

بررسی تجربی و نظری جریان حاوی لجن در یک مجرای واگرا

مجید حکیم جوادی (مربی)

مرکز تحقیقات آب و انرژی

بهار فیروزآبادی (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

در این نوشتار جریان حاوی لجن در مجاری سیستم واکنشگر UASB، به دو روش نظری و عملی بررسی شده است. در قسمت عملی برای انجام آزمایش‌ها دستگاهی طراحی و ساخته شده که بتواند خواسته‌های پروژه را برآورده کند. در قسمت نظری نیز به حل عددی معادلات حاکم بر جریان سیال پرداخته شده است. معادلات بقای جرم و اندازه‌ی حرکت در حالت جریان لایه‌یی و در دو جهت در مجرای عمودی با جریان رو به بالا حل شده است. نتایج نشان می‌دهد که گردابه‌ی پشت هر گازگیر به شدت متأثر از زاویه و ابعاد گازگیر و نیز سرعت ورودی جریان است. در بخش تجربی نتایج در قالب شکل ارائه شده است و نشان می‌دهد که خطوط جریان پشت گازگیر بسته به محل تزریق رنگ به سمت پائین یا بالا حرکت می‌کند. این امر نشان‌دهنده‌ی شکل گردابه است.

مقدمه

گازگیرها عبور می‌کند. با توجه به سرعت کم در این حالت معادلات ناویراستوکس به صورت لایه‌یی حل می‌شود. حل معادلات نشان می‌دهد که در اطراف گازگیرها جریان بین دو مجرای واگرا برقرار است و رخداد احتمالی جدایی متأثر از سرعت است. در این مرحله تأثیر سرعت و زاویه‌ی گازگیرها در ایجاد گردابه‌ها و نیز نحوه‌ی توزیع سرعت بررسی خواهد شد. در قسمت عملی، پایلوتی طراحی و ساخته شده است که بتوان زاویه‌ی مجرا و سرعت را در آن تغییر داد و در ضمن مسیر جریان را در آن دید.

دستگاه آزمایش

پایلوتی که در قسمت عملی این تحقیق ساخته شده بر مبنای سرعت رو به بالای صفر تا 10 m/hr و زاویه‌ی گازگیر متغیر محاسبه شده است. این پایلوت شامل یک محفظه‌ی مکعب مستطیل شکل به ابعاد $180 \times 40 \times 40$ سانتی‌متر است که دو وجه قائم آنها از فولاد ضدزنگ و دو وجه دیگر آن از جنس پلکسی‌گلاس است (شکل ۱). قسمت بالایی، محفظه‌ی جداسازی و محل استقرار گازگیرها و نصب سرریز است و قسمت پائینی آن محل ورود فاضلاب و محفظه‌ی فرایند زیست‌شناختی است. محفظه‌ی پائینی را بستری از لجن پر کرده است. برای ورود آب از کف به داخل واکنشگر، محفظه‌ی دیگری به شکل مکعب مستطیل و از جنس فولاد ضدزنگ به ابعاد $130 \times 40 \times 40$ سانتی‌متر ساخته شده است.

فاضلاب به عنوان خوراک میکروب‌ها از پائین‌ترین قسمت وارد می‌شود. طراحی سیستم ورودی به گونه‌یی انجام شده است که فاضلاب

در سیستم‌های تصفیه‌ی فاضلاب به روش بی‌هوازی، توده‌ی میکروب پس از تغذیه از فاضلاب آن را تجزیه کرده و تولید گاز CO_2 و CH_4 می‌کند. این گازها به توده‌ی میکروبی که همان لجن است چسبیده و آن را شناور می‌سازند. اگر سیستمی وجود نداشته باشد که این گاز را جمع‌آوری کند، لجن شناور شده و به سطح می‌آید و از راه‌های خروجی فاضلاب از سیستم خارج می‌شود. با ادامه‌ی این عمل، سیستم از لجن که عامل تصفیه بوده است - تخلیه شده، و فرایند تصفیه‌ی فاضلاب متوقف می‌شود. به منظور جلوگیری از این پدیده باید برای سیستم یک گازگیر طراحی شود تا از یک طرف از فرار لجن جلوگیری کند و از سوی دیگر در سطح آزادی که در گازگیر به وجود می‌آید، شرایط آرامی برقرار شود تا لجن گاز خود را از دست بدهد و بتواند به کف دستگاه سقوط کند و فرایند تصفیه از نو تکرار شود. اما با نصب گازگیر جریان متلاطم می‌شود و در نهایت بخشی از لجن که قابلیت تغذیه از فاضلاب و تصفیه‌ی آن را دارد، فرار کرده و در پایین دست گازگیرها از دست می‌رود. با بررسی جریان مایع در بین گازگیرها می‌توان طراحی گازگیرهای سیستم تصفیه UASB را بهینه‌سازی کرد تا از این طریق طراحان بتوانند در طرح‌های خود حداقل فرار لجن را پیش‌بینی کنند.

روش تحقیق

کار در این پروژه به دو قسمت نظری و عملی تقسیم می‌شود. در قسمت نظری، مجرا دو بعدی و در حضور گازگیرها تعبیه می‌شود. در مرحله‌ی اول، آب خالص در داخل محفظه جریان می‌یابد و از فضای بین

بتواند با سرعت کم و بدون ایجاد تلاطم به صورت یکنواخت ابتدا از بستر لجن و سپس از تمام مقطع مخزن جریان یابد. گازگیرها مشکل اصلی در بخش ساخت‌اند. آنها را باید به گونه‌یی نصب کرد که امکان تعویض آنها به منظور تغییر زاویه فراهم باشد و از طرف دیگر بتوانند نیروی شناوری ناشی از تولید گاز را تحمل کرده و سرنگون نشوند. در شکل ۲ دستگاه آزمایش ساخته شده در کارگاه آب و انرژی نشان داده شده است. در ابتدا برای بررسی و رؤیت نحوه‌ی حرکت حباب‌های گاز، به طور مصنوعی به سیستم هوا تزریق می‌شود. چون تزریق هوا باید به گونه‌یی باشد که کاملاً نسبت به حالت حرکت فاضلاب حقیقی مشابه باشد، لذا برای تزریق هوا از لوله‌های پلی اتیلنی با سوراخ‌های ریز استفاده شده است.

