

شبیه‌سازی عددی جذب فیزیکی CO₂ در فیلم ریزان متانول: مقایسه موج‌زایی فعال و دیواره سینوسی غیرفعال

مقاله پژوهشی

محمد واقفی آریان^۱، مسعود محمدی^۲ , شیدوش وکیلی پور^۳

Email: mas.mohammadi@ut.ac.ir

چکیده: جذب گاز با استفاده از فیلم مایع ریزان، یکی از روش‌های کارآمد در کاربردهای صنعتی از جمله جذب CO₂ به‌شمار می‌رود. با این حال، شکل‌گیری لایه مرزی غلظتی در نزدیکی سطح آزاد فیلم، نرخ انتقال جرم و بازدهی فرآیند را کاهش می‌دهد. در این پژوهش، به‌منظور کاهش این محدودیت، دو راهکار تقویت انتقال جرم بررسی شده است: روش فعال مبتنی بر موجی کردن فیلم از طریق نوسان دبی جرمی ورودی، و روش غیرفعال با استفاده از دیواره‌های سینوسی. شبیه‌سازی جریان و انتقال جرم با بهره‌گیری از یک حلگر تعقیب سطح فاصل (ALE-IT) کارآمد برای جریان حول لوله انجام شده است. پارامترهای هندسی دیواره سینوسی شامل دامنه‌ای معادل ۱۰ تا ۵۰ درصد ضخامت فیلم و طول موج ۲ تا ۲۰ برابر ضخامت فیلم است. نتایج نشان داد که روش فعال بیشترین جذب کل را ایجاد می‌کند، اما دیواره سینوسی با دامنه‌های ۲۰ تا ۵۰ درصد و طول موج‌های کوتاه ۲ تا ۵ برابر ضخامت فیلم، عدد شروود میانگین را به حدود ۹۰ تا ۱۱۰ درصد روش فعال برساند.

کلمات کلیدی:

جذب فیزیکی CO₂، فیلم مایع ریزان، موج‌زایی فعال، دیواره سینوسی غیرفعال، روش تعقیب سطح فاصل.

Numerical Simulation of Physical CO₂ Absorption Enhancement in Methanol Falling Film: Comparison of Active and Passive Wave Generation

Mohammad Vaghefi Aryan^۴, Masoud Mohammadi^۵ , Shidvash Vakiliipour^۶

Email: mas.mohammadi@ut.ac.ir

Abstract: Gas absorption using a falling liquid film is considered an efficient technique in industrial applications, including CO₂ absorption. However, the formation of a concentration boundary layer near the free surface of the film reduces the mass transfer rate and overall process efficiency. In this study, two mass-transfer enhancement strategies are investigated to mitigate this limitation: an active method based on inducing waves in the liquid film through oscillation of the inlet mass flow rate, and a passive method employing sinusoidal walls. Flow

^۱ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی هوافضا، دانشکدگان علوم و فناوری‌های میان‌رشته‌ای، دانشگاه تهران، تهران، ایران، ایمیل:

mohammadvaghefi.a@ut.ac.ir

^۲ نویسنده مسئول، استادیار، دانشکدگان علوم و فناوری‌های میان‌رشته‌ای، دانشگاه تهران، تهران، ایران، ایمیل: mas.mohammadi@ut.ac.ir

^۳ دانشیار، دانشکدگان علوم و فناوری‌های میان‌رشته‌ای، دانشگاه تهران، تهران، ایران، ایمیل: [vakiliipour@ut.ac.ir](mailto:vakilipour@ut.ac.ir)

^۴ M.Sc. Graduate in Aerospace Engineering, College of Interdisciplinary Science and Technology, University of Tehran, Tehran, Iran, Email: mohammadvaghefi.a@ut.ac.ir

^۵ Corresponding author. Assistant Professor, College of Interdisciplinary Science and Technology, University of Tehran, Tehran, Iran, Email: mas.mohammadi@ut.ac.ir

^۶ Associate Professor, College of Interdisciplinary Science and Technology, University of Tehran, Tehran, Iran, Email: [vakiliipour@ut.ac.ir](mailto:vakilipour@ut.ac.ir)

and mass transfer are simulated for tube configurations using an advanced interface-tracking solver (ALE-IT). The geometric parameters of the sinusoidal wall include amplitudes ranging from 10% to 50% of the film thickness and wavelengths between 2 and 20 times the film thickness. The results indicate that the active method produces the highest overall absorption. Nevertheless, sinusoidal walls with amplitudes of 20–50% and short wavelengths of 2–5 times the film thickness enhance the average Sherwood number upto 90%-110% of the active method.

Keywords:

CO₂ absorption, Falling liquid film, Active wave generation, passive Sinusoidal wall, Interface tracking method.

۱ مقدمه

افزایش روزافزون غلظت گازهای گلخانه‌ای در اتمسفر، به‌ویژه دی‌اکسید کربن CO₂، به عنوان یکی از اصلی‌ترین عوامل پدیده گرمایش جهانی و تغییرات اقلیمی شناخته می‌شود. در میان راهکارهای موجود برای کنترل و کاهش انتشار، فرآیندهای جذب و جداسازی CO₂ از جریان‌های گازی صنعتی نقش کلیدی ایفا می‌کنند [۱]. روش‌های متنوعی برای جداسازی CO₂ توسعه یافته‌اند که از آن جمله می‌توان به جذب شیمیایی، جذب فیزیکی، جذب سطحی، فرآیندهای غشایی و کرایونیک اشاره کرد. یکی از رویکردهای مؤثر در این زمینه، بهره‌گیری از جاذب‌های ریزساختار فیلم مایع است. در این فرآیند، گاز حاوی CO₂ در تماس با یک فاز مایع مناسب (حلال) قرار گرفته و CO₂ بر اساس اختلاف پتانسیل شیمیایی یا واکنش با حلال، از فاز گاز به فاز مایع منتقل می‌شود [۲]. این جاذب‌ها با مجاری در مقیاس میلی‌متر، مزایای همچون نسبت سطح به حجم بسیار بالا، نرخ انتقال حرارت و جرم فوق‌العاده، کنترل شرایط فرآیند و کاهش مصرف انرژی و مواد را ارائه می‌دهند [۳].

با توجه به فضای بسیار کم این راکتورها، روش‌های بهبود عملکرد جذب می‌تواند اهمیت ویژه‌ای پیدا کند. این روش‌ها، که به منظور برهم‌زدن لایه‌های مرزی هیدرودینامیکی و غلظتی و در نتیجه افزایش نرخ انتقال جرم به کار می‌روند، به دو دسته کلی فعال^۷ و غیرفعال^۸ تقسیم می‌شوند [۴]. روش‌های فعال برای بهبود انتقال جرم نیازمند اعمال انرژی خارجی به سیستم هستند. متداول‌ترین روش فعال برای بهبود انتقال جرم در فیلم‌های ریزان، القای موج‌های منظم و با دامنه بزرگ بر سطح فیلم است که اغلب از طریق اعمال نوسان سینوسی در دبی ورودی مایع انجام می‌شود. این نوسانات منجر به شکل‌گیری امواج تکین^۹ و سطحی ریز^{۱۰} می‌شود که فرایند اختلاط و نرخ جذب را به طور چشم‌گیری افزایش می‌دهند. روش‌های غیرفعال بر تغییر در هندسه ثابت سیستم متمرکز هستند و نیازی به صرف انرژی خارجی مداوم ندارند. تغییر شکل دیواره یکی از رایج‌ترین این روش‌ها است. این ساختاردهی سطح، با وادار کردن سیال به تغییر مسیر، باعث ایجاد جریان‌های گردابه‌های فرعی در فیلم مایع شده و با افزایش سطح تماس مؤثر و بهبود جابجایی داخلی، نرخ انتقال جرم را بهبود می‌بخشد. هر یک از دو روش فعال و غیرفعال مورد توجه در این پژوهش دارای مزایا و معایبی هستند که انتخاب روش بهینه به شرایط عملیاتی، هزینه‌ها و محدودیت‌های طراحی بستگی دارد. این پژوهش به دنبال مطالعه عددی

^۷ active

^۸ passive

^۹ solitary waves

^{۱۰} capillary waves

عملکرد دو راه کار فعال (موجی کردن سطح از طریق نوسان دبی ورودی) و غیرفعال (دیواره سینوسی) در جذب CO_2 با روش فیلم مایع ریزان است.

مطالعات متعددی در حوزه جذب CO_2 با استفاده از فیلم مایع ریزان انجام شده است. زانفیر و همکاران (۲۰۰۵) [۵] با مدل سازی دوبعدی جذب دی اکسید کربن در محلول هیدروکسید سدیم در یک رآکتور ریز ساختار فیلم مایع نشان دادند که واکنش سریع بین CO_2 و NaOH موجب می شود تقریباً تمام CO_2 حل شده در فاصله کوتاهی از سطح تماس گاز-مایع مصرف شود. همچنین عواملی مانند غلظت NaOH ، ضخامت فیلم مایع و گاز، و زمان اقامت سیال شناسایی شدند که می توانند بر میزان جذب و کارایی رآکتور اثرگذار باشند. آلبرت و همکاران (۲۰۱۴) [۶] تعامل پیچیده بین هیدرودینامیک و انتقال جرم بین سطحی در فیلم های ریزان را با استفاده از روش حجم سیال (VOF) به دو صورت پایا و ناپایا مطالعه کردند. آن ها نشان دادند گردابه ها و جریان های برگشتی که در فیلم های در حال سقوط رخ می دهند، توزیع محلی نرخ انتقال جرم به داخل فیلم مایع را تا حد قابل توجهی افزایش می دهند. هو و همکاران (۲۰۱۴) [۴] شبیه سازی های عددی جذب CO_2 را با روش حجم سیال در جریان های موج دار روی یک صفحه عمودی انجام و تاثیر گردابه های نزدیک به دیواره و گردابه های نزدیک به سطح فاصل مایع و گاز را مطالعه کردند. نتایج آن ها نشان داد که انتقال جرم در سراسر فیلم در حال سقوط با چرخش (ورتیستی) نزدیک به سطح فاصل همبستگی بالایی دارد و استفاده از حاصل ضرب غلظت در ورتیستی می تواند توصیف بهتری از انتقال جرم ارائه دهد.

چکیچ و همکاران (۲۰۱۵) [۷] جذب گاز در یک فیلم ریزان موجی را بر اساس یک مدل تقریبی موج بلند شامل دو مرحله حل مسئله هیدرودینامیکی برای معادلات تکامل موج و سپس حل مسئله انتشار برای محاسبه جذب گاز در فیلم مایع بررسی کردند. آن ها نشان دادند که نرخ جذب برای رژیم های موجی در مقایسه با جریان بدون موج افزایش می یابد. همچنین، محاسبات گذرای متعدد نشان داد که بزرگترین گرادیان ها و در نتیجه بزرگترین شارهای گاز محلی در فرورفتگی های موج مشاهده می شوند که در آن ضخامت لایه مایع حداقل است. هو و همکاران (۲۰۱۷) [۸] جذب CO_2 را توسط یک فیلم مایع ریزان روی یک صفحه عمودی با یک پنجره باز بررسی کردند و عملکرد انتقال جرم بهبود یافته را نشان دادند. نتایج شبیه سازی VOF نشان می دهد که مقدار متوسط ضریب جذب برای ناحیه پنجره باز (شکاف) حدود ۱۹٪ بیشتر از مقدار فیلم محصور شده با دیوار است.

