فاز گازی بصورت تراکم‌پذیر و کامل در نظر گرفته شده است، که طبق قانون گاز کامل² از رابطه زیر پیروی می‌کند:

$$\rho_{\text{gas}} = \frac{PM}{RT} \quad (4)$$

معادله جابه‌جایی کسر حجمی از رابطه (2) پیروی می‌کند، که می‌توان بصورت زیر بازنویسی کرد:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha U) = \alpha \nabla \cdot U \quad (5)$$

در رابطه (5)، U سرعت توده سیال بوده و به عنوان میانگین وزنی بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$U = \alpha U_l + (1 - \alpha) U_g \quad , \quad i = l, g \quad (6)$$

اگر معادله پیوستگی فاز گاز و مایع بصورت زیر در نظر گرفته شود:

$$\nabla \cdot (U_i) = - \frac{1}{\rho_i} \left(\frac{\partial \rho_i}{\partial t} + U_i \cdot \nabla \rho_i \right) \quad , \quad i = l, g \quad (7)$$

ترکیب رابطه (7) با رابطه (6) بصورت زیر بدست می‌آید:

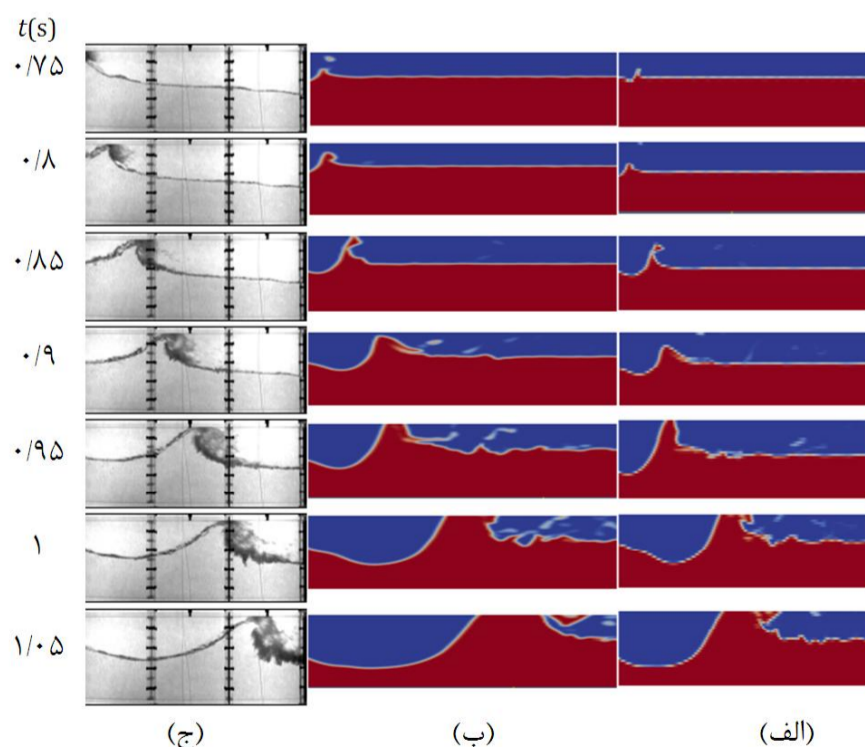
1- Multidimensional Universal Limiter with Explicit Solution
2- Perfect gas

نشان می‌دهد. ابعاد مقادیر هندسی و سایر فرضیات انتخابی همانند سرعت ورودی فازها بر اساس مقادیر متناظر با مرجع [۲۱] در نظر گرفته شده است. با لحاظ کردن مدل توربولانسی، به دلیل اضافه شدن ترم ویسکوزیته توربولانسی در رابطه نایر-استوکس، پدیده اسلاگ همزمان و یا دیرتر در شبیه‌سازی عددی آغاز می‌شود. از سوی دیگر از آنجا که برای حل دو فاز و حفظ پایداری محدوده‌ی حجم سیال (α_1) به گام زمانی در مقیاس 10^{-6} و شبکه‌ی ریز و الگوی‌های عددی مرتبه دو نیاز است، این شبکه توانایی دیدن اثرات اغتشاش را به خوبی دارا است و نیاز به حل با مدل‌های توربولانسی نیست. بنابراین همانطور که پیش‌تر نیز ذکر شد اثر آشفتگی جریان را می‌توان به طور مستقیم در شبکه مناسب در روش حجم سیال بدون استفاده از مدل‌های توربولانسی مشاهده کرد. همانطور که در شکل ۶ دیده می‌شود استفاده از مدل توربولانسی زمان شروع اسلاگ را به تأخیر می‌اندازد، بنابراین حل حاضر بدون در نظر گرفتن مدل توربولانسی، نتیجه‌ی آزمایشگاهی را بهتر پیش‌بینی می‌کند.

طبق شکل ۶ مشاهده می‌شود که شکل‌گیری جریان اسلاگ در زمان تقریبی $t=0.75s$ اتفاق می‌افتد و در زمان تقریبی $t=0.9s$ سطح سیال مایع به نقطه اوج خود در سطح مقطع رسیده و توسعه‌یافتگی اسلاگ آغاز می‌گردد. با تعقیب اسلاگ و جریان پشت آن مشاهده می‌شود که نتایج عددی بدون در نظر گرفتن مدل توربولانسی تطابق خوبی با نتایج تجربی [۲۱] دارد. علاوه بر آن چرخش و شکستن امواج به دلیل نیروی برشی حاصل از سرعت بالای هوا که از ویژگی‌های اسلاگ است، به طور واضح در شکل ۶ مشاهده می‌شود.