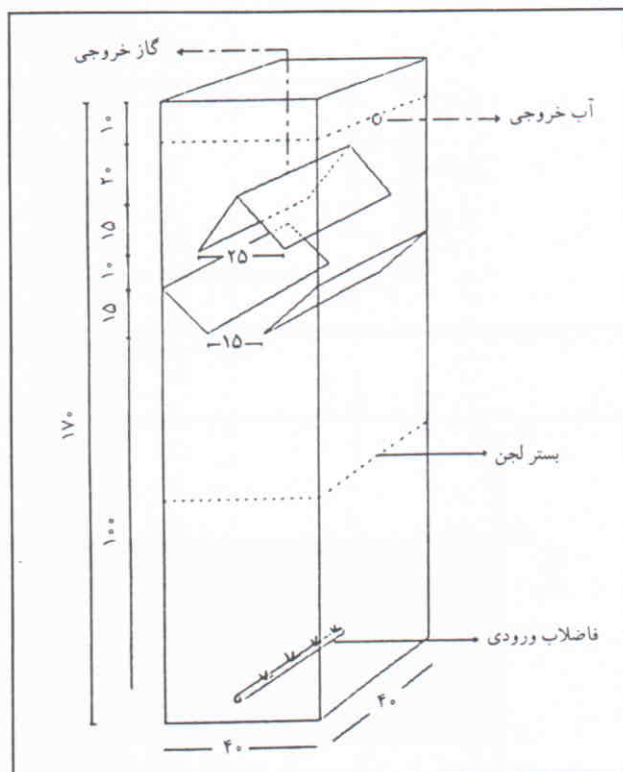
گازگیرها از ورق ۲ فولاد ضدزنگ ساخته شد و به آن بازو‌هایی نصب شد که می‌توان مجموعه را تعویض کرد. گازگیرهای طبقه‌ی اول از دو گازگیر نیمه در جداره و گازگیر طبقه‌ی بالا از یک گازگیر کامل در وسط تشکیل شده است. گاز جمع آوری شده در گازگیرهای طبقه‌ی پائین توسط دو لوله از جنس فولاد ضدزنگ ۳/۴ به زیر گازگیر بالایی هدایت می‌شود و مجموعه‌ی گازها از طریق یک لوله به دستگاه تنظیم فشار جریان پیدا می‌کند. برای این که در ارتفاع ۳ سانتی متری پائین و زیر گازگیر یک سطح تماس بین گاز و آب وجود داشته باشد (این سطح باعث می‌شود ذرات چسبیده به گاز که شناور می‌شوند با این سطح برخورد کرده و گاز خود را از دست داده و به پائین سقوط کنند) یک دستگاه تنظیم فشار ساخته شد. این دستگاه تشکیل شده از یک محفظه‌ی مکعب مستطیل با مقطع ۱۵×۱۵ و ارتفاع ۱۰۰ سانتی متر که از ورق ۲ فولاد ساخته شده است. لوله‌ی هدایت‌کننده‌ی گاز خروجی از مسیر یک لوله تا نزدیک کف سیستم تنظیم فشار برده شده است. چون گاز برای خارج شدن از این لوله باید فشار آب بالای سطح خود را خنثی کند، فشار زیر گازگیر را مطابق این تغییر فشار تنظیم خواهد کرد. لذا با بالا و پائین بردن سطح آب این محفظه می‌توان ارتفاع ۳ سانتی متری سطح بالای آب در زیر گازگیر را تنظیم کرد.

برای لجن‌گیری دستگاه مقدار ۴۰ لیتر لجن از کارخانجات شیر پاستوریزه تهران به دانشگاه منتقل شد و برای تغذیه آن به علت عدم وجود فاضلاب غلیظ در دانشگاه از کارخانه‌ی قند مقدار ۱۰۰ kg ملاس چغندر گرفته شد. برای پرورش لجن به منظور تغییر خوراک، مدت دو ماه - هر روز حدود ۵۰ cc - به آن خوراک داده شد.