چن و همکاران (۲۰۲۱) [۹] پدیده رزونانس را در امتداد میکروکانال های موج دار نشان دادند که انتقال جرم گاز-مایع را در میکروکانال ها با فیلم در حال سقوط بهتر می کند. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که افزایش سطح مشترک گاز-مایع در اثر نوسان فیلم و نیز بهبود اختلاط جریان گردابی داخلی فیلم مایع موجب افزایش انتقال جرم تا حدود ۴۰٪ می شود. ملکی و همکاران (۲۰۱۹) [۱۰] با توسعه یک مدل عددی دوبعدی بر پایه معادلات انتقال جرم، حرارت و هیدرودینامیک، جذب گاز دی اکسید کربن توسط محلول آبی مونو اتانول آمین (MEA) را در یک واکنشگاه لایه ریزان انجام شبیه سازی کردند. آن ها نشان دادند که افزایش دبی مایع و گاز باعث افزایش میزان جذب CO_2 می شود و فقط لایه ای بسیار نازک (حدود $2\mu\text{m}$) از فیلم مایع به طور مؤثر در فرآیند جذب مشارکت دارد.

ایشیکاوا و همکاران (۲۰۲۲) [۱۱] به طراحی صفحات دارای میکرو بافل را برای جذب CO_2 در واکنشگاه های فیلم ریزان پرداختند. در این مطالعه، برای القای جریان چرخشی و اختلاط همرفتی از چندین بافل با ارتفاع از ۱۰۰ تا ۲۰۰ میکرومتر در فواصل ۱ تا ۳ میلی متر با زوایای ۳۰ تا ۶۰ درجه روی یک صفحه تخت استفاده شد. نتایج آن ها نشان داد که این صفحات به دلیل جریان چرخشی نسبت به صفحه استاندارد بدون بافل ضریب جذب را تا ۶۰ درصد افزایش می دهد. چن و همکاران (۲۰۲۳) [۱۲] عملکرد جذب CO_2 را در فیلم مایع متانول با غلظت های مختلف نانوذرات Al_2O_3 به دو روش

VOF و ALE مطالعه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که روش ALE با دقت و کارایی محاسباتی بالا، داده‌های تجربی را بهتر مطابقت می‌دهد. همچنین، با افزایش عدد رینولدز تا $Re = 40$ ضریب انتقال جرم افزایش می‌یابد ولی برای $Re > 40$ ، انتقال جرم ثابت مانده یا حتی اندکی کاهش می‌یابد.

کلانتر و عباسی (۲۰۲۴) [۱۳] تأثیر شکل هندسی جاذب یک آب‌شیرین‌کن خورشیدی تک‌شیب را در یازده هندسه متفاوت با شرایط کاملاً یکسان به صورت عددی ارزیابی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که بهترین عملکرد مربوط به هندسه‌ای با دندانه‌های مستطیلی است؛ به گونه‌ای که دمای جاذب در شدت تابش ۷۵۰ وات بر مترمربع به ۳۴۹ کلوین می‌رسد و مقدار آب تقطیرشده نسبت به سایر حالات بیشتر است. این مطالعه به روشنی نشان می‌دهد که در شرایط مرزی و عملیاتی یکسان، صرف تغییر شکل هندسی سطح می‌تواند عملکرد فرآیندهای انتقال سطحی را به طور معناداری تغییر دهد.

قاسم و همکاران (۲۰۲۳) [۱۴] با استفاده از نرم‌افزار COMSOL جذب CO_2 در واکنشگاه‌های غشایی فیلم ریزان و حالت مرطوب در محلول مونو اتانول آمین (MEA) مدل‌سازی کردند. آن‌ها نشان دادند که راکتور غشایی فیلم ریزان^{۱۱} بازده جذب ۸۵ درصد دارد، در حالی که حالت مرطوب تنها ۶۰ درصد بازده دارد. دیول و همکاران (۲۰۲۴) [۱۵] تأثیر شیارهای مستطیلی سطحی را بر نوسانات بین‌سطحی در جریان فیلم ریزان بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که وجود آرایه‌هایی از شیارهای مستطیلی عمود بر جهت جریان می‌تواند باعث بهبود قابل توجه نوسانات موجی و ناپایداری فیلم شود. ولی برای هر ارتفاع شیار، یک فاصله بهینه بین شیارها وجود دارد که بیشترین نوسانات را ایجاد می‌کند. بنابراین، بهینه‌سازی هندسه سطح برای ایجاد نوسانات قوی‌تر، راهبرد مؤثرتری نسبت به صرفاً افزایش سطح تماس است.

دیول و همکاران (۲۰۲۵) [۱۶] در پژوهش دیگری اثر ساختاردهی سطحی و امواج تشدید القایی را بر انتقال جرم در جذب فیلم ریزان CO_2 بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که ایجاد موج‌ها با بهینه‌سازی فاصله و ارتفاع ساختارهای سطحی می‌تواند ضریب انتقال جرم را تا چهار برابر نسبت به صفحه صاف افزایش دهد. این بهبود عمدتاً به دلیل الگوهای اختلاط همرفت و آشفستگی داخلی در موج‌های تند است که لایه مرزی غلظتی را به طور پیوسته به هم می‌زند. رهائی و همکاران (۲۰۱۹) [۱۷] بهبود انتقال حرارت در مبدل‌های مبتنی بر فیلم ریزان را با شبیه‌سازی عددی اثر افزودن متلاطم‌کننده جریان (بافل) در سمت داخلی لوله‌ها بررسی کردند. این شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار انسیس فلوئنت انجام شده است. آن‌ها نشان دادند با نصب بافل می‌تواند به طور قابل توجهی بازده انتقال حرارت را بهبود بخشد، سرعت تبخیر آب را افزایش دهد، طول اواپراتور و کسر حجمی اواپراتور را کاهش دهد و هزینه‌های سرمایه‌ای را کاهش دهد. بررسی روش‌های اصلاح سطح یا نوسانی کردن فیلم برای تقویت فرآیندهای انتقال حرارت و جذب CO_2 را می‌توان در مطالعات متعدد دیگری نیز مشاهده کرد [۱۸] [۱۹] [۲۰].

در کنار پژوهش‌های بین‌المللی، مطالعات داخلی سال‌های اخیر نیز عمدتاً بر تقویت پدیده‌های انتقال از طریق اصلاح هندسی و ایجاد ساختارهای متلاطم‌کننده متمرکز بوده‌اند و به دلیل هم‌خوانی مستقیم با رویکرد غیرفعال پژوهش حاضر، مرور آن‌ها ضروری است [۲۱] [۲۲]. سعدالله و همکاران (۲۰۲۴) [۲۳] مولدهای گردابه‌ای با ضابطه‌ی موج سینوسی را در مبدل‌های حرارتی فشرده بررسی کردند و با حل دوبعدی پایای جریان آرام (عدد رینولدز ۴۰۰ تا ۱۰۰۰) در نرم‌افزار انسیس فلوئنت نشان دادند که مولد سینوسی با زاویه حمله ۲۰ درجه و طول ۶ میلی‌متر، مناسب‌ترین تعادل میان نرخ انتقال حرارت و افت فشار را فراهم می‌کند. جهانبخشی و همکاران (۲۰۲۶) [۲۴] اثر افزودن میکرولوله به یک میکروکانال چاه حرارتی

^{۱۱} falling film membrane contactor

موج‌دار با سطوح آبدوست و آبگریز را برای جریان نانوسیال مطالعه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزودن میکرولوله ضریب انتقال حرارت کلی سیستم را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد و با کاهش مقاومت حرارتی نواحی دوردست، توزیع یکنواخت‌تری از دمای سطح پردازنده ایجاد می‌کند؛ همچنین طول لغزش ۸ میکرومتر دبی جرمی را ۴۵٪ نسبت به حالت بدون لغزش افزایش می‌دهد و دمای سطح را حدود ۰٫۳٪ (یک درجه کلوین) کاهش می‌دهد.

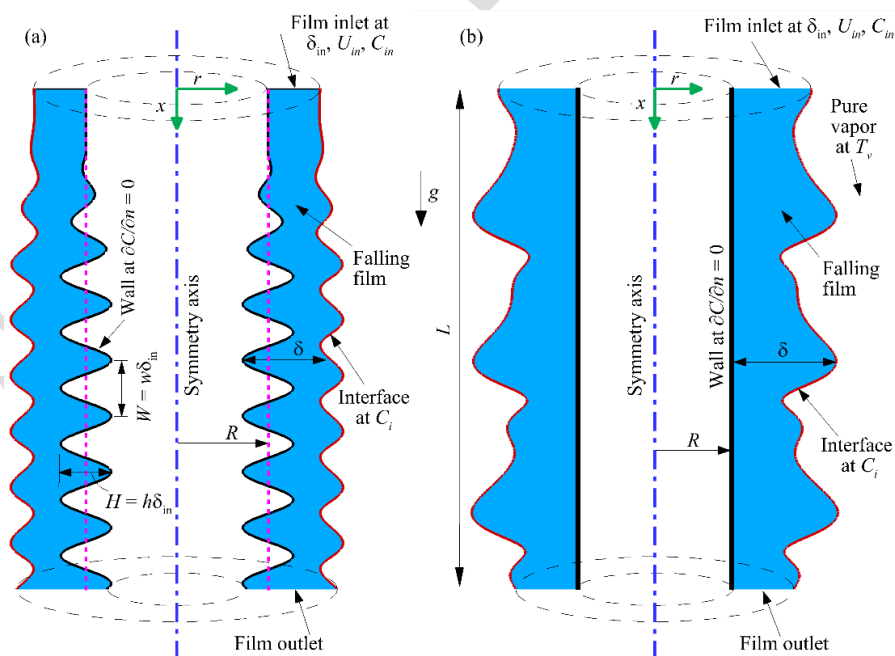
مرور مقالات گذشته نشان می‌دهد مطالعات زیادی در زمینه بهبود عملکرد جذب CO_2 انجام شده است. با این حال، همچنان تحقیقات در این زمینه و استفاده از روش‌های فعال و غیرفعال برای افزایش نرخ جذب ادامه دارد. بیشتر مطالعات فیلم ریزان یا به راهکارهای غیرفعال منفرد (سطوح موج‌دار/ریزساختارها) پرداخته‌اند یا به تحریک فعال جریان؛ اما مقایسه نظام‌مند «دیواره سینوسی» و «موجی کردن فیلم» در شرایط مرزی و حلگر یکسان دیده نمی‌شود. به‌طور مثال، در مطالعه هو و همکاران (۲۰۱۴) [۴] تمرکز بر جذب فیزیکی CO_2 و انتقال جرم بین‌سطحی در فیلم ریزان موج‌دار بر دیواره تخت تمرکز دارد، در حالی که پژوهش حاضر علاوه بر استفاده از هندسه محوری لوله‌ای، هر دو راهکار ایجاد موج به‌صورت فعال از طریق تحریک ورودی و دیواره سینوسی غیرفعال را مطالعه و مقایسه می‌کند. از سوی دیگر، نورشاد و همکاران [۲۵] که دیواره سینوسی را مطالعه کرده‌اند، به جذب گرماده بخار در فیلم ریزان محلول آبی LiBr پرداخته‌اند که از نظر سیال کاری و ساز و کار جذب فیزیکی متفاوت با پژوهش حاضر است. ضمن این که علاوه بر اثر هندسه سینوسی، اثر موج‌زایی فعال نیز در چارچوب عددی پژوهش حاضر تحلیل شده است که در مرجع [۲۹] دیده نمی‌شود.