۴- نتایج

با شبیه‌سازی اتصال T شکل در ابعاد هندسی کارهای آزمایشگاهی انجام شده توسط والتر و همکاران [۲۲]، به مقایسه نتایج کار ایشان با نتایج شبیه‌سازی کار حاضر پرداخته شده است. ایشان برای تقاطع T شکل منظم و نامنظم با قطر $3.76cm$ ، افت فشار کلی را در شرایط ورودی یکسان بررسی کرده و نتیجه گرفتند که افت فشار بین ورودی و امتداد لوله اصلی، در گذر از تقاطع T شکل منظم یا نامنظم کاهش می‌یابد.



شکل ۶ شکل‌گیری و توسعه‌یافتگی جریان اسلاگ (الف) نتایج عددی کار حاضر با استفاده از مدل توربولانسی (ب) نتایج عددی کار حاضر بدون استفاده از مدل توربولانسی (ج) نتایج تجربی [۲۱]

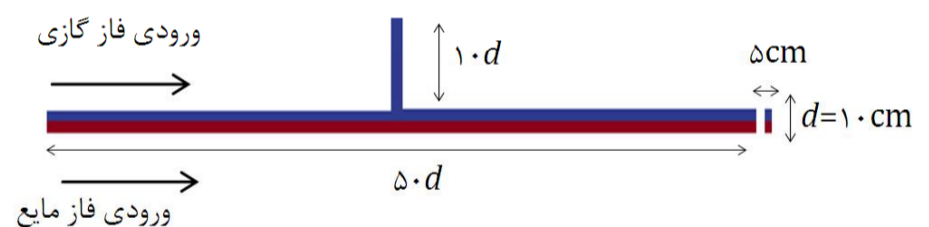
شرط مرزی فشار ثابت برای خروجی در نظر گرفته شده است. سیالات کاری شامل فاز گازی هوا و فاز مایع آب است. با توجه به اینکه اثر آشفتگی را می‌توان به طور مستقیم در شبکه مناسب در روش VOF ملاحظه کرد و استفاده از مدل‌های توربولانسی در این روش تنها کمک می‌کند تا اثر توربولانس راحت‌تر در مش‌های درشت مشاهده شود، بررسی هیدرودینامیک موضوع در اولویت قرار داده [۲۰]. معادلات نایر-استوکس بدون میانگین‌گیری و جریان بدون استفاده از مدل‌های توربولانسی لحاظ شده است.

۳-۳- استقلال حل از شبکه

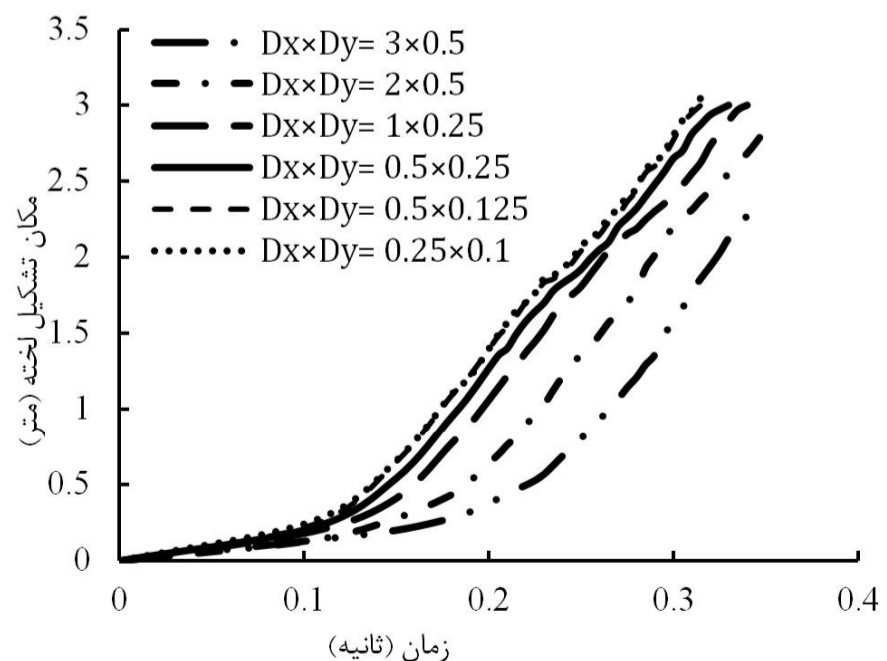
برای بررسی الگوی جریان لخته‌ای در اتصال T شکل، نمودار همگرایی محل تشکیل لخته‌ای نسبت به زمان برای تعدادی شبکه در شکل ۵ بررسی شده است. در اتصال T شکل، طول شاخه افقی ۵ متر و طول شاخه جانبی عمودی ۱m است و مقدار 1124000 تعداد سلول یکنواخت شش وجهی برای سیستم اتصال T شکل در شبیه‌سازی ۲ بعدی مورد نظر تعیین شده است. لازم به ذکر است حتی در شبیه‌سازی ۲ بعدی با این فوم هندسه بصورت سه بعدی داده می‌شود، هندسه در راستای عمود بر صفحه تنها از یک سلول تشکیل می‌شود و صفحات جلویی و عقبی از شرط مرزی خاصی با نام امپتی^۱ استفاده می‌شود تا بدین ترتیب جریان در جهت عمود بر صفحه حل نگردد.