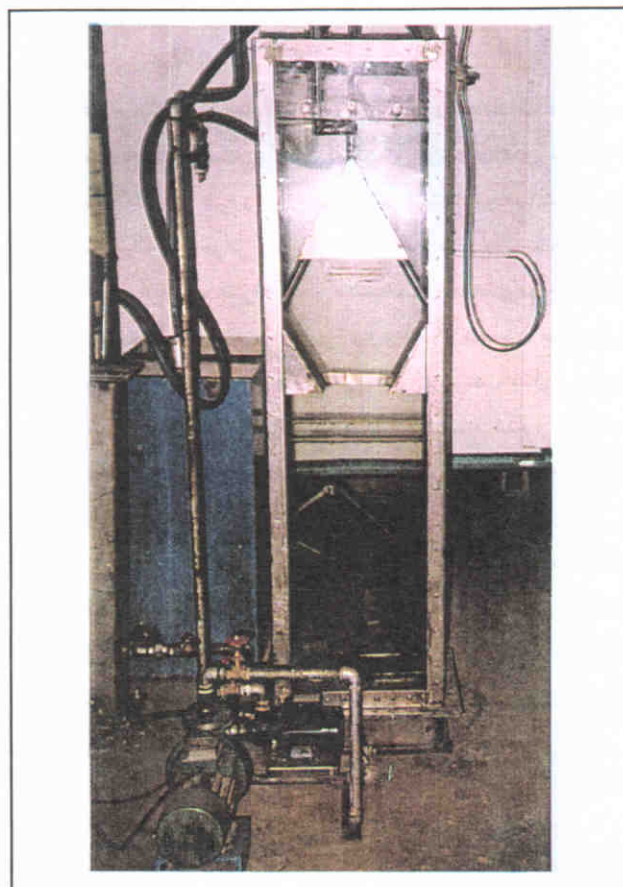
نظریه‌ی حاکم بر مسئله

حل عددی معادلات

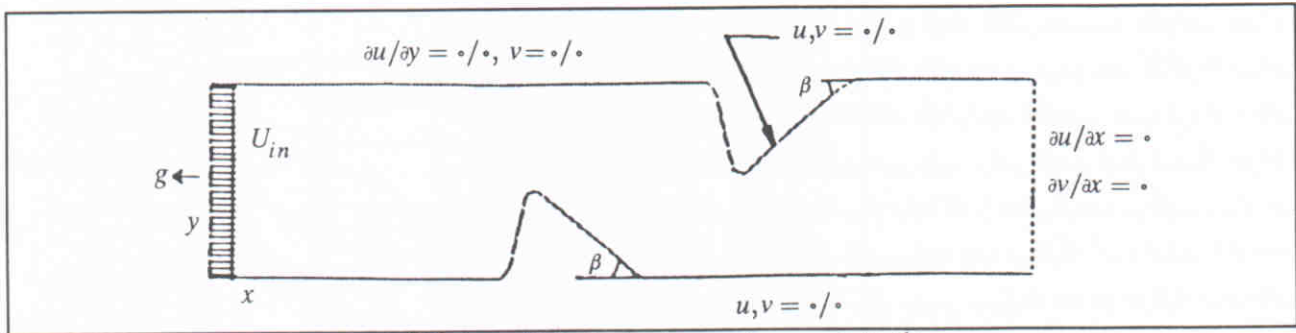
در این بخش به حل عددی معادلات حاکم بر جریان سیال پرداخته می‌شود. ابتدا جریان مایع در مسیر خارج از گازگیر حل می‌شود.



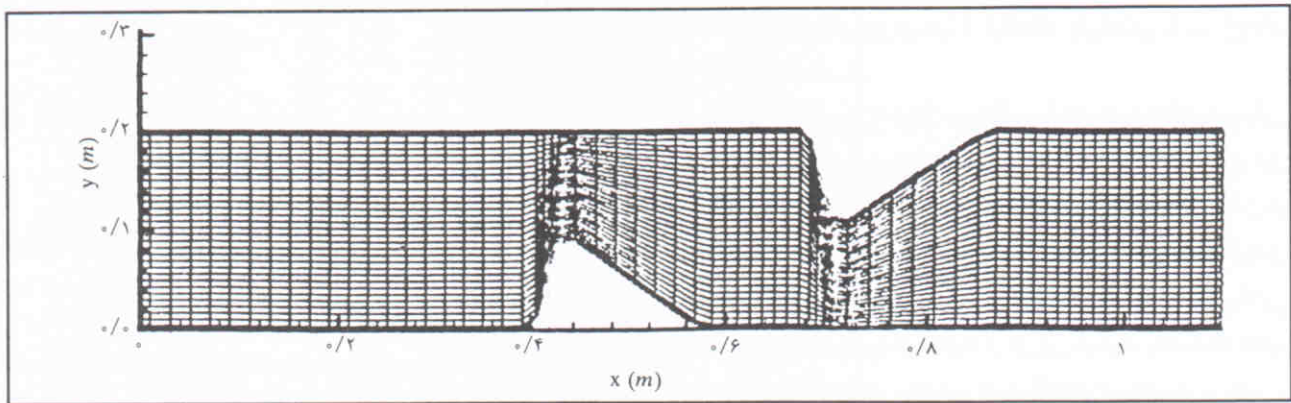
شکل ۱. طرح دستگاه آزمایش.



شکل ۲. دستگاه ساخته شده.



شکل ۳. هندسه‌ی مجرا و محورهای مختصات انتخابی مجرای گازگیر.



شکل ۴. شبکه‌بندی فضای محاسباتی.

روش حل

در این طرح برای حل معادلات از روش محور مختصات منطبق بر مرزها استفاده شده است. برای به دست آوردن مؤلفه‌های سرعت و فشار، معادلات بقای جرم و اندازه حرکت در دستگاه مختصات دکارتی و در یک شبکه‌ی متمرکز^۳ حل می‌شوند. این بدان معناست که تمام متغیرها در مرکز حجم کنترل^۴ ذخیره شده‌اند. مؤلفه‌های سرعت روی وجوه حجم کنترل به روش میان‌یابی^۵ ری‌وچا^{۱۱} محاسبه می‌شوند و سپس به روش سیمپل‌سی^۶، همبستگی فشار-سرعت مدل می‌شود. جریان (شار)^۷ جابه‌جایی به روش هیبرید^{۱۲} گسسته شده و معادلات گسسته‌شده به ماتریس سه‌قطری تبدیل شده و سپس با الگوریتم ترماس حل شده است.

حل معادلات گسسته به روش تکرار بوده و هرگاه جمع مطلق خطاها نسبت به جریان‌های ورودی برای تمام متغیرها از مرتبه‌ی 10^{-4} باشد، محاسبات خاتمه می‌یابد. برای دست‌یابی به همگرایی، در هر مرحله حدود ۳۰۰۰ تکرار لازم است. در مرکز هر حجم کنترل یک گره جای گرفته، اما حجم کنترل‌های مجاور مرزها حاوی دو گره‌اند.

نتایج حل عددی و بحث

شکل ۵ بردارهای سرعت در مجرای با مشخصه‌ی $U_{in} = 1 \text{ m/hr}$ را نشان می‌دهد. در این سرعت، عدد رینولدز ورودی حدود 170

مجرای گازگیر شکل پیچیده‌ی دارد. شکل ۳ نشان‌دهنده‌ی هندسه‌ی جریان و محورهای مختصات انتخابی است. چنان‌که مشاهده می‌شود به‌دلیل تقارن، نصف مجرا حل شده است.