هدف اصلی این پژوهش بررسی تأثیر پارامترهای هندسی کلیدی بر هیدرودینامیک فیلم و عملکرد فرآیند جذب فیزیکی CO_2 روی ریزلوله‌هایی با شعاع 1 mm و دیواره‌های سینوسی به عنوان روش غیرفعال بهبود نرخ جذب و مقایسه آن با روش فعال موج‌دار کردن فیلم روی سطح صاف است. نتایج حاصل از این پژوهش، به‌ویژه درک چگونگی تأثیر پارامترهای هندسی بر بازده جذب، می‌تواند در فرآیند طراحی و ساخت رآکتورهای ریزساختار کارآمدتر برای جداسازی CO_2 مورد استفاده قرار گیرد. به‌علاوه، مطالعات گذشته گروه تحقیقاتی حاضر که صرفاً معطوف به هندسه دوبعدی صفحه‌ای بود، در این تحقیق به لوله با هندسه دوبعدی متقارن محوری توسعه می‌یابد. بدین منظور، از روش شبیه‌سازی عددی مبتنی بر تعقیب سطح فاصل کاملاً کوپل (FCIT) که توسط وکیلی‌پور و همکاران (۲۰۲۱) [۲۶] و محمدی و همکاران (۲۰۲۴) [۲۷] استفاده می‌شود. این مدل، پس از اعتبارسنجی، می‌تواند به عنوان یک ابزار محاسباتی قوی در اختیار سایر پژوهشگران برای تحلیل طیف وسیعی از جریان‌های دوفازی گاز-مایع با سطح مشترک مشخص، به‌ویژه در سیستم‌های ریزساختار، قرار گیرد.

۲ مدل‌سازی و معادلات حاکم

میدان محاسباتی مسئله جذب فیزیکی CO_2 در شکل ۱ دیده می‌شود. هندسه، یک برش متقارن-محوری از لوله‌ای عمودی است که در آن فیلم مایع جاذب (متانول حامل CO_2) روی سطح بیرونی لوله به سمت پایین جریان دارد. به این ترتیب، مسئله در چارچوب دوبعدی متقارن-محوری حل می‌شود. دیواره‌ی لوله به دو صورت بررسی شده است: نخست، دیواره‌ی صاف که مبنای مقایسه است و همچنین بستر اجرای «روش فعال» روی همان دیواره؛ دوم، دیواره‌ی موج‌دار سینوسی که در آن دیواره با طول موج W و دامنه‌ی H مشخص به‌طور تناوبی بالا و پایین می‌رود. در ورودی، فیلم مایع با ضخامت اولیه یکنواخت و توزیع سرعت آرام و توسعه‌یافته وارد دامنه حل می‌شود.

جذب فیزیکی CO_2 در متانول (برخلاف جذب شیمیایی) با گرمای آزاد شده نسبتاً محدود همراه است و در مقیاس فیلم نازک با دبی‌های مورد بررسی، تغییرات دمای محلی ناشی از گرمای انحلال در مقایسه با ظرفیت حرارتی فاز مایع ناچیز است؛ به نحوی که اثر آن بر خواص انتقالی (نفوذپذیری، لزجت) و در نتیجه بر میدان سرعت و غلظت قابل صرف نظر است. از این رو، جذب CO_2 در متانول را در بازه‌ی عملیاتی مورد نظر این پژوهش تقریباً هم‌دما فرض شده است و به همین دلیل معادله‌ی انرژی حل نمی‌شود. غلظت گونه‌ی جذب‌شونده در مرز مشترک با قانون هنری [۲۸] به مایع مرتبط می‌شود و مقاومت سمت گاز در مقایسه با سمت مایع ناچیز فرض می‌گردد؛ بنابراین تمرکز مدل بر میدان جریان فیلم و انتقال گونه در داخل آن است. در این مدل‌سازی فاز گاز در حل عددی شرکت داده نمی‌شود و اثر آن از طریق شرط مرزی سطح مشترک (شار جرمی/غلظت تعادلی) اعمال می‌گردد. فرض ناچیز بودن مقاومت سمت گاز بر این اساس فیزیکی استوار است که در سامانه مورد بررسی، حلالیت CO_2 در فاز مایع بسیار پایین است و در نتیجه انتقال جرم عمدتاً توسط مقاومت فاز مایع کنترل می‌شود. در چنین شرایطی، شار CO_2 در سطح مشترک توسط ضریب نفوذ و گرادیان غلظت در فاز مایع تعیین می‌شود و سهم فاز گاز در تعیین شار کل ناچیز است. در دیواره لوله، شرط بدون لغزش اعمال می‌شود و در سطح آزاد، معادلات دینامیکی مرزی ناشی از کشش سطحی و تعادل فشارها برقرار است. معادلات حاکم بر جریان فیلم مایع با سطح آزاد شامل معادلات بقای فضا، بقای جرم، بقای مومنتوم، بقای گونه‌ها و معادلات سطح فاصل است. در ادامه معادلات بقا و سپس معادلات سطح فاصل تشریح می‌شود.



شکل ۱: میدان محاسباتی مسئله جذب CO_2 روی لوله. الف) دیواره سینوسی، ب) دیواره صاف.

۲-۱ معادلات بقای جریان متقارن محوری

جریان متقارن محوری نوع ساده‌شده‌ای از جریان در مختصات استوانه‌ای است که در آن دو فرض $u_\theta = 0$ و $\partial/\partial\theta = 0$ برقرار است. با اعمال این فرض‌ها، معادله مومنتوم در جهت θ حذف و سایر معادلات دستگاه مختصات استوانه‌ای نیز با حذف جملات مربوط به جهت θ ساده می‌شوند. بدین ترتیب، برای حجم کنترل دلخواه Ω که بین سطوح کنترل متحرک S محصور شده است، معادلات بقای فضا^{۱۲}، جرم، اندازه حرکت در جهت x ، اندازه حرکت در جهت y و کسر جرمی گونه‌های حاکم بر جریان متقارن محوری یک سیال تراکم‌ناپذیر در رهیافت ALE به صورت معادلات (۱) تا (۵) نوشته می‌شوند [۲۹]:

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} d\Omega - \int_S \mathbf{v}_b \cdot \mathbf{n} dS = 0 \quad (۱)$$

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho d\Omega + \int_S \rho (\mathbf{v} - \mathbf{v}_b) \cdot \mathbf{n} dS = 0 \quad (۲)$$

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho u d\Omega + \int_S \rho u (\mathbf{v} - \mathbf{v}_b) \cdot \mathbf{n} dS = \int_S p n_x dS + \int_S \mu \nabla u \cdot \mathbf{n} dS + \int_{\Omega} \rho g_x d\Omega \quad (۳)$$

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho v d\Omega + \int_S \rho v (\mathbf{v} - \mathbf{v}_b) \cdot \mathbf{n} dS = \int_S p n_y dS + \int_S \mu r \nabla v \cdot \mathbf{n} dS + \int_{\Omega} \rho g_r d\Omega - \int_{\Omega} \mu \frac{v}{r} d\Omega \quad (۴)$$

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho W d\Omega + \int_S \rho W (\mathbf{v} - \mathbf{v}_b) \cdot \mathbf{n} dS = \int_S \rho D \nabla W \cdot \mathbf{n} dS \quad (۵)$$

که در آن‌ها، ρ چگالی سیال، u سرعت در جهت طولی x ، v سرعت در جهت شعاعی r ، $\mathbf{v} = u \mathbf{i} + v \mathbf{j}$ بردار سرعت، $\mathbf{v}_b = u_b \mathbf{i} + v_b \mathbf{j}$ بردار سرعت سطح کنترل، $\mathbf{n} = n_x \mathbf{i} + n_r \mathbf{j}$ بردار یکه عمود بر سطح کنترل، p فشار، μ ضریب لزجت دینامیکی، r فاصله شعاعی از محور تقارن، $\mathbf{g} = g_x \mathbf{i} + g_r \mathbf{j}$ بردار گرانش، k ضریب هدایت حرارتی، C_p ظرفیت گرمایی ویژه، T دما، W کسر جرمی گونه‌ها و D ضریب نفوذ گونه‌هاست. در معادلات فوق، حجم کنترل و سطح کنترل برای جریان متقارن محوری به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$dS = r d\bar{S}, \quad d\Omega = r d\bar{\Omega}, \quad (۶)$$

که در آن، $d\bar{S}$ و $d\bar{\Omega}$ اندازه سطح و حجم کنترل در شبکه مختصات صفحه‌ای است. برای جریان روی سطح تخت (مختصات کارتزین)، می‌توان از حالت حدی $r \rightarrow \infty$ استفاده کرد. در این حالت حدی، با تقسیم طرفین معادله بر r جمله چشمه به سمت صفر میل کند و با حذف شدن اثر انحنای جریان در شعاع بی‌نهایت سازگار است.

^{۱۲} Space Conservation Law (SCL)

۲-۲ معادلات حاکم بر سطح فاصل

سطح فاصل فیلم مایع مرزی با ضخامت صفر است که فاز مایع را از محیط پیرامون (گاز) جدا می‌کند. این مرز بر سطوح کنترل شبکه منطبق است و معادلات حاکم بر آن شامل شروط مرزی دینامیک، سینماتیک و انتقال جرم گونه‌ها است.

شروط مرزی دینامیک شامل دو معادله تعادل نیروی عمودی و مماسی به‌صورت زیر است:

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{T}_{i,L} \cdot \mathbf{n} - \sigma K = p_g, \quad (7)$$

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{T}_{i,L} \cdot \mathbf{t} = 0. \quad (8)$$

در این روابط، σ و K به‌ترتیب کشش سطحی و انحناى سطح فاصل هستند [۲۹]. همچنین، $\mathbf{t} = t_x \mathbf{i} + t_y \mathbf{j}$ بردار یکه مماس بر سطح و زیرنویس i بیانگر سطح فاصل است. تانسور دوبعدی تنش $\mathbf{T}$ به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mathbf{T} = \tau - p\mathbf{I} = \begin{bmatrix} \tau_{xx} - p & \tau_{rx} \\ \tau_{xr} & \tau_{rr} - p \end{bmatrix} \quad (9)$$

که در آن، τ ، p و $\mathbf{I}$ به‌ترتیب تانسور تنش برشی، فشار استاتیک و تانسور یکه هستند. برای سیال نیوتنی و جریان تراکم‌ناپذیر، مؤلفه‌های تانسور تنش برشی به‌شکل زیر تعریف می‌شود:

$$\tau_{xx} = 2\mu \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \tau_{yy} = 2\mu \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \tau_{xr} = \tau_{rx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial x} \right). \quad (10)$$

جمله کشش سطحی، σK ، تابعی از انحناى سطح فاصل، K ، است که کمیتی هندسی و وابسته به شکل سطح فاصل است. در فضای دوبعدی متقارن محوری، انحناى سطح با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$K = \frac{r_{xx}}{(1+r_x^2)^{3/2}} + \frac{1}{r(1+r_x^2)^{1/2}}, \quad (11)$$

که در آن، r_x و r_{xx} به‌ترتیب مشتقات مرتبه اول و دوم مؤلفه شعاعی r سطح فاصل نسبت به مؤلفه محوری x است. در معادله (۱۱) جمله اول مربوط به انحناى طولی سطح فاصل و جمله دوم مربوط به انحناى شعاعی آن است.