۴-۳- اعتبارسنجی

به منظور صحت‌سنجی شبیه‌سازی، به روند توسعه‌یافتگی جریان اسلاگ و مقایسه آن با نتایج تجربی مرجع [۲۱] (که اتصال T شکل را مورد بررسی قرار داده) پرداخته شده است. شکل ۶ مقایسه بین نتایج عددی حاضر بدون استفاده از مدل توربولانسی، با استفاده از مدل توربولانسی (k-e) و نتایج آزمایشگاهی مرجع [۲۱] در شکل‌گیری و توسعه‌یافتگی جریان اسلاگ را

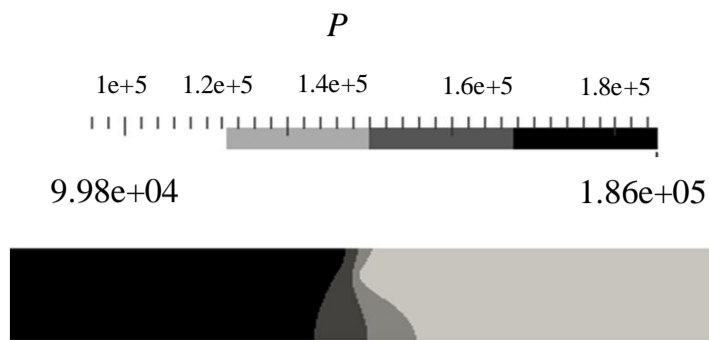


شکل ۴ هندسه مسئله

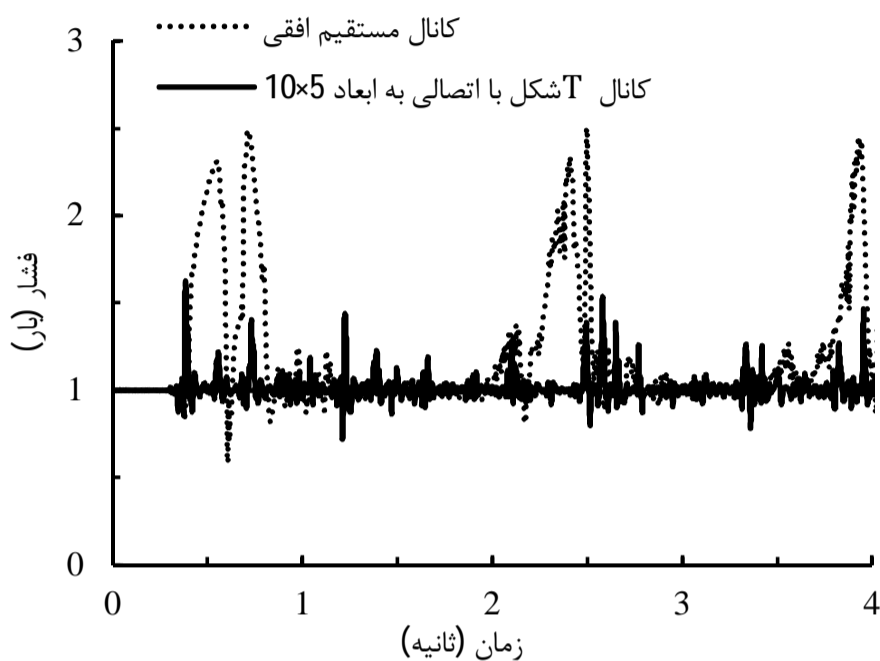


شکل ۵ محل جریان لخته‌ای نسبت به زمان برای شبکه‌های مختلف در اتصال T شکل به ابعاد سطح مقطع $10 \times 5cm^2$ ، طول شاخه افقی ۵m و طول شاخه جانبی ۱m