معادلات حاکم

به‌دلیل کم‌بودن سرعت ورودی در مجرا، معادلات سیال به صورت لایه‌یی^۱ حل شده است. این معادلات عبارتند از:

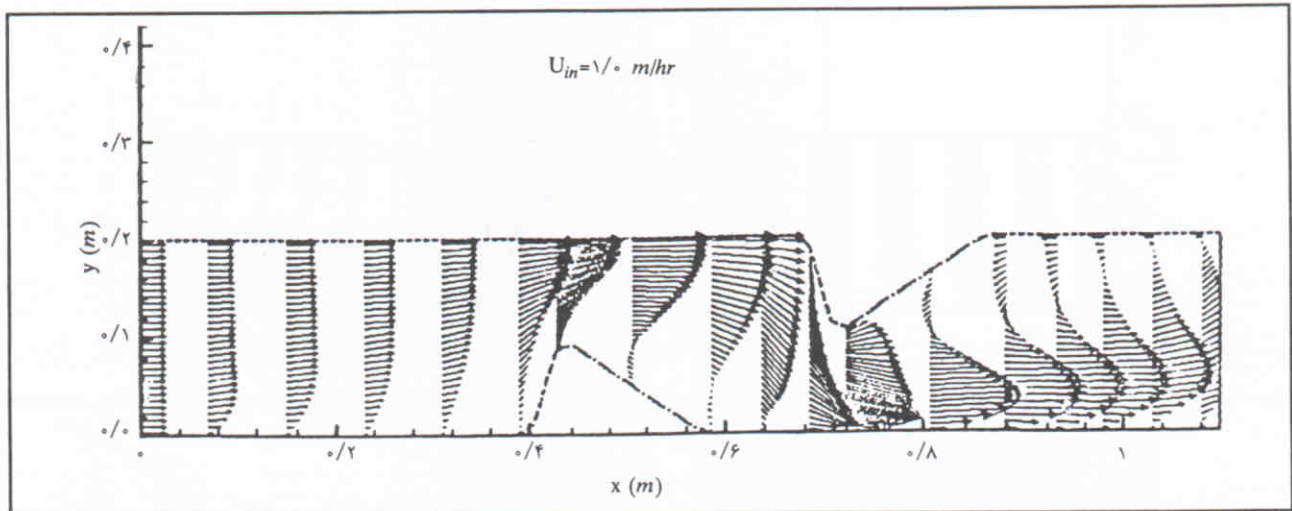
$$(1) \text{ بقای جرم سیال: } \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

$$(2) \text{ اندازه‌ی حرکت در جهت } x: u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \partial \nabla^2 u - g$$

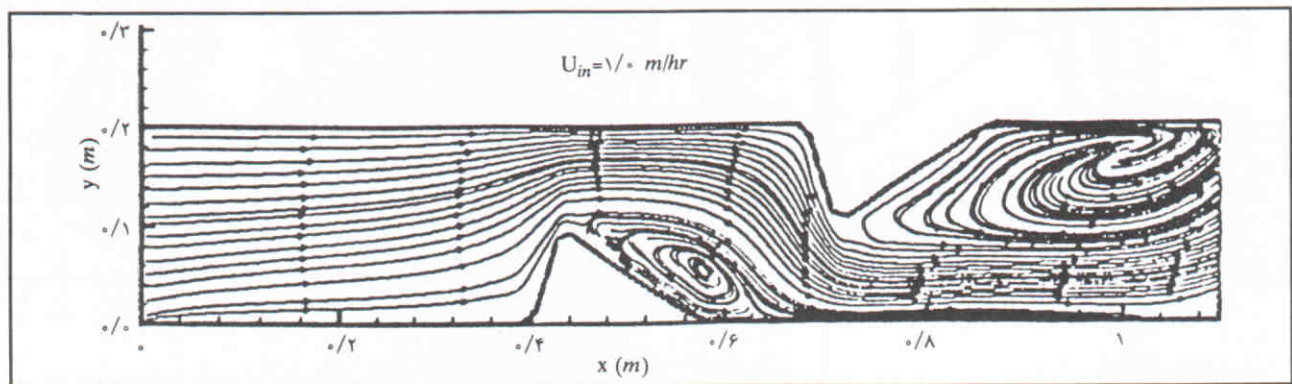
$$(3) \text{ اندازه‌ی حرکت در جهت } y: u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \partial \nabla^2 v$$

شرایط مرزی و ابعاد شبکه

چنان‌که ذکر شد جریان در نصف مجرا حل شده است. جریان در ورود به مجرا به صورت یکنواخت و در انتهای آن کاملاً توسعه‌یافته^۲ در نظر گرفته شده است. مرز بالا به جز ناحیه‌ی حضور گازگیر به صورت متقارن خواهد بود. مرز پایین جریان از روی دیواره عبور کرده و لذا سرعت‌های روی آن صفر خواهد بود. به‌دلیل وجود گازگیرها ابعاد شبکه در جهت x و y به صورت یکنواخت در نظر گرفته شده است. شکل ۴ شبکه‌بندی مجرا در حضور گازگیرها را نشان می‌دهد.



شکل ۵. بردارهای سرعت در حالتی که سرعت ورودی ۱ m/hr است.



شکل ۶. خطوط جریان.

اطراف دو گازگیر اول و دوم به وضوح آورده شده است تا نشان دهنده‌ی محل گردابه‌ها و حداکثر سرعت باشد.

چنان که در شکل ۷ دیده می‌شود، قدرت گردابه‌ها افزایش یافته و اثر آن تا موازی گازگیر اول دیده می‌شود. همچنین نسبت سرعت حداکثر به سرعت ورودی افزایش یافته است. در این حالت سرعت ۷ از ۴- تا ۲ mm/s تغییر می‌کند که هم‌مرتب به با سرعت u خواهد بود و نشان دهنده‌ی قدرت گردابه‌هاست.