معادله شرط مرزی سینماتیک دبی جرمی عبوری از سطح فاصل را به دبی جذب $\dot{m}_{i,abs}$ مرتبط می‌کند:

$$\dot{m}_{i,L} = [\rho(\mathbf{v} - \mathbf{v}_b) \cdot \mathbf{n} dS]_i = \dot{m}_{i,abs}, \quad (12)$$

در روش تعقیب سطح فاصل، شرط سینماتیک نقش اساسی در تعیین موقعیت سطح فاصل و نیز دستیابی به الگوریتم کاملاً کوپل برعهده دارد. شار جذب تنها در معادله انتقال جرم اعمال می‌شود و به‌دلیل کوچک بودن نرخ جذب نسبت به دبی جرمی فیلم، اثر آن بر ضخامت و حرکت سطح آزاد نادیده گرفته شده است.

در تحقیق حاضر، فاز مایع مخلوط یک مایع (مثل آب یا متانول) و یک گاز (دی‌اکسید کربن یا اکسیژن) است. در مسئله جذب فیزیکی CO_2 یا O_2 از قانون هانری با رابطه زیر برای شرط مرزی انتقال گونه‌ها در سطح فاصل استفاده می‌شود:

$$C_{i,L} = HC_{i,G}, \quad (13)$$

که در آن، H عدد هانری و $C_{i,G}$ غلظت گونه جذب‌شونده، با واحد mol/m^3 در فاز گازی است. با داشتن جرم مولی، غلظت به کسر جرمی تبدیل می‌شود. در مرز ورودی از پروفیل سرعت توسعه‌یافته جریان آرام برای فیلم ناسلت [۳۰] با رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$u_{in}(y_{in}, t) = \bar{u}_{in} 3 \frac{y_{in}}{\delta_{in}} \left(1 - \frac{y_{in}}{2\delta_{in}}\right) [1 + \varepsilon \sin(2\pi ft)] \quad (14)$$

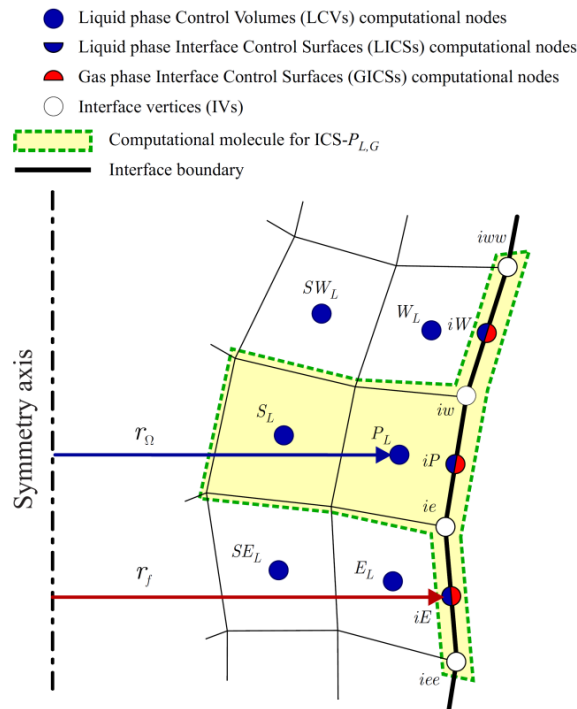
که در آن $\bar{u}_{in}$ ، δ_{in} ، ε و f به‌ترتیب سرعت میانگین، ضخامت، دامنه و فرکانس نوسان فیلم ورودی به میدان است [۳۰]. در مسائلی که به‌صورت پایا روی سطح سینوسی تعریف می‌شود، فرکانس نوسان $f = 0$ تنظیم می‌شود. روی دیواره از شرط مرزی عدم لغزش ($u = v = 0$) و نفوذناپذیری غلظت ($\partial C / \partial r = 0$) و در خروجی از شرط جریان توسعه‌یافته با گرادیان شفر سرعت و غلظت و مقدار فشار مشخص استفاده شده است.

۳ روش گسسته‌سازی

در روش حجم محدود تحقیق حاضر از شبکه هم‌جا^{۱۳} و ایده تمایز سرعت‌های جرمی و سرعت‌های مومنتومی روی سطوح کنترل استفاده می‌شود. میدان محاسباتی با مجموعه‌ای از حجم کنترل‌های چهاروجهی گسسته می‌شود که نقاط محاسباتی آن در مرکز حجم کنترل (CV)^{۱۴} (سلول محاسباتی) واقع شده است [۲۵]. شکل ۲ نمای نزدیک شبکه محاسباتی را اطراف سطح فاصل جریان متقارن محوری را نشان می‌دهد. در این شکل، سطح فاصل به نمایندگی نقطه iP و گره‌های iG و iW ، یک سطح کنترل مشترک بین حجم کنترل‌هایی به مرکز P_L و P_G در سمت مایع و گاز است. مولکول محاسباتی برای نقطه iP سطح فاصل با یک خطچین متمایز شده است. این مولکول شامل حجم کنترل‌های فاز مایع (LCVs) و سطوح کنترل فازهای مایع و گاز (LISVs/GISVs) می‌شود. گره‌های سطح فاصل (IVs) نیز که نقش اساسی در محاسبه انحناهای سطح فاصل (در معادله تعادل نیروی عمودی) و همچنین معادله سینماتیک ایفا می‌کند، در مولکول محاسباتی هر سطح کنترل ICS لحاظ می‌شود تا کوپلینگ جریان و هندسه سطح برقرار شود. جزئیات بیشتر در این زمینه در کار وکیلی‌پور و همکاران (۲۰۲۱) [۲۶] ارائه شده است.

^{۱۳} collocated grid

^{۱۴} control volume (CV)



شکل ۲ گسسته‌سازی میدان حل در مجاورت سطح فاصل.

در اولین مرحله از گسسته‌سازی، معادلات بقای (۱) تا (۵) روی یک حجم کنترل گسسته می‌شود. در مرحله دوم، گسسته‌سازی زمانی و تخمین کمیت‌ها روی سطوح کنترل f براساس نقاط مرکز سلول انجام می‌شود. جمله مشتق زمانی را می‌توان به صورت اختلاف محدود مرتبه اول (براس مسائل پایا) یا مرتبه دوم پس‌رو (برای مسائل ناپایا) گسسته کرد. جمله جابه‌جایی به روش بالادست اختلاف نمایی^{۱۵} (EDS) پاتانکار [۳۱] و جملات پخش نیز با روش اختلاف مرکزی گسسته می‌شوند. برای درگیری میدان‌های فشار و سرعت نیز از روش میانگین‌گیری وزنی فشار^{۱۶} (PWIM) مبتنی بر کار ری و چاو [۲۵] و وکیلی‌پور و اورمیستون [۳۲] استفاده می‌شود.

۳-۱ گسسته‌سازی معادلات سطح فاصل

معادلات سطح فاصل که با روابط (۷) تا (۱۲) بیان می‌شود، شامل مشتقات مرتبه اول سرعت‌ها و کسر جرمی هستند. این مشتقات روی سطوح کنترل iP_L و iP_G با روش پیش‌رو یا پس‌رو گسسته می‌شود. شرط مرزی سینماتیک و جمله مربوط به کشش سطحی در معادله تعادل نیروی عمودی (۱۱) (σK) با روش کاملاً کوپل تعقیب سطح فاصل^{۱۷} (FCIT) پیشنهادی وکیلی‌پور و همکاران (۲۰۲۱) [۲۶] براساس معادله (۱۲) گسسته می‌شود که امکان حل همزمان معادلات بقای جرم و مومنتوم و حرکت سطح فاصل را در یک دستگاه معادلات کوپل فراهم می‌کند. شکل گسسته این معادلات و نحوه کوپل کردن آن‌ها با معادلات بقا به تفصیل در کار محمدی و همکاران (۲۰۲۴) [۲۷] ارائه شده است.

^{۱۵} exponential difference scheme (EDS)

^{۱۶} pressure weighted interpolation method (PWIM)

^{۱۷} fully coupled interface tracking (FCIT)

۳-۲ کد محاسباتی و الگوریتم حل عددی

شبیه‌سازی عددی این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار اختصاصی توسعه‌یافته در گروه پژوهشی پژوهشی «جریان‌های چندفیزیکی» و گروه «دینامیک شاره‌ها» دانشکده مهندسی هوافضا اجرا شد. این نرم‌افزار در محیط زبان برنامه‌نویسی Fortran 90 پیاده‌سازی شده و امکان حل معادلات دوفازی ناویر-استوکس، انرژی و انتقال جرم در مختصات دوبعدی صفحه‌ای و متقارن محوری را بر پایه‌ی روش ALE-IT و روش کاملاً کوپل تعقیب سطح فاصل (FCIT) دارد [۲۶] [۲۷] [۳۳]. در این تحقیق روش FCIT و نرم‌افزار موجود برای مطالعه جذب CO₂ روی هندسه دوبعدی متقارن محوری استفاده می‌شود.

برای ایجاد کوپلینگ بین معادلات حاکم بر مسئله از یک الگوریتم مبتنی بر تکرار استفاده می‌شود. معادلات بقای جرم، مومنتوم و گونه‌ها همراه با شروط مرزی مربوطه به‌صورت کوپل در یک دستگاه معادلات حل می‌شوند تا میدان‌های سرعت، فشار، کسر جرمی گونه‌ها و موقعیت سطح فاصل به‌دست آید. در مسائل ناپایا، این فرآیند چندین بار در هر گام زمانی حل می‌شود تا همگرایی لازم در مقادیر کمیت‌ها حاصل شود. اما در مسائل پایا، این فرآیند فقط یک بار در هر گام زمانی حل می‌شود، زیرا دقت زمانی در این مسائل مطرح نیست و جواب نهایی پس از طی گام‌های زمانی و همگرایی کامل در کمیت‌ها به‌دست می‌آید [۲۶، ۳۴].