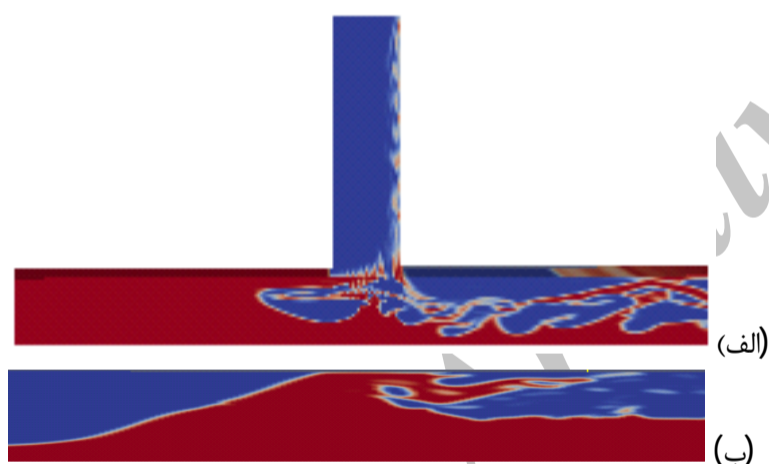
1- empty



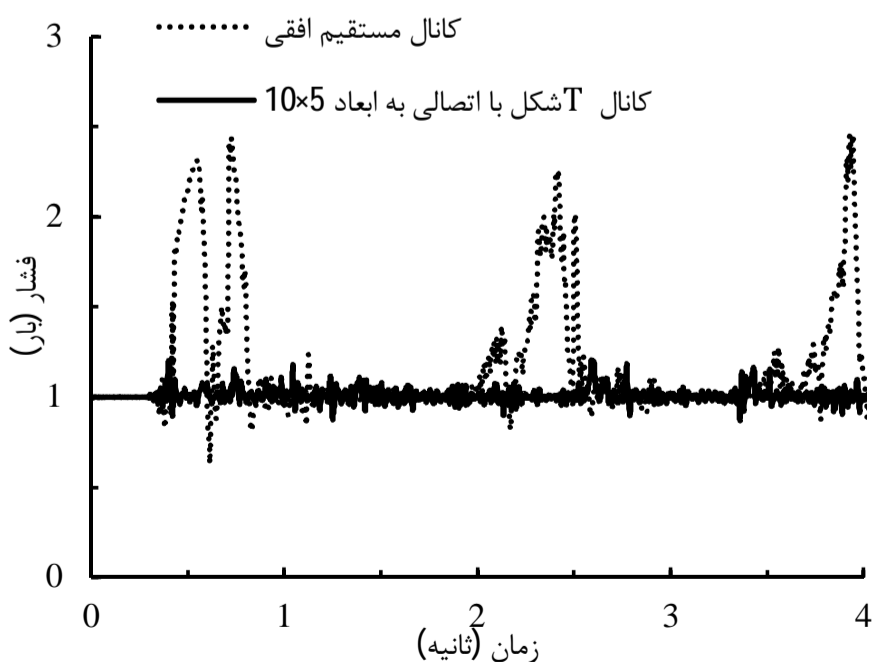
شکل 8 کانتور فشار هنگام عبور جریان لخته‌ای از مکانی خاص



شکل 9 مقایسه منحنی فشار برای مکان انتخابی P1 (قبل از تقاطع) در حالت بدون تقاطع و تقاطع T شکل با ابعاد ورودی شاخه عمودی $10 \times 5 \text{ cm}^2$ در شرایط انتخابی V1



شکل 10 توزیع کسر حجمی (الف) با وجود تقاطع (ب) بدون تقاطع



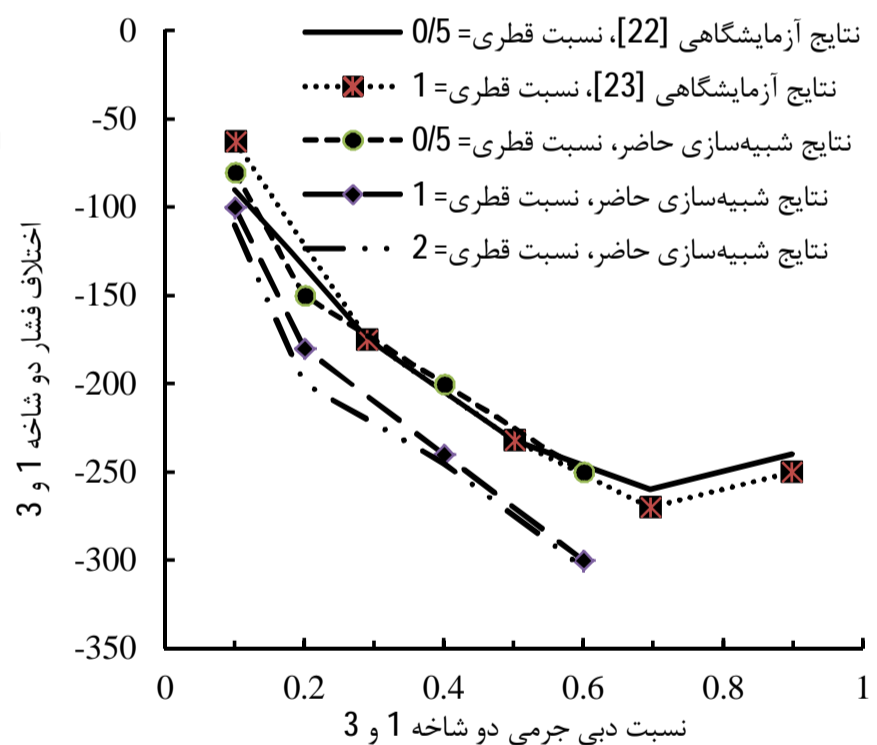
شکل 11 مقایسه منحنی فشار برای مکان انتخابی P2 (بعد از تقاطع) در حالت بدون تقاطع و تقاطع T شکل با ابعاد ورودی شاخه عمودی $10 \times 5 \text{ cm}^2$ در شرایط انتخابی V1

طبق شکل 7، والتر و همکاران [22]، برای نسبت قطر هیدرولیکی $(D3/D1)$ برابر با 1، نتایج مشابه با نسبت قطر هیدرولیکی برابر با 0/5 بدست آوردند، که نتایج آن قبلاً توسط افراد دیگر [23] ارائه شده بود. نتایج شبیه‌سازی حاضر در نسبت قطر هیدرولیکی برابر با 0/5 تطابق نسبتاً خوبی با مطالعات آزمایشگاهی [22] دارد. با این حال نتایج کار حاضر برای نسبت قطر هیدرولیکی برابر با 1 و 2، افت فشار بزرگتری را نشان می‌دهد.

جهت بررسی تأثیر حضور تقاطع T شکل و تغییر ابعاد ورودی شاخه عمودی بر جریان لخته‌ای در ابعاد مورد نظر در شبیه‌سازی حاضر، دو جریان V1 و V2 در دو موقعیت P1 و P2، مطابق با مقادیر جدول 1 انتخاب شده‌اند.