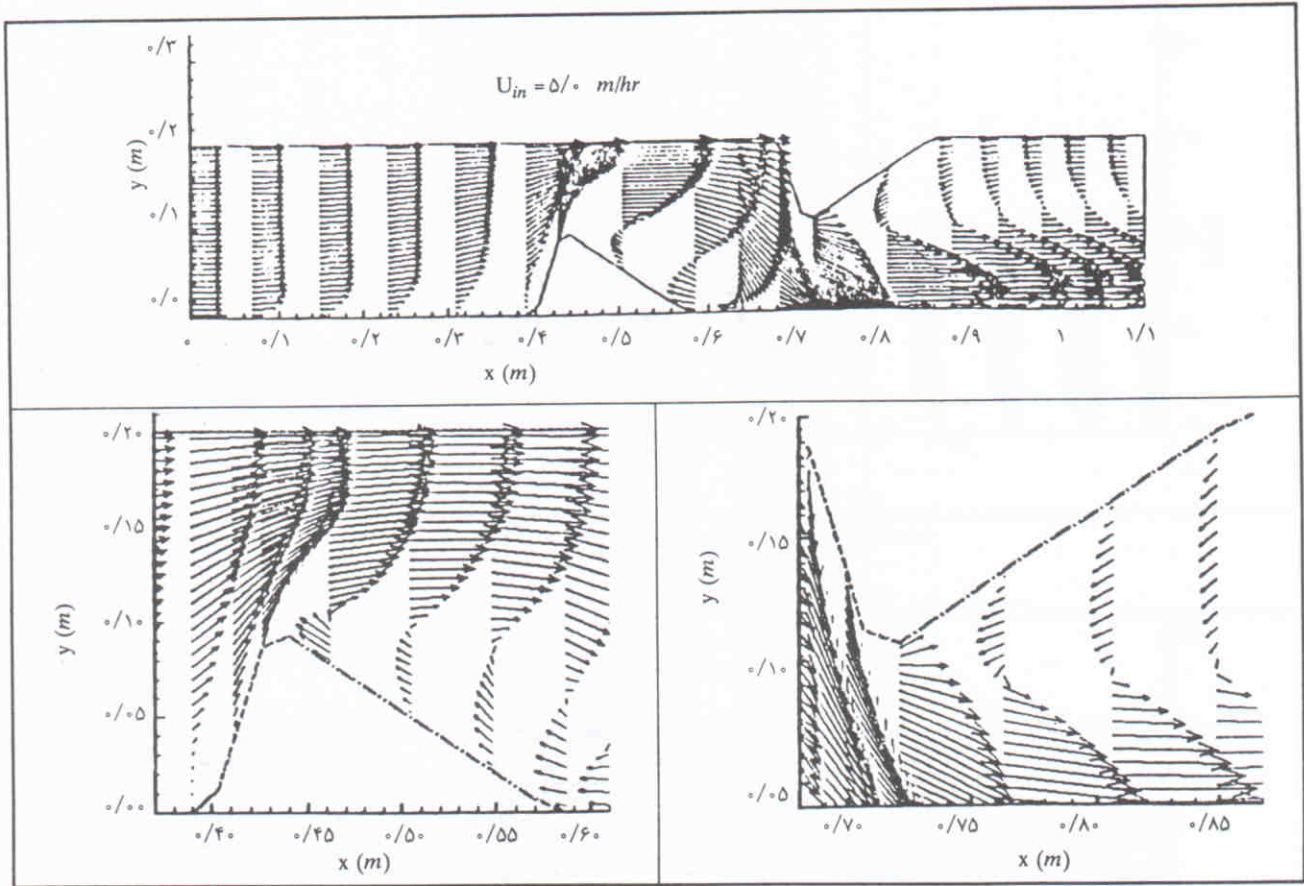
این شکل نشان می‌دهد که افزایش سرعت ورودی، به شدت به قدرت گردابه‌ها خواهد افزود و این قدرت می‌تواند ذرات لجن چسبیده به گازگیرها را شسته و با خود به سمت پائین ببرد.

شکل ۸ نشان دهنده‌ی تأثیر سرعت ورودی در نمودار سرعت نقاط مختلف مجراست. برای مجرا دو نقطه در نظر گرفته شده است: $x = 0.445m$ جایی است که جریان از روی جداره بلند شده و از روی گازگیر عبور می‌کند. مشاهده می‌شود که اگر سرعت ورودی $1 m/hr$ باشد، در نقطه‌ی $x = 0.445m$ و در محور عرضی سرعت به $2/8 m/hr$ خواهد رسید. در صورتی که اگر سرعت ورودی $3 m/hr$ باشد، سرعت

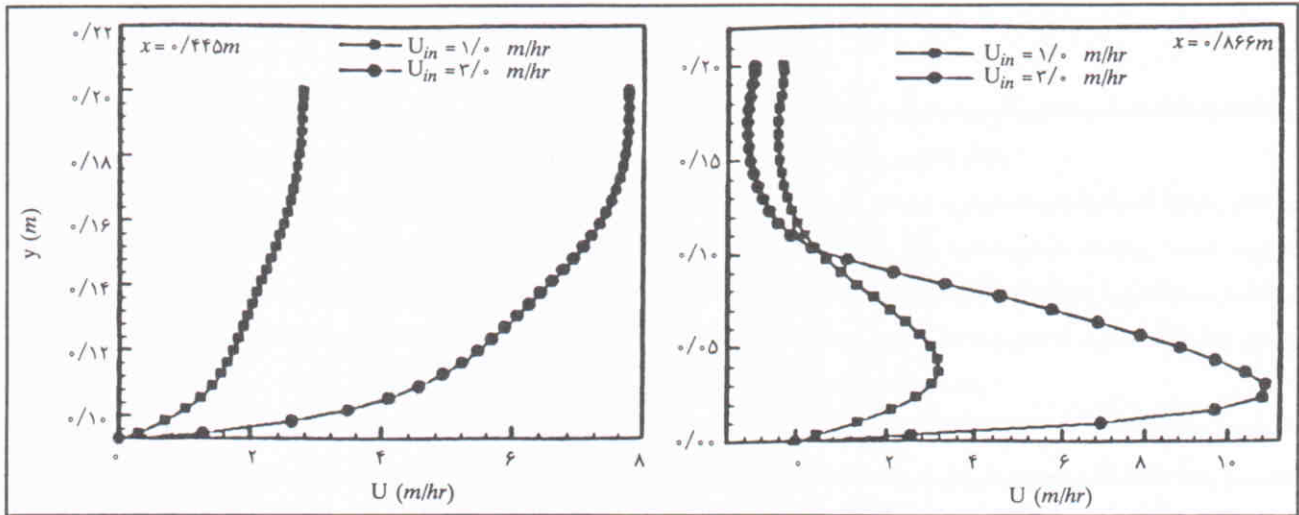
خواهد بود که نشان دهنده‌ی لایه‌یی بودن جریان است. جریان پس از رسیدن به گازگیرها تغییر مسیر داده و به دلیل کاهش سطح مقطع سرعت آن افزایش خواهد یافت. در پشت هر گازگیر گردابه‌یی ایجاد شده که اندازه‌ی آن بستگی به فاصله‌ی دو گازگیر دارد.