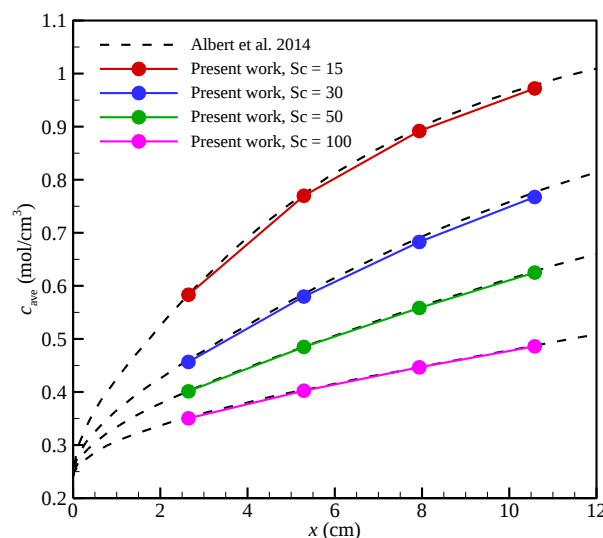
۴ اعتبارسنجی روش عددی

برای ارزیابی دقت و قابلیت اطمینان مدل عددی در این پژوهش، مسئله جذب فیزیکی اکسیژن در یک فیلم مایع آب ریزان انتخاب شد. این مسئله به‌عنوان یک مسئله بسیار نزدیک به جذب CO₂ و به دلیل داشتن حل‌های عددی و تحلیلی، به عنوان یک معیار مناسب برای اعتبارسنجی حلگرهای مرتبط با انتقال جرم در سطح تماس شناخته می‌شود. در این شبیه‌سازی، مطابق با رویکرد آلبرت و همکاران [۶]، اثر فاز گاز بر روی فیلم مایع ناچیز فرض شده و مسئله به صورت یک جریان تک‌فازی با سطح آزاد مدل‌سازی می‌شود. میدان محاسباتی مورد استفاده برای این اعتبارسنجی شامل یک فیلم مایع آب است که تحت تأثیر نیروی گرانش بر روی یک دیواره عمودی جریان دارد. در مرز ورودی، از توزیع سرعت ناسلت استفاده شده است. خواص فیلم مایع و شرایط مرزی به‌طور کامل در مرجع [۶] آمده است.

در حالت پایا، شبیه‌سازی در $Re = 53$ و چهار عدد اشمیت $Sc = 15, 3, 50, 100$ انجام شده است. میدان حل به‌طور یکنواخت با تعداد ۱۰ سلول در راستای y و ۲۰۰ سلول در راستای x گسسته شده است. شکل ۳ نتایج حاضر را با حل تحلیلی مرجع مقایسه می‌کند. محور عمودی در تمام نمودارها، غلظت میانگین گونه‌ی گازی جذب‌شونده (C_{ave}) است که با رابطه زیر در هر مقطع طولی از کانال محاسبه می‌شود:

$$C_{ave}(x) = \frac{1}{\delta(x)} \int_0^{\delta(x)} C(x, y) dy \quad (15)$$

در تمامی نمودارها، مقادیر غلظت میانگین در مدل حاضر با نتایج مرجع اختلاف نسبی کمتر از ۱٪ دارد که نشان از انطباق بسیار خوبی دارد.

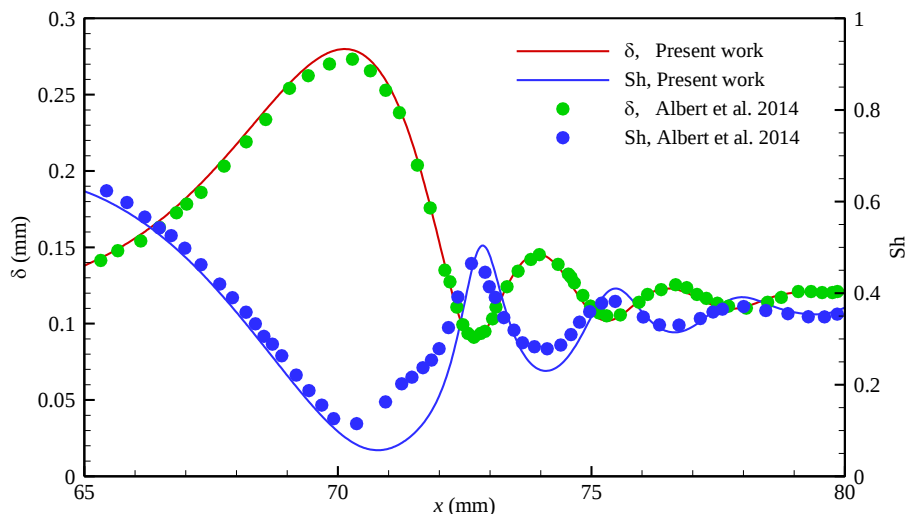


شکل ۳: اعتبارسنجی توزیع غلظت میانگین اکسیژن در طول فیلم مایع پایا.

برای تأیید عملکرد مدل در شرایط جریان ناپایا نیز همان مسئله بخش قبل در عدد رینولدز $Re = 53$ و عدد اشمیت $Sc = 15$ شبیه‌سازی و با نتایج مرجع مقایسه شد. به‌منظور ایجاد موج در سطح فاصل، یک اغتشاش سینوسی با فرکانس 15 Hz و دامنه $\varepsilon = 0.2$ به پروفیل سرعت ورودی اعمال شد. برای شبیه‌سازی از شبکه مکانی با توزیع یکنواخت $Nx = 2000$ در جهت x و $Ny = 30$ در جهت y و گام زمانی $\Delta t = 0.1\text{ ms}$ استفاده شد. شکل ۴ توزیع ضخامت فیلم δ و عدد شروود در طول سطح فاصل را در کنار نتایج عددی آلبرت و همکاران [۶] نشان می‌دهد. در این شکل، عدد شروود محلی Sh به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Sh(x) = \frac{h_{Nu}}{C_i - C_{in}} \frac{\partial C_i(x)}{\partial n} \quad (16)$$

که در آن، δ_{Nu} ضخامت فیلم ناسلت (ضخامت اولیه در ورودی)، C_i غلظت اکسیژن روی سطح فاصل و C_{in} غلظت اکسیژن در ورودی فیلم است. همان‌طور که دیده می‌شود، ضخامت فیلم (خط قرمز) تطابق بسیار خوبی با نتایج مرجع دارد به‌طوری‌که میانگین اختلاف نسبی آن حدود ۱٫۸٪ است. در مقابل، در توزیع عدد شروود محلی (خط آبی) انحرافاتی نسبت به نتایج مرجع، به ویژه در ناحیه ریزموج‌ها ($x = 70\text{--}75\text{ mm}$) مشاهده می‌شود که اختلاف نسبی را در توزیع عدد شروود به حدود ۲۰٪ رسانده است. منشأ این تفاوت، اختلاف در روش‌های عددی برای محاسبه گرادیان غلظت در سطح تماس است. در مقاله مرجع، از یک مدل زیر-شبکه‌ای بهره گرفته شده که با اعمال فرضیات ساده‌کننده (مانند سرعت ثابت و مماس بر سطح)، گرادیان را تخمین می‌زند. در مقابل، رویکرد این پژوهش مبتنی بر حل مستقیم معادله انتقال گونه همراه با کوپلینگ قوی شرایط مرزی در سطح تماس و بدون اعمال چنین فرضیاتی است و در نتیجه می‌توان گفت نتایج پژوهش حاضر اعتبار بیشتری دارد.



شکل ۴: اعتبار سنجی کار حاضر در هیدرودینامیک و تغییرات ورودی محلی.

۵ شرایط مسئله

در این بخش، فرآیند جذب CO_2 روی یک لوله عمودی شبیه‌سازی و تحلیل می‌شود. این هندسه که به صورت متقارن محوری مدل‌سازی شده، نمایانگر بسیاری از جاذب‌های صنعتی است. هدف اصلی این بخش، مقایسه کارایی دو رویکرد اصلی بهبود انتقال جرم است: روش غیرفعال با استفاده از دیواره سینوسی و روش فعال با موجدار کردن فیلم مایع بر روی یک دیواره صاف. در این تحلیل، تأثیر پارامترهای کلیدی شامل عدد رینولدز Re ، طول موج دیواره w و دامنه موج دیواره h بر عملکرد جذب به صورت نظام‌مند بررسی می‌شود.

دامنه‌ی موج به صورت نسبی با رابطه $h = H/\delta_{in}$ برحسب درصد تعریف شده و در سه سطح کوچک، متوسط و بزرگ شامل ۱۰٪، ۲۰٪ و ۵۰٪ ضخامت فیلم ورودی، بررسی می‌شود؛ طول موج نیز با رابطه نسبی $w = W/\delta_{in}$ شامل ۲، ۵، ۱۰ و ۲۰ برابر ضخامت فیلم تغییر می‌کند تا اثر «ریز شدن» یا «درشت شدن» پستی و بلندی‌ها سطح روی عملکرد جذب ارزیابی شود. این بازه‌ها با تکیه بر ادبیات دیواره‌های موجی، بویژه نورشاد و همکاران (۲۰۲۵) [۳۳]، تعیین گردید و ناحیه‌ای را پوشش می‌دهد که در آن ضخامت فیلم از دامنه امواج بیشتر باشد. با توجه به ملاحظات افت فشار دیواره سینوسی، بازه فوق تعادلی بین بهبود انتقال جرم و محدودیت‌های عملیاتی ایجاد می‌کند. طول لوله $L = 25 \text{ cm}$ و شعاع آن $R = 1 \text{ mm}$ است. خواص فیزیکی متانول و CO_2 مطابق جدول ۱ است. در این جدول، عدد رینولدز Re و عدد وبر We به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$Re = \frac{\rho \bar{u}_{in} \delta_{in}}{\mu}, \quad We = \frac{\sigma}{\rho \bar{u}_{in}^2 \delta_{in}}, \quad Sc = \frac{\mu}{\rho D} \quad (17)$$

که در آن‌ها $\bar{u}_{in}$ و δ_{in} سرعت میانگین و ضخامت فیلم ورودی به میدان است که با روابط فیلم ناسلت محاسبه می‌شوند [۳۰].

جدول ۱ خواص فیلم مایع اعداد بی بعد مورد استفاده برای مسئله جذب CO₂ [۱۲].