جریان لخته‌ای با انباشتگی مایع در کانال آغاز می‌شود و با مسدود شدن مسیر عبور گاز، فشار در پشت الگوی جریان لخته‌ای افزایش می‌یابد (شکل 8). به محض عبور جریان لخته‌ای از نقاط انتخابی مقدار فشار بطور ناگهانی افزایش یافته و تا زمان عبور کامل لخته ادامه دارد. افزایش فشارها در اثر عبور لخته از نقاط انتخابی در شکل 9 نشان داده شده است.

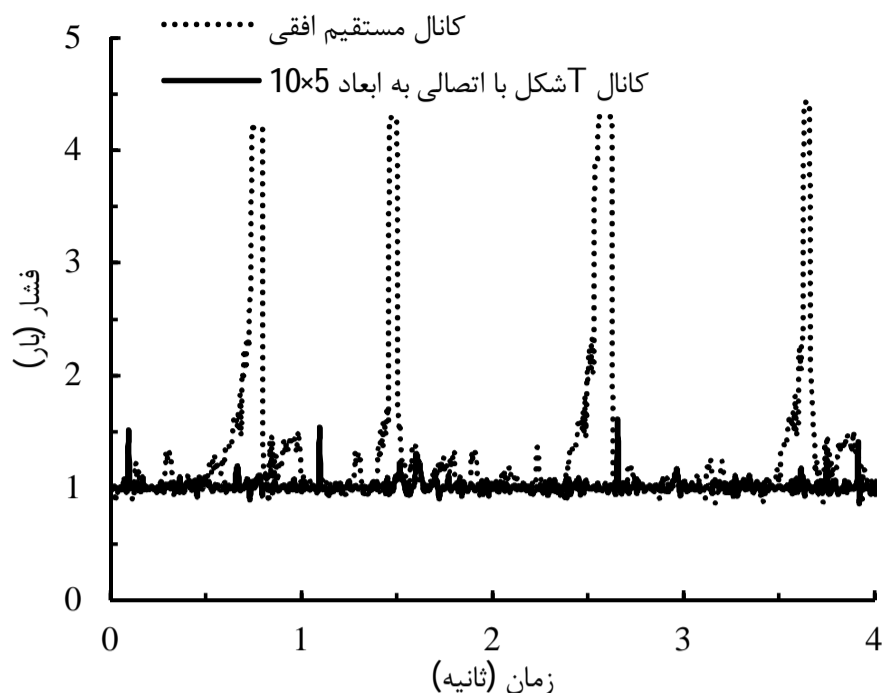
با توجه به شکل 9 و مقایسه منحنی‌های فشار P1، در کانال بدون تقاطع در شرایط انتخابی V1، جریان بصورت لخته‌ای کامل حرکت کرده و دارای فرکانس تکراری است، که بدون تغییرات محسوسی از کانال خارج می‌شود. در صورت استفاده از تقاطع با ابعاد ورودی $10 \times 5 \text{ cm}^2$ ، جریان لخته‌ای دچار تغییر می‌شود (شکل 10) و منحنی فشار به صورتی که در حالت بدون تقاطع تغییرات شدیدی وجود داشت، مشاهده نمی‌شود. این نتیجه طبق شکل 11 در موقعیت P2 مشهودتر است.



شکل 7 مقایسه افت فشار (ΔP_{12}) نتایج شبیه‌سازی حاضر و کارهای آزمایشگاهی انجام شده توسط والتر و همکاران [22] برای نسبت قطرهای $(D3/D1)$

جدول 1 شرایط نقاط انتخابی جهت بررسی جریان لخته‌ای

موقعیت بررسی منحنی‌های فشار		شرایط نقاط انتخابی	
P1	P2	U_{Sg} (m/s)	U_{Si} (m/s)
مکان تقاطع	مکان تقاطع	7	0/2
10cm	10 cm		
قبل از تقاطع	بعد از تقاطع	9	0/5



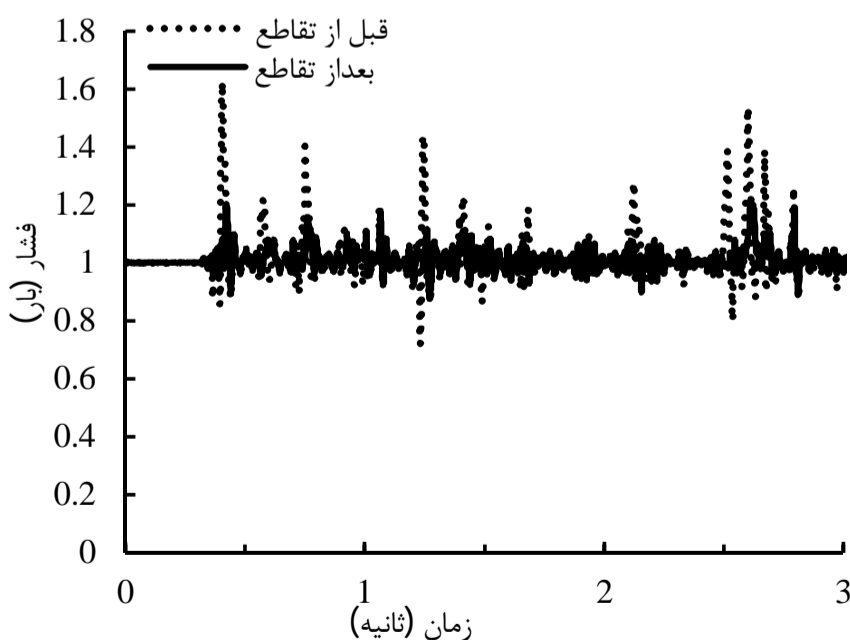
شکل 13 مقایسه منحنی فشار برای مکان انتخابی P2 (بعد از تقاطع) در حالت بدون تقاطع و تقاطع T شکل با ابعاد ورودی شاخه عمودی 10×5cm² در شرایط انتخابی V2