شکل ۶ خطوط جریان در شکل ۵ را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که به دلیل حضور گرداب در بالای هر گازگیر، از سطح مقطع مؤثر جریان کاسته می‌شود. لذا در این نقاط سرعت تا چند برابر افزایش می‌یابد. همچنین دیده می‌شود که قبل از گازگیر اول به دلیل تغییر انحنای خطوط جریان، سرعت کاهش می‌یابد. این کاهش سرعت ممکن است به افزایش فشار در این نقاط منتهی شود. در نقطه‌ی $x = 0.7m$ از شکل ۵، حداکثر سرعت اتفاق می‌افتد و به حدود $2/5$ برابر سرعت ورودی می‌رسد.

برای بررسی تأثیر سرعت ورودی در شکل گردابه‌ها، سرعت ورودی به مقادیر ۳ و ۵ متر در ساعت تغییر داده شده است. شکل ۷ بردارهای سرعت را در حالتی که سرعت ورودی به ۵ متر در ساعت افزایش یافته نشان می‌دهد. همچنین در این شکل بردارهای سرعت



شکل ۷. بردارهای سرعت در حالتی که سرعت ورودی 5 m/hr است.

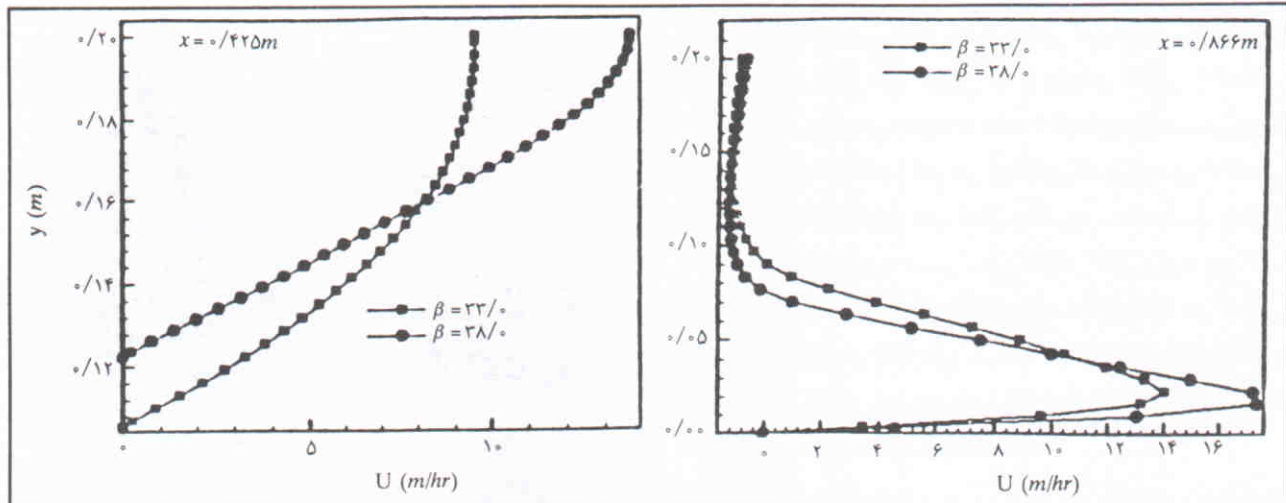


شکل ۸. تغییرات سرعت افقی نسبت به افزایش سرعت ورودی.

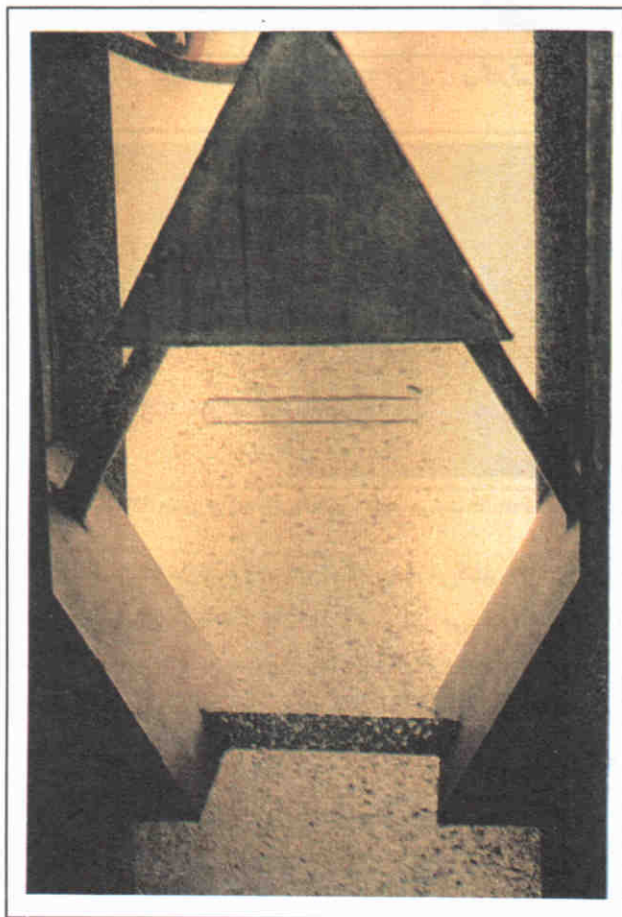
بر اثر افزایش سرعت ورودی خطی نیست، بلکه توانی از افزایش سرعت ورودی است. مقایسه‌ی نسبت بیشینه در این مقطع به سرعت ورودی که به صورت $\frac{3}{4}$ و $\frac{11}{3}$ است، نشان می‌دهد که این نسبت از ۳ به حدود ۴ افزایش خواهد یافت.