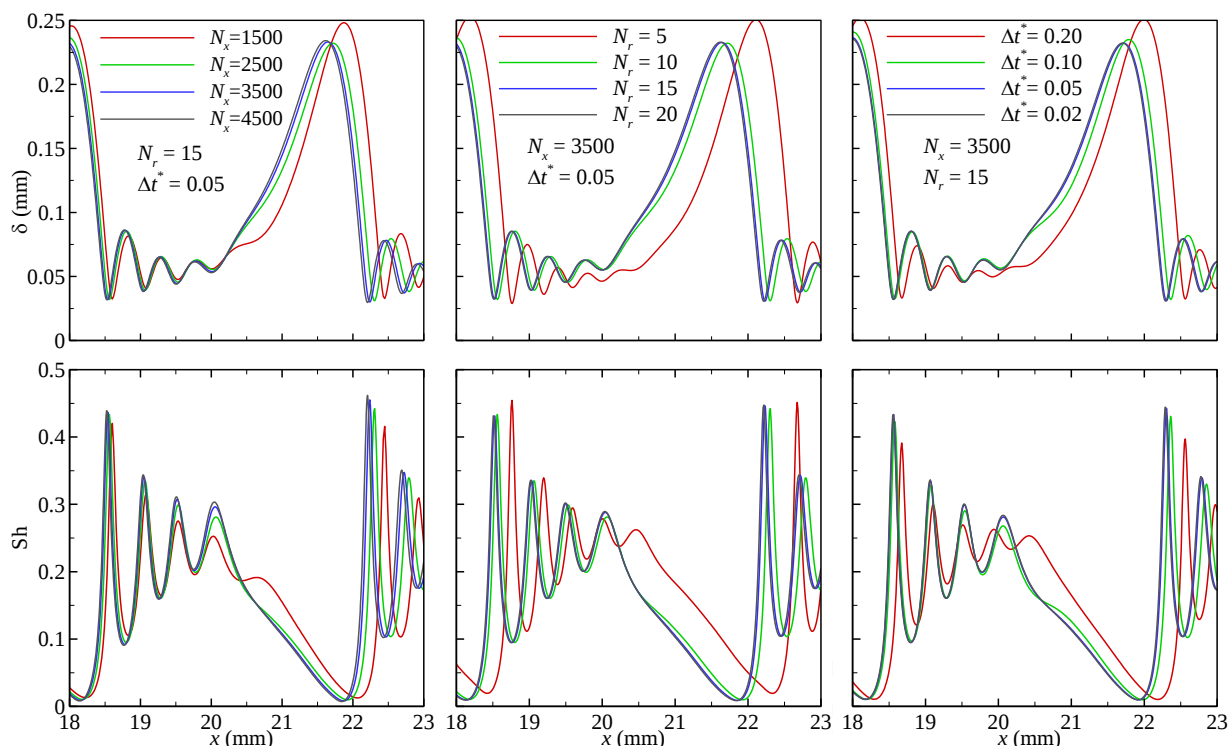
خاصیت	علامت	مقدار
عدد رینولدز	Re	7.5, 15, 30
عدد وبر	We	13.6
چگالی، kg/m ³	ρ	792
لزجت دینامیک، Ns/m ²	μ	5.7E-4
ضریب نفوذ CO ₂ در متانول، m ² /s	D	4.75E-9
کشش سطحی، N/m	σ	0.0736
غلظت CO ₂ در فاز گاز، mol/m ³	C _g	12.00
غلظت اکسیژن در ورودی فیلم مایع، mol/m ³	C _{L,in}	0.21
غلظت اکسیژن روی سطح فاصل، mol/m ³	C _i	0.4668
ثابت قانون هانری	k _H	0.0389

شاخص‌های ارزیابی شامل عدد شروود محلی برای سنجش شدت انتقال جرم در طول محور گزارش می‌شود تا ارتباط مستقیم بین هندسه و تغییرات موضعی جذب دیده شود. از روی آن، عدد شروود میانگین در طول دامنه محاسبه می‌شود تا یک معیار یکپارچه از عملکرد ارائه شود. در کنار آن، نرخ جذب جرمی کل نیز در انتهای دامنه محاسبه می‌گردد تا نشان دهد جمع جرم جذب شده چقدر است. این دو شاخص مکمل یکدیگرند: یکی شدت و دیگری بازده نهایی را می‌سنجد.

در پایان، یادآوری دو فرض کلیدی برای تفسیر نتایج مهم است. نخست، مسئله‌ی CO₂ در متانول در این بازه‌ی کاری تقریباً هم‌دما است؛ بنابراین هر تغییری که در شاخص‌ها عمدتاً ریشه‌ی هیدرودینامیکی دارد و از «نوسازی سطح» و «اختلاط عرضی» می‌آید. دوم، سمت گاز به‌صورت ساده مدل شده تا تمرکز روی سمت مایع باشد؛ به بیان دیگر، اگر در یک کاربرد واقعی مقاومت سمت گاز یا محدودیت‌های انتقال جرم در آن قابل توجه باشد، انتظار می‌رود بخشی از سود ناشی از هندسه‌ی موج‌دار روی آن سمت هم منعکس شود یا لازم باشد اصلاح شود. با این چارچوب، بخش‌های بعدی نشان می‌دهند که همین تغییر ظاهراً ساده در دیواره چگونه می‌تواند مسیر نفوذ صرفاً نزدیک سطح را به یک الگوی اختلاط فعال در سراسر ضخامت فیلم تبدیل کند و در نهایت شاخص‌های عملکرد را به‌طور معنادار بهبود دهد.

۶ مطالعه استقلال حل از شبکه

تحلیل استقلال حل از شبکه در Re = 40 انجام شد. چهار توزیع شبکه محوری، N_x = 1500, 2500, 3500, 4500 و چهار توزیع شعاعی، N_r = 5, 10, 15, 20، در گام زمانی بی‌بعد Δt* = 0.05 ارزیابی شدند که Δt* = Δt(u_{in} / δ_{in}) برای استقلال حل از گام زمانی، چهار مقدار Δt* = 0.2, 0.1, 0.05, 0.02 روی شبکه (N_x, N_r) = (3500, 15) مطالعه شد. گام زمانی مشخصه برای بی‌بعد کردن Δt برابر است با δ_{in}/U_{in}. شکل ۵ تأثیر وضوح شبکه مکانی و زمانی را در بخشی از میدان نشان می‌دهد. در این شکل توزیع محوری ضخامت فیلم، δ، و عدد شروود محلی، Sh، نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، تغییر در متغیرهای سطح مشترک بین N_x = 3500 و N_x = 4500، N_r = 15 و N_r = 20، و گام‌های زمانی Δt* = 0.05 و Δt* = 0.02 کمتر از ۲٪ است. بنابراین، از توزیع سلول‌های (N_x, N_r) = (3500, 15) و گام زمانی Δt* = 0.05 به عنوان شبکه‌های بهینه مکانی و زمانی برای مطالعه پارامتری انتخاب شدند.



شکل ۵: مطالعه شبکه مکانی و زمانی مسئله جذب CO₂ روی لوله با دیواره صاف در فرکانس نوسان $f = 0.03$.

۷ نتایج و بحث

۷-۱ تحلیل هیدرودینامیکی و مکانیزم‌های بهبود جذب

در بخش اول نتایج، هیدرودینامیک فیلم برای توضیح عملکرد بهتر انتقال جرم روی لوله‌ی موج‌دار در مقایسه با دیواره‌ی صاف و نیز مقایسه آن با روش فعال (نوسانی کردن ورودی فیلم روی دیواره صاف) مورد توجه قرار می‌گیرد. شکل ۶ و شکل ۷ توزیع غلظت در داخل فیلم متانول را در $Re = 40$ ، دامنه‌های موج $h = 10\%, 50\%$ و طول موج‌های مختلف نشان می‌دهد. در هر شکل، نتایج دیواره‌ی صاف در ستون چپ و فیلم نوسانی (روش فعال) در ستون راست نشان داده شده است. ردیف پایین هر شکل هم بزرگ‌نمایی ناحیه‌ی نزدیک خروج را نشان می‌دهد تا جزئیات بهتر دیده شود.

۷-۱-۱ دیواره صاف بدون نوسان ورودی

در پیکره‌بندی مرجع دیواره‌ی صاف، که در ستون چپ شکل ۶ و شکل ۷ نشان داده شده است، فیلم نازک متانول در حال سقوط عمدتاً آرام و لایه‌ای است. سرعت در امتداد شعاع از صفر روی دیواره تا بیشینه‌ای نزدیک به سطح آزاد تغییر می‌کند و با حرکت در راستای محوری، «لایه‌ی مرزی غلظتی» در مجاورت سطح آزاد به تدریج ضخیم می‌شود. هرچه این لایه غلظتی ضخیم‌تر شود، شیب غلظت در مرز کوچک‌تر و نرخ جذب کم‌تر می‌شود؛ بنابراین در حالت صاف، عدد شروود از ورودی به صورت یکنواخت رو به کاهش است؛ الگویی که در تمام کارهای مرجع و نیز شبیه‌سازی‌های این پژوهش تکرار می‌شود.

۷-۱-۲ روش غیرفعال - دیواره سینوسی

با موج‌دار کردن دیواره‌ی لوله، این تصویر ساده به هم می‌خورد. موج‌های سینوسی باعث می‌شوند مسیر جریان به صورت دوره‌ای محدود و باز شود؛ در قله‌های موج، کانال مؤثر باریک‌تر است و جریان سرعت می‌گیرد، در دره‌ها ضخامت فیلم بیشتر است و فشار موضعی بالا می‌رود. در $h = 10\%$ ، شکل ۶، نسبت به دیواره‌ی صاف، وضع بهتر شده، اما هنوز «نوار غنی» عمدتاً نزدیک سطح آزاد حرکت می‌کند و لایه‌های چسبیده به دیواره داخلی لوله کم‌غلظت باقی مانده‌اند. دلیلش این است که در این دامنه، چرخش‌های داخل فرورفتگی‌های موج شکل می‌گیرند ولی انرژی و اندازه‌شان محدود است؛ اختلاط بهبود می‌یابد، اما هنوز به اندازه‌ای نیست که همه‌جای ضخامت فیلم را به طور یکنواخت به هم بزند.

در دامنه موج $h = 50\%$ ، شکل ۷، تصویر کاملاً گویاست. فرورفتگی‌ها عمیق‌ترند، چرخش‌ها بزرگ‌تر و پرقدرت‌تر شده‌اند و در نتیجه تقریباً در تمام ضخامت فیلم، نوارهای پرغلظت دیده می‌شود، به‌ویژه در نواحی نزدیک لبه‌ی ورودی فرورفتگی‌ها. دیگر فقط یک لایه‌ی نازک نزدیک سطح آزاد غنی نیست؛ بلکه در بخش زیادی از ضخامت فیلم، به صورت موضعی غلظت بالا می‌رود. لایه‌ی نزدیک سطح آزاد فرصت نمی‌کند به صورت یکنواخت ضخیم شود و مدام با سیال تازه جابه‌جا می‌شود. البته در چنین دامنه‌ای باید مراقب بود که در کف فرورفتگی‌ها، نواحی کم‌حرکت ساخته نشود. در شرایط این کار و با این رینولدز، اثر مثبت چرخش‌ها غالب است و همان‌طور که در بزرگ‌نمایی‌ها مشخص است، در امتداد خروجی، توزیع غلظت به طور کلی یکنواخت‌تر از دو حالت قبلی است.