جریانی از مایع که حباب‌هایی از گاز در بین آن قرار گرفته (الگوی جریان پلاگ) حرکت می‌کند.

با در نظر گرفتن ابعاد 10×5cm² به عنوان سطح مقطع شاخه عمودی در شبیه‌سازی حاضر، منحنی‌های فشار برای دو شرط انتخابی V1 و V2 در موقعیت‌های قبل و بعد از تقاطع بدست آورده شده است. با توجه به شکل‌های 14 و 15 مشاهده می‌شود که تغییرات شدید در منحنی‌های فشار در موقعیت قبل از تقاطع برای حالت بعد از تقاطع از بین رفته، که می‌توان چنین استنتاج کرد که استفاده از اتصال T شکل باعث تغییر در جریان لخته‌ای می‌شود.

جدول 3 مقایسه بازده افت فشار برای مکان‌های انتخابی P1 (قبل از تقاطع) و P2 (بعد از تقاطع) در گذر از شاخه عمودی با ابعاد سه‌گانه 5×5cm²، 10×5cm² و 20×5cm² در شرایط انتخابی V2

V2	€ قبل از تقاطع	€ بعد از تقاطع
5×5	95/11	95/6
10×5	98/13	98/95
20×5	98/59	99/91



شکل 14 منحنی‌های فشار در اتصال T شکل با ابعاد سطح مقطع شاخه جانبی 10×5cm² در شرایط انتخابی V1

در صورت استفاده از تقاطع، با افزایش ابعاد ورودی شاخه جانبی عمودی از 5×5cm² به 10×5cm² و 20×5cm² میزان تخلیه گاز از ورودی شاخه جانبی افزایش پیدا می‌کند. این موضوع باعث کاهش متوسط فشار جریان در بالادست اتصال می‌شود. با افزایش ابعاد مقطع شاخه جانبی، فضای در دسترس گاز برای خروج از کانال بیشتر شده و میزان تخلیه آن از کانال افزایش می‌یابد. منحنی‌های فشار بعد از تقاطع (مکان P2) نسبت به بالادست تقاطع افت پیدا کرده و شرایط جریان قبل از اتصال در موقعیت‌های بعد از اتصال از بین رفته و الگوی جریان تحت تأثیر عبور از تقاطع دچار تحول می‌شود. این نتیجه با در نظر گرفتن رابطه‌ی (16) به عنوان معیاری از بازده افت فشار طبق جدول 2 مشهودتر دیده می‌شود.

$$\epsilon = \frac{P - P_{Tj}}{P} \times 100 \quad (16)$$

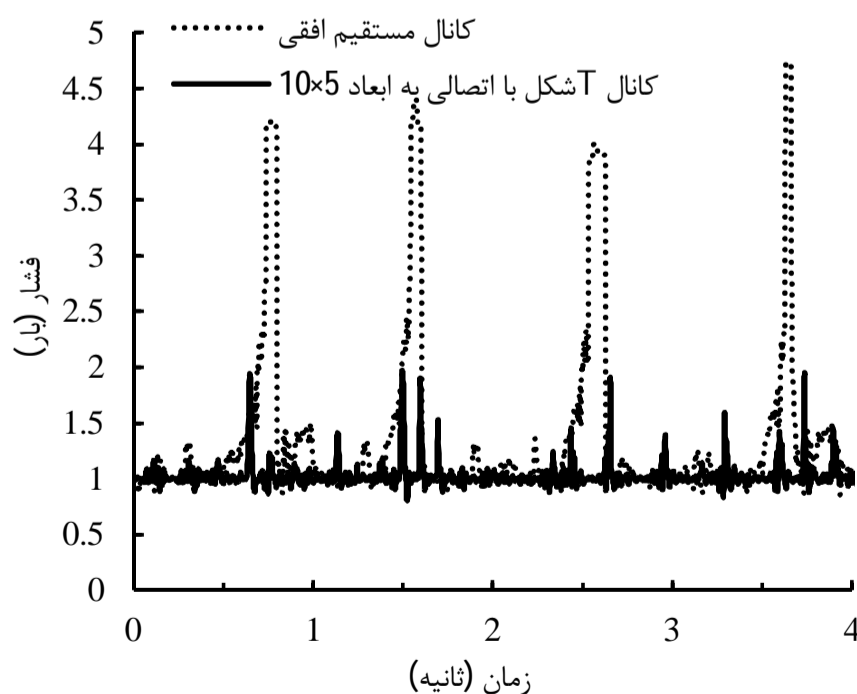
در رابطه (16) P مربوط به فشار در کانال افقی بدون تقاطع T شکل و P_{Tj} مربوط به مقدار فشار در اتصال T شکل است.