زاویه‌ی β نیز — علاوه بر تأثیر سرعت ورودی — در قدرت

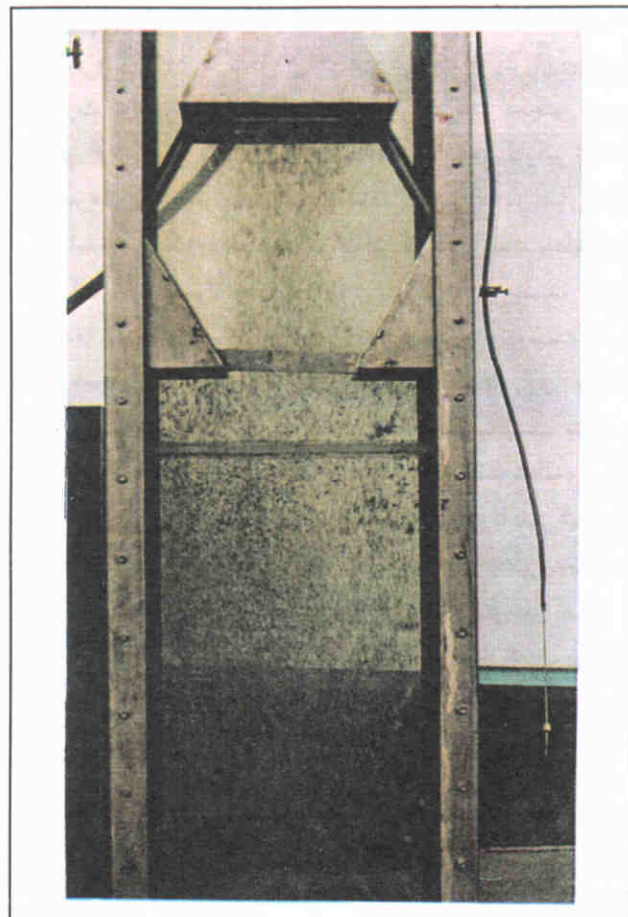
در همین نقطه، و در وسط مجرا به حدود 8 m/hr خواهد رسید. اما این تغییرات در ناحیه‌ی گردابه‌ی پس از گازگیر دوم شدیدتر خواهد بود. در مقطع $x = 0.866\text{ m}$ ، سرعت بیشینه در حالتی که $u_{in} = 1\text{ m/hr}$ است به 3 m/hr می‌رسد، اما با افزایش سرعت ورودی به 3 m/hr ، این بیشینه به 11 m/hr خواهد رسید. چنان که ملاحظه می‌شود، تغییر قدرت گردابه



شکل ۹. تأثیر تغییر زاویه β در سرعت افقی در $U_{in} = 3 \text{ m/hr}$.



شکل ۱۱. مشاهده‌ی حرکت حباب‌های هوا جهت هم‌پوشانی گازگیرها.



شکل ۱۰. حرکت حباب‌های هوا از بین گازگیرها.

مشاهدات تجربی

پس از ریختن لجن در دستگاه، چون رنگ سیاه لجن بی‌هوای مشاهدات عینی را مقدور نمی‌ساخت، عکس‌برداری از مسیر جریان میسر نشد، و مسیر حرکت گاز با ایجاد حباب‌های هوا در آب زلال دیده می‌شد. در این آزمایش مشاهده شد که حباب‌ها در کف قطری بین

گردابه‌ها مؤثر است. شکل ۹ نشان‌دهنده‌ی تأثیر زاویه‌ی β در مؤلفه سرعت افقی، در $U_{in} = 3 \text{ m/hr}$ است. افزایش زاویه‌ی β از 33° به 38° ، سرعت بیشینه را در دو مقطع $x = 0.425 \text{ m}$ ، $x = 0.866 \text{ m}$ به شدت تغییر می‌دهد. این افزایش زاویه قادر است نسبت سرعت بیشینه را از $4/5$ به $6/5$ افزایش دهد.

شد. شکل ۱۲ گردابه‌یی را که بعد از گازگیر دوم ایجاد می‌شود نشان می‌دهد. در آزمایش‌های تجربی که با زاویه‌ی گازگیر $\beta=60^\circ$ و $\beta=55^\circ$ و با سرعت‌های ۱ m/hr تا ۸/۶۴ m/hr انجام شد، مسیر جریان همراه با گردابه‌ها مشاهده شد. در آزمایشی که با زاویه‌ی $\beta=60^\circ$ و سرعت ۸/۶۴ m/hr انجام شد، انتقال رنگ به سمت راست جداره‌ی دستگاه و برگشت آن به مسیر سطح گازگیر قابل رؤیت بود که با گردابه‌ی بالایی در شکل ۶ مطابقت دارد (شکل ۱۳). در آزمایش دیگری که در زاویه‌ی $\beta=55^\circ$ و سرعت ۱/۶ m/hr انجام شد، اگرچه جریان ابتدا از گازگیر دور شد ولی برگشت آن به سمت گازگیر بسیار کمتر از وقتی است که سرعت زیاد است.