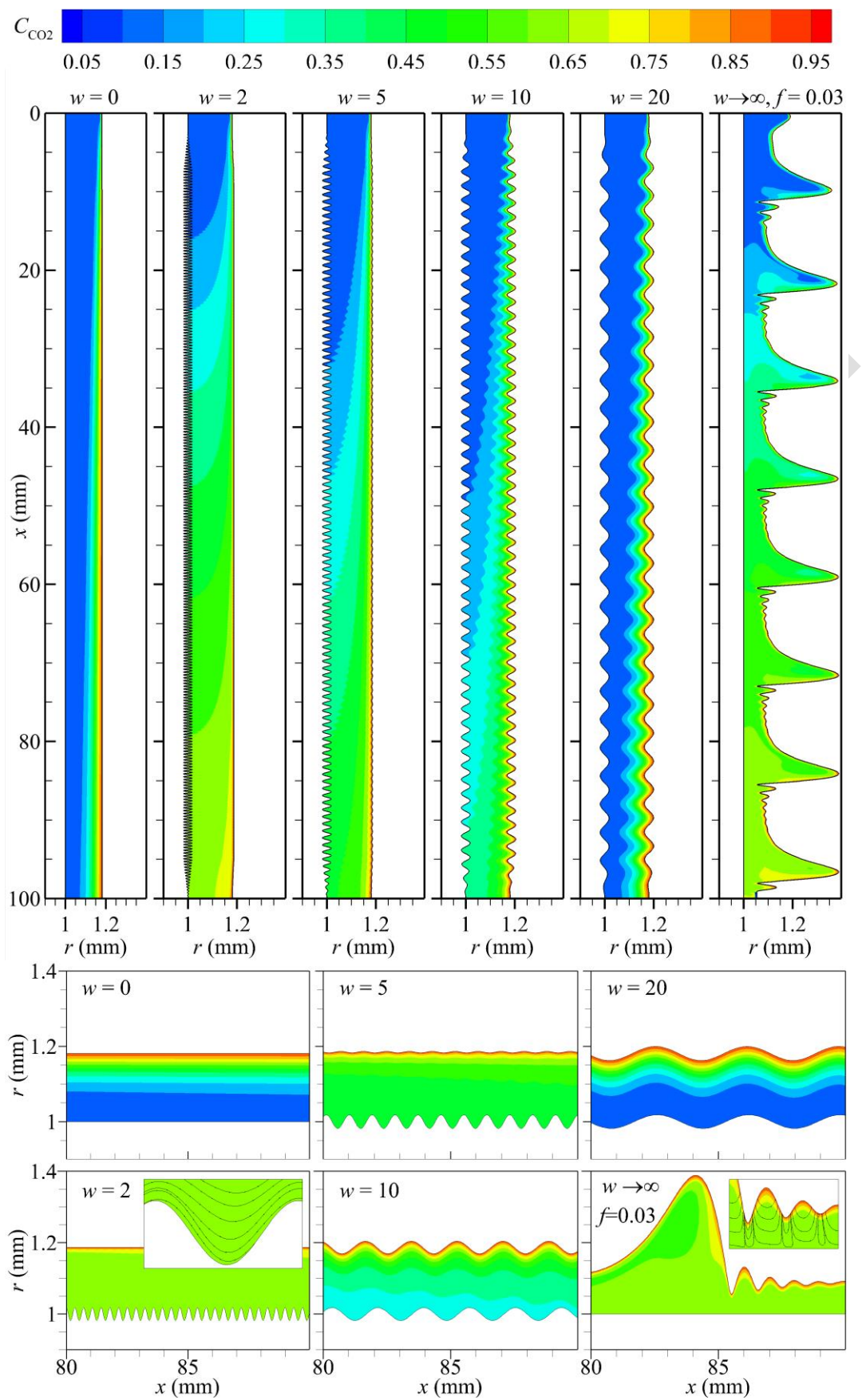
علاوه بر دامنه موج، طول موج نیز اهمیت دارد و در هر دو شکل نقش خود را نشان می‌دهد. اگر از ستون موج بلند $w = 20$ به سمت موج کوتاه $w = 2$ برویم، الگوی نفوذ پرشمارتر و ریزتر می‌شود؛ چون «رفت و برگشت» جریان بین قله و فرورفتگی‌ها سریع‌تر تکرار می‌شود و سطح، زودبه‌زود با سیال تازه روبه‌رو می‌گردد. با این حال، حتی در طول موج‌های کوتاه شکل ۶ و شکل ۷، جاهایی دیده می‌شود که نزدیک دیواره هنوز نفوذ کم است. موج‌های کوتاه اجازه نمی‌دهند لایه‌ی نزدیک سطح آزاد رشد کند؛ در نتیجه، در هر چند میلی‌متر یک‌بار سطح دوباره با سیال تازه روبه‌رو می‌شود و لکه‌های رنگ گرم جدید در عمق تشکیل می‌شود. به زبان ساده، موج کوتاه مثل این است که چندین ناحیه‌ی ورودی کوچک پشت سر هم چیده شده باشد. در موج‌های بلند، این اتفاق دیر به دیر رخ می‌دهد و بخشی از راه با نفوذ آرام و آهسته پیش می‌رود.

نکته‌ی بعدی تغییرات ضخامت فیلم در شکل ۶ و شکل ۷ است. با ثابت بودن دبی جرمی، سرعت گرفتن جریان روی قله‌ها همراه با نازک شدن فیلم است، در حالی که داخل حفره‌ها فیلم ضخیم‌تر می‌شود. نازک شدن فیلم روی قله‌ها دو پیامد هم‌افزا دارد: مسیر نفوذ کوتاه‌تر می‌شود و برش نزدیک سطح آزاد افزایش می‌یابد؛ هر دو، انتقال جرم را بهبود می‌دهد. در هندسه‌ی متقارن محوری لوله، یک ظرافت دیگر هم وجود دارد و آن انحنا‌ی شعاعی سطح آزاد است. در فیلم‌های نازک، همین انحنا می‌تواند فشار ناشی از کشش سطحی را به طور محسوسی تغییر دهد. موج‌های دیواره با جابه‌جا کردن سطح آزاد، توزیع این فشار را دوره‌ای می‌کنند و سرعت‌های نزدیک مرز را بالا می‌برند. نتیجه، بهبود همان جابه‌جایی عرضی است که پیش‌تر درباره‌اش توضیح داده شد. این اثر مویرگی-هیدرودینامیکی در شکل ۷ به خوبی در

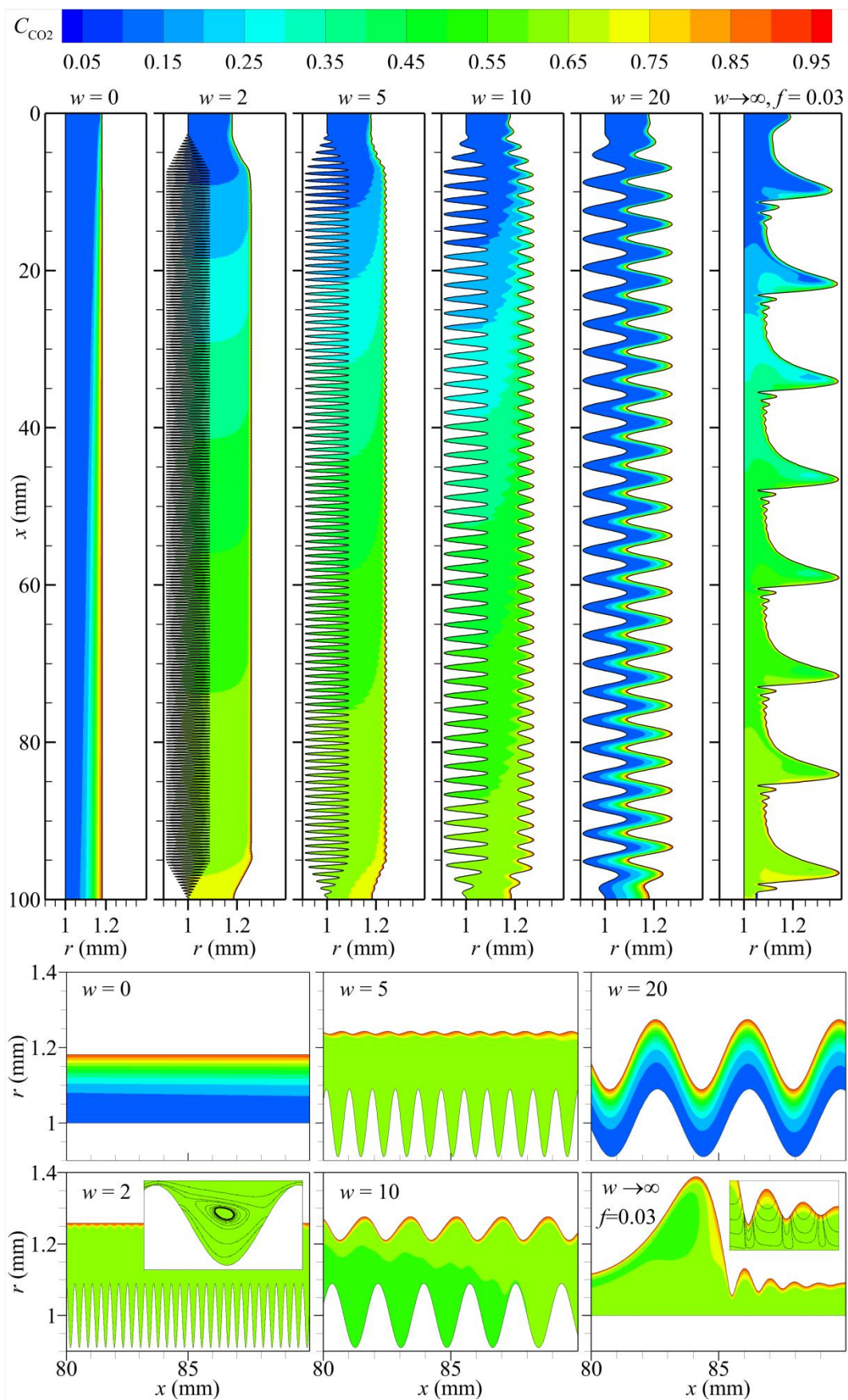
لبه‌های ورود و خروج حفره‌ها دیده می‌شود و توضیح می‌دهد که چرا بعضی پیکره‌بندی‌ها، حتی با ضخامت میانگین مشابه، باز هم شروود موضعی بالاتری ایجاد می‌کند.

۳-۱-۷ روش فعال - دیواره صاف با نوسان ورودی

ستون انتهایی شکل ۶ و شکل ۷ مربوط به «روش فعال» است که روی دیواره صاف رخ می‌دهد. در این حالت، سطح آزاد با یک تحریک دوره‌ای دبی ورودی موج‌دار شده است. نتیجه این کار آن است که نوار غلظتی نزدیک سطح آزاد به‌طور منظم تغییر می‌کند و تکه‌هایی از سیال تازه را مستقیم به مرز تماس می‌آورد. الگوی رنگ در این ستون با ستون‌های دیواره موج‌دار فرق دارد، چون عامل اختلاط این‌بار از بالا کار می‌کند نه از داخل فرو رفتگی‌ها. با این حال، خروجی هر دو به یک هدف می‌رسد: تازه نگه داشتن سطح و رساندن سیال تازه به آن. مقایسه‌ی چشمی نشان می‌دهد که در $h = 50\%$ و با موج‌های کوتاه، وضع دیواره‌ی موج‌دار آن‌قدر خوب است که از نظر نفوذ، به روش فعال نزدیک می‌شود؛ این نکته در جمع‌بندی‌های بعدی هم با اعداد میانگین تأیید خواهد شد.



شکل ۶: توزیع غلظت CO_2 در طول موج‌های مختلف دیواره در $Re = 40$ و دامنه موج $h = 10\%$



شکل ۷: توزیع غلظت CO_2 در طول موج‌های مختلف دیواره در $Re = 40$ و دامنه موج $h = 50\%$

۷-۲ ارزیابی کمی انتقال جرم موضعی

شکل ۸، شکل ۹ و شکل ۱۰ تغییرات عدد شروود موضعی را در امتداد محور لوله به ترتیب برای رینولدزهای ۱۰، ۲۰ و ۴۰ نشان می‌دهند. در هر سه شکل، منحنی نارنجی مربوط به دیواره‌ی صاف است و همان‌طور که انتظار می‌رود، مقدار Sh از ورودی به‌صورت پیوسته کاهش می‌یابد؛ چون لایه‌ی نزدیک سطح آزاد به‌تدریج ضخیم می‌شود و شیب غلظت در مرز پایین می‌آید. این منحنی مرجع، خط مبنا برای سنجش اثر موج‌دار کردن دیواره است. به‌طور کمی، در دیواره صاف مقدار Sh در ابتدای ناحیه محاسباتی حدود ۱۰ تا ۱۵ است، اما در طول $x = 100 \text{ mm}$ به حدود $0.4-0.60$ ، $1.0-1.3$ و $1.5-2.0$ به‌ترتیب برای اعداد رینولدز ۱۰، ۲۰ و ۴۰ کاهش می‌یابد. بنابراین، افزایش رینولدز از ۱۰ به ۴۰ مقدار شروود انتهایی دیواره صاف را تقریباً سه تا چهار برابر افزایش می‌دهد.