با شبیه‌سازی شرط انتخابی V2، که سرعت فاز گازی آن نسبت به حالت V1 افزایش یافته است، طبق شکل 12 و شکل 13 منحنی فشار جریان لخته‌ای در کانال بدون تقاطع نسبت به شرط انتخابی V1 افزایش یافته است. استفاده از ابعاد شاخه جانبی 10×5cm² باعث کاهش یافتن شدت فشار جریان لخته‌ای شده است.

با افزایش ابعاد شاخه جانبی فشار بطور نامحسوسی کاهش می‌یابد (جدول 3) و با عبور جریان از زیرشاخه جانبی، درصد بیشتری از گاز موجود در جریان تخلیه و مقدار کمی وارد پایین دست تقاطع می‌شود و این درصد کم وارد شده به پایین دست کانال مومنوم لازم برای حرکت رو به جلوی لخته را کاهش داده و سرعت جریان بعد از تقاطع کاهش پیدا کرده و بصورت

جدول 2 مقایسه بازده افت فشار برای مکان‌های انتخابی P1 (قبل از تقاطع) و P2 (بعد از تقاطع) در گذر از شاخه عمودی با ابعاد سه‌گانه 5×5cm²، 10×5cm² و 20×5cm² در شرایط انتخابی V1

V1	€ قبل از تقاطع	€ بعد از تقاطع
5×5	92/74	93/17
10×5	96/27	98/35
20×5	96/79	99/81

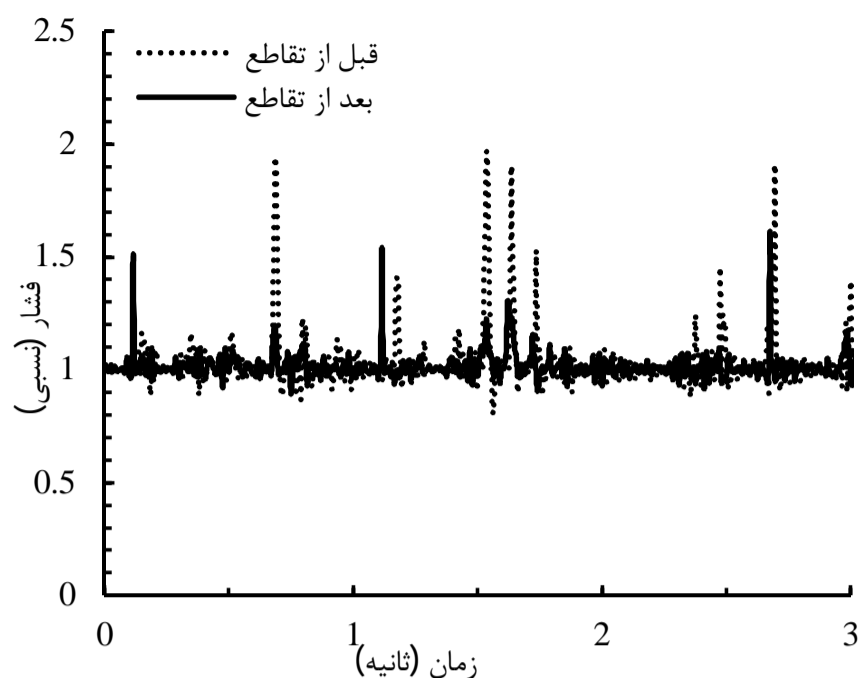


شکل 12 مقایسه منحنی فشار برای مکان انتخابی P1 (قبل از تقاطع) در حالت بدون تقاطع و تقاطع T شکل با ابعاد ورودی شاخه عمودی 10×5cm² در شرایط انتخابی V2

M	لزجت دینامیکی	$(\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1})$
ϵ	بازده افت فشار	
	زیر نویس‌ها	
Air	هوا	
Ave	مقدار متوسط	
G	گاز	
L	مایع	