نتیجه‌گیری

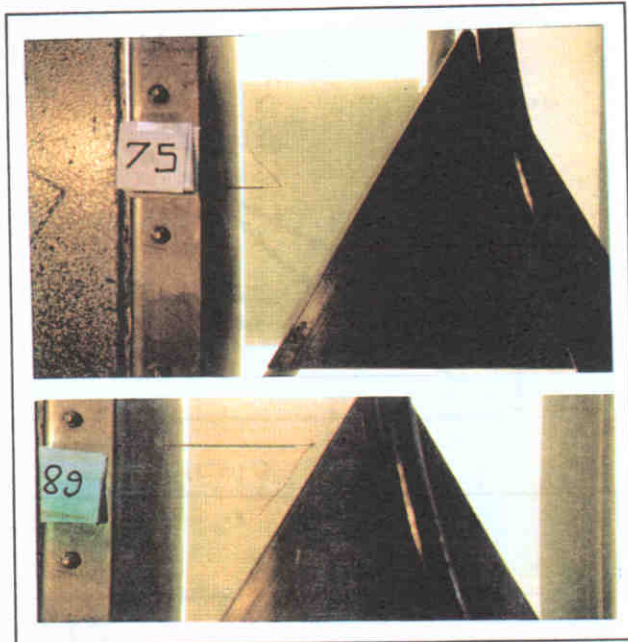
بخش نظری حل عددی معادلات نشان می‌دهد که جریان در مجرا و پشت گازگیرها به شدت متأثر از سرعت ورودی و زاویه‌ی β است. تأثیر سرعت ورودی در شکل ۷ به گونه‌یی است که افزایش آن در ورود به صورت توانی در قدرت گردابه‌ها تأثیر می‌کند. همچنین تغییر زاویه‌ی β در شکل ۹ نشان می‌دهد که هرچه زاویه‌ی گازگیر زیادتر شود سرعت بیشینه افزوده می‌شود. مشاهدات عینی که در تصاویر ۱۲ و ۱۳ آمده است نشان‌دهنده‌ی تأثیرات این دو متغیر است. به دلیل این که ذرات لجن معمولاً به سطح بالای گازگیرها می‌چسبند، وجود گردابه‌ها و قدرت آنها باعث کنده‌شدن لجن و سقوط آن به سمت پائین است. همچنین افزایش بیش از اندازه‌ی قدرت گردابه‌ها، روی منطقه‌ی آرام اثر گذاشته و به فرار لجن کمک می‌کند که مطلوب نیست. بنابراین باید سرعت بهینه‌یی وجود داشته باشد که ضمن حفظ منطقه‌ی آرام، بتواند گردابه‌یی با قدرت مورد نظر ایجاد کند. همچنین با تغییر β قدرت گردابه‌ها افزوده می‌شود. می‌توان با تغییر این دو متغیر به صورت همزمان شرایط بهینه‌ی سیستم را ایجاد کرد. آزمایش‌های عملی و مشاهدات عینی در تزریق حباب‌های هوا نشان داد که هم‌پوشانی گازگیرهای دو طبقه باید بیش از ۷cm باشد.

پانوشتها

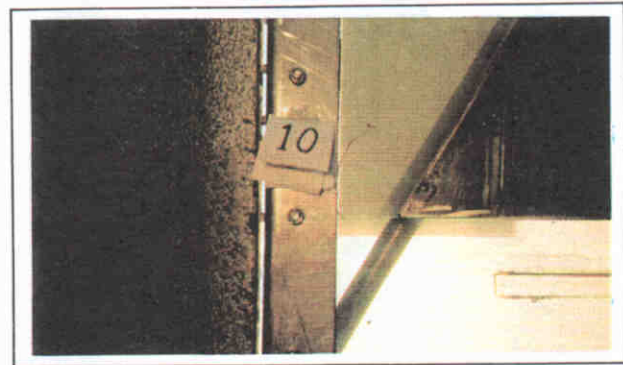
1. laminar
2. fully developed
3. non-staggered
4. control volume
5. interpolation
6. SIMPLEC
7. flux

منابع

1. Davidson, L., Farhanieh, B, "A Finite volume Code Employing collocated variable Arrangement and Cartesian velocity components for Computation of Fluid Flow and Heat Transfer Complex Three-Dimensional Geometries", Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden, (1991).
2. Patankar, S.V., "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", McGraw-Hill, Washington, (1980).



شکل ۱۲. تشکیل گردابه و بازگشت جریان روی گازگیر.



شکل ۱۳. مسیر جریان برای گازگیر 55° و سرعت ۱/۶ m/hr.

۵/۱ تا ۱ میلی‌متر دارند، ولی به تدریج که صعود می‌کنند با کاهش فشار قطر آنها افزایش می‌یابد و به ۳ تا ۴ میلی‌متر می‌رسد (شکل ۱۰). حرکت افقی حباب‌ها به چپ و راست به تدریج افزوده می‌شود، ولی این انحراف از مسیر در راستای قائم مجموعاً از ۳ سانتی‌متر تجاوز نمی‌کند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در طراحی، هم‌پوشانی گازگیرها عملاً نمی‌تواند از ۷ سانتی‌متر کمتر باشد (شکل ۱۱).

برای مشاهده‌ی مسیر جریان در بین گازگیرها، در 20° سانتی‌متری زیر گازگیر اول لوله‌یی به قطر $3/0$ میلی‌متر که در نوک آن لوله‌یی به قطر $3/0$ میلی‌متر لحیم شده بود طوری کار گذاشته شد که نوک آن می‌توانست هر موقعیتی از محور دستگاه تا جداره را داشته باشد. این لوله از طریق شیر تنظیم به محفظه‌ی تزریق رنگ وصل شد. در عمل، رنگ در طول مسیر تا بالای گازگیر رفته‌رفته کمرنگ و مغشوش می‌شد. برای حل این مشکل، لوله‌ی تزریق رنگ به حدود محلی که کمرنگ شده بود منتقل و با تکرار آزمایش تأیید مسائل نظری مشاهده