7- مراجع

- [1] G.P. Celata, Flow Boiling, in: Lecture Given at Course: Boiling Heat Transfer and Boiling Equipment, *CISM, Udine, Italy*, 2005.
- [2] D. Lakehal, M. Meier, M. Fulgosi, Interface Tracking Towards the Direct Simulation of Heat and Mass Transfer in Multiphase Flows, *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol. 23, No. 3, pp. 242-257, 2002.
- [3] J.U. Barckbill, D.B. Kothe, C. Zemach, A Continuum Method for Modeling Surface Tension, *J. Comput. Phys.*, Vol. 100, No. 2, pp. 335-354, 1992.
- [4] M. Sussman, E. Fatemi, P. Smereka, S. Osher, An Improved Level Set Method for Incompressible Two-phase Flows, *Comp. Fluids*, Vol. 27, No. 5, pp. 663-680, 1998.
- [5] S. Unverdi, G. Tryggvason, A Front-tracking Method for Viscous, Incompressible Multi-fluid Flows, *J. Comput. Phy.*, Vol. 100, No. 1, pp. 25-37, 1992.
- [6] P. Angeli, A. Gavriilidis, Hydrodynamics of Taylor Flow in Small Channels: A Review, The Institution of Mechanical Engineers, Part C: *J. Mech. Eng. Sci.*, Vol. 222, No. 5, pp. 737-751, 2008.
- [7] M.R. Ansari, Dynamical behavior of slug initiation generated by short waves in two-phase air-water stratified flow, *ASME HTD*, Vol. 361, pp. 289-295, 1998.
- [8] P. Adibi, M.R. Ansari, Experimental Investigation of Slug Initiation to Upstream Conditions of Two Phases in Long Horizontal Channels in Two Fluids, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 3, pp. 27-35, 2014. (In Persian)
- [9] P. Adibi, M.R. Ansari, B. Habibpour, E. Salimi, Slug frequency evaluation in long horizontal channel by experimental method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 2, pp. 141-149, 2014. (In Persian)
- [10] M.R. Ansari, E. Salimi, B. Habibpour, P. Adibi, Three dimensional simulation of slug two-phase flow regime in a horizontal channel using VOF method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 7, pp. 176-182, 2014. (In Persian)
- [11] M.R. Ansari, S. Jafari, R. Gheisari, P. Adibi, Numerical simulation and experimental investigation of the air-water two phase flow patterns inside a ribbed horizontal duct, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 14, pp. 217-226, 2015. (In Persian)
- [12] D.P. Margaris, T-junction separation modelling in gas-liquid two-phase flow, *Chemical Engineering and Processing*, vol. 46, pp. 150-158, 2007.
- [13] B. Sadeghi, Use the T-junction to reduce the slug flow regime and effects on the liquid-gas two-phase flow patterns, *Master Thesis, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran*, 2013. (In Persian)
- [14] E. Wren, G. Baker, B.J. Azzopardi, R. Jones, Slug flow in small diameter pipes and T-junctions, *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 29, pp. 893-899, 2005.
- [15] E.D. Reis, L. Goldstein, Fluid dynamics of horizontal air-water slug flows through a dividing T-junction, *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 50, pp. 58-70, 2013.
- [16] Y. Taitel, A.E. Dukler, A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow, *AIChE Journal*, vol. 22 No. 1, pp. 47-55, 1976.
- [17] H. G. Weller, A new approach to VOF-based interface capturing methods for incompressible and compressible flow, *Tech. Rep. TR/HGW/07, OpenCFD Ltd*, 2012.
- [18] M. Worner, Numerical modeling of multiphase flows in microfluidics and micro process engineering: A review of methods and applications, *Journal of microfluid Nanofluid*, Vol. 12, pp. 841-886, 2012.
- [19] E. Berberovic, Investigation of Free-surface Flow Associated with Drop Impact: Numerical Simulations and Theoretical Modeling, *PhD. Thesis, Darmstadt University of Technology, Germany*, 2010.
- [20] C.K. Sandra, J. Galdine, B. Guy, CFD modeling of all gas-liquid and vapor-liquid flow regimes predicted by the baker chart, *Chemical Engineering Journal*, vol. 138, pp. 349-357, 2008.
- [21] C. Vallee, T. Hohne, H.M. Prasser, T. Suhnel, Experimental investigation and CFD simulation of horizontal stratified two-phase flow phenomena, *Nuclear Engineering and Design*, vol. 238, pp. 637-646, 2008.
- [22] L.C. Walter, H.M. Soliman, G.E. Sims, Two phase pressure drop and phase distribution at a reduced T-junction, *International Journal of Multiphase flow*, vol. 24, pp. 775-792, 1998.
- [23] J.R. Buell, Two-phase Pressure drop and phase distribution in a horizontal tee junction, *M.Sc. thesis, university of Manitoba*, 1992.



شکل 15 منحنی‌های فشار در اتصال T شکل با ابعاد سطح مقطع شاخه جانبی $10 \times 5 \text{ cm}^2$ در شرایط انتخابی V2

5- جمع بندی

در تحقیق حاضر، با استفاده از روش حجم سیال به شبه‌سازی و بررسی جریان دوفازی گاز- مایع در اتصال T شکل منشعب پرداخته شده است. شبه‌سازی صورت گرفته توسط نرم‌افزار متن‌باز اوپن‌فوم، با مدل حجم سیال (VOF) به تعقیب سطح مشترک جریان دوفازی مایع- گاز پرداخته شده است. بررسی کاهش الگوی جریان لخته‌ای در اتصال T شکل توسط پارامترهای مختلف نتایج مهم زیر را در بر داشت:

1. در شرایط برابر از نظر سرعت فازها در ورودی، با افزایش ابعاد ورودی شاخه جانبی عمودی، فشار متوسط جریان در کل کانال کاهش می‌یابد.
2. با افزایش ابعاد ورودی شاخه عمودی، گستره جریان لخته‌ای در پایین دست کاهش و گستره جریان تویی افزایش می‌یابد.
3. با توجه به تغییرات اندک در منحنی‌های فشار، ورودی شاخه عمودی با ابعاد $5 \times 5 \text{ cm}^2$ ، در کاهش لخته‌های بالادست کاملاً موثر نیست.
4. استفاده از تقاطع، دامنه نوسانات فشار و سرعت را کاهش می‌دهد.
5. در تمامی ابعاد ورودی شاخه عمودی، با از بین رفتن لخته در بالادست، تعدادی لخته در پایین دست از طریق تخلیه گاز و روی هم سوار شدن موج‌ها تشکیل می‌شوند.

6- فهرست علائم

F_s	نیروی حجمی	(N)
k	انحنای سطح مشترک	(m^{-1})
p	فشار	$(\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2})$
Pr	عدد پرانتل	بی‌بعد
T	دما	(K)
u_j	سرعت	(ms^{-1})
α	کسر حجمی	
ρ	چگالی	(kgm^{-3})

علائم یونانی