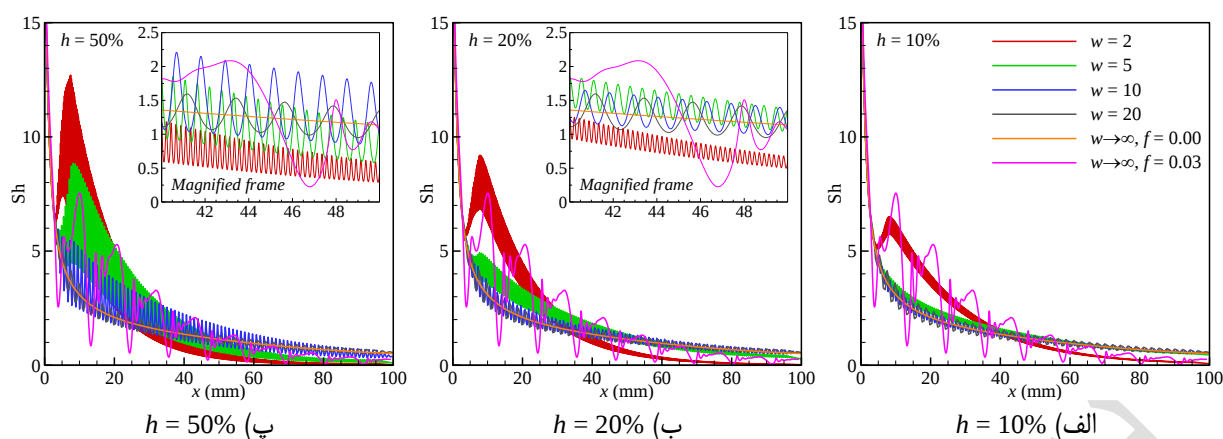
توجه به منحنی‌های مربوط به دیواره‌ی سینوسی نشان می‌دهد که الگو کاملاً عوض شده است. عدد Sh دیگر یک خط کاهشی یکنواخت نیست؛ بلکه به شکلی موج‌مانند بالا و پایین می‌رود و قله‌های متعددی درست در مجاورت لبه‌ی ورودی فرورفتگی‌ها دیده می‌شود. این قله‌ها زمانی رخ می‌دهد که فیلم روی قله‌ی دیواره نازک شده و سپس وارد فرورفتگی می‌شود؛ در همان نقطه، سرعت موضعی بالا و مسیر نفوذ کوتاه است و از سوی دیگر چرخش‌های داخل فرورفتگی سطح را با سیال تازه تغذیه می‌کنند. نتیجه‌ی هم‌زمان این دو پدیده، جهش Sh است. بلافاصله بعد از این جهش، منحنی کمی افت می‌کند چون لایه‌ی نزدیک سطح آزاد فرصت رشد پیدا می‌کند تا به فرورفتگی بعدی برسد و همین چرخه دوباره تکرار شود. هر چه طول موج کوتاه‌تر باشد، فاصله‌ی این قله‌ها کمتر و شمارشان در واحد طول بیشتر است؛ بنابراین سطح در فاصله‌های کوتاه‌تری «تازه» می‌شود و میانگین Sh بالا می‌رود. برای نمونه، در حالت‌های با $w = 2$ ، نوسانات Sh متراکم‌تر بوده و تعداد قابل‌توجهی قله در هر 10 mm مشاهده می‌شود، در حالی که با افزایش w به ۱۰ و ۲۰، فاصله مکانی قله‌ها به‌وضوح افزایش می‌یابد. همچنین در ناحیه ورودی، قله‌های موضعی دیواره موج‌دار در بسیاری از حالت‌ها به حدود ۸-۱۳ می‌رسند، در حالی که منحنی دیواره صاف پس از ناحیه ابتدایی به‌سرعت افت کرده و در بخش عمده طول لوله مقادیر پایین‌تری دارد.

مقایسه‌ی دامنه‌های ۱۰٪، ۲۰٪ و ۵۰٪ در ستون‌های (الف)، (ب) و (پ) هر شکل نشان می‌دهند که با بزرگ‌تر شدن دامنه، قله‌های Sh بلندتر و پهن‌تر می‌شوند. در دامنه‌ی ۱۰٪ (ستون الف)، افزایش‌ها محسوس است اما محدود؛ قله‌ها باریک‌اند و زود هم فروکش می‌کنند. در دامنه‌ی ۲۰٪ (ستون ب)، قله‌ها واضح‌تر و پایدارتر شده‌اند و در بخش‌های بیشتری از طول لوله بالای منحنی دیواره‌ی صاف قرار می‌گیرند. وقتی دامنه به ۵۰٪ می‌رسد (ستون پ)، تقریباً در همه‌ی طول، منحنی‌های دیواره‌ی موج‌دار از حالت صاف فاصله‌ی قابل‌توجهی می‌گیرند؛ یعنی تقریباً در هر چرخه، سطح به‌خوبی با سیال تازه روبه‌رو می‌شود و افت پس از قله‌ها هم کمتر از قبل است. به‌عنوان مثال، در $Re=20$ ، مقادیر Sh در دامنه $h = 10\%$ در بخش میانی لوله، یعنی تقریباً در بازه $x = 30-60 \text{ mm}$ ، عمدتاً در حدود ۲-۴۲ قرار دارند؛ در حالی که برای $h = 50\%$ ، همین مقادیر برای طول‌موج‌های کوتاه می‌توانند به بازه تقریبی ۳-۷ برسند. در $Re = 40$ نیز، در دامنه $h = 50\%$ ، نوسانات موضعی شروود برای طول‌موج‌های کوتاه در بخش قابل‌توجهی از طول لوله در محدوده حدود ۴-۸ باقی می‌مانند؛ در حالی که مقدار متناظر دیواره صاف عمدتاً نزدیک ۲-۳ است.

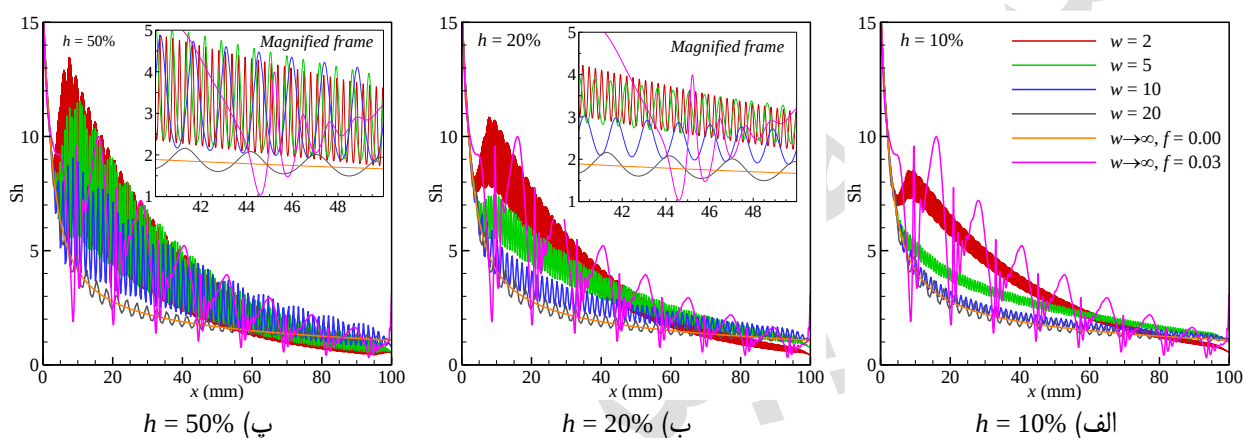
بررسی اثر رینولدز در بین سه شکل یک روند روشن را به دست می‌دهد. از رینولدز ۱۰ در شکل ۸ به رینولدزهای ۲۰ و ۴۰ در شکل ۹ و شکل ۱۰، سطح زیر منحنی‌های Sh چه برای دیواره‌ی صاف و چه موج‌دار بزرگ‌تر می‌شود. یعنی با افزایش رینولدز، سرعت‌های میانگین بالا می‌رود، زمان عبور از هر موج کوتاه‌تر می‌شود و تعداد چرخه‌های «تازه‌سازی سطح» در واحد طول زیادتر می‌شود. نتیجه این است که هم قله‌ها بلندتر می‌شوند و هم فاصله‌ی میانگین منحنی‌های موج‌دار از حالت صاف بیشتر می‌شود. به‌طور مشخص، در حالت $h = 50\%$ و طول‌موج‌های کوتاه، مقادیر شروود در ناحیه میانی لوله برای $Re = 10$ عمدتاً در بازه حدود ۱-۴، برای $Re = 20$ در بازه حدود ۲-۶، و برای $Re = 40$ در بازه حدود ۴-۸ قرار می‌گیرند. این روند نشان می‌دهد که با افزایش رینولدز از ۱۰ به ۴۰، سطح انتقال جرم موضعی در بخش میانی و انتهایی لوله به‌طور محسوسی افزایش می‌یابد.

در کنار این مزایا، شواهد منحنی‌ها نشان می‌دهد که افزایش دامنه چندان هم جایز نیست. در دامنه‌های بسیار بزرگ، اگرچه قله‌ها بلندند، در کف بعضی فرورفتگی‌ها ممکن است افت‌هایی رخ دهد که نشان‌دهنده‌ی نواحی کم‌حرکت گردابه‌ای است. این افت‌ها در Re پایین (مثلاً شکل ۸) پررنگ‌تر است، چون انرژی جریان برای به حرکت درآوردن کامل حوضچه کافی نیست. با بالا رفتن Re ، همان دامنه‌ی زیاد نه تنها قله‌های بلندتری می‌سازد، بلکه کف‌ها را هم بالا می‌آورد و اثر بخش‌های کم‌حرکت را کمرنگ می‌کند. نتیجه‌ی عملی آن است که در رینولدزهای بالاتر، ترکیب «دامنه‌ی زیاد» با «طول‌موج کوتاه» بهترین بازده را می‌دهد و منحنی Sh را در سطحی بالا نگه می‌دارد. برای مثال، در $Re = 10$ و $h = 50\%$ ، پس از قله‌های اولیه، برخی منحنی‌ها در بخش‌های پایین‌دست تا مقادیر نزدیک یا کمتر از $Sh \approx 1$ افت می‌کنند؛ اما در $Re = 40$ و همان دامنه، مقدار شروود برای اغلب حالات موج‌دار در بخش میانی لوله معمولاً بالاتر از $Sh \approx 3$ باقی می‌ماند. بنابراین، اثر نامطلوب نواحی کم‌تحرك با افزایش رینولدز کاهش می‌یابد، هرچند ارزیابی نهایی عملکرد باید بر پایه مقادیر میانگین شروود و نرخ جذب کل انجام شود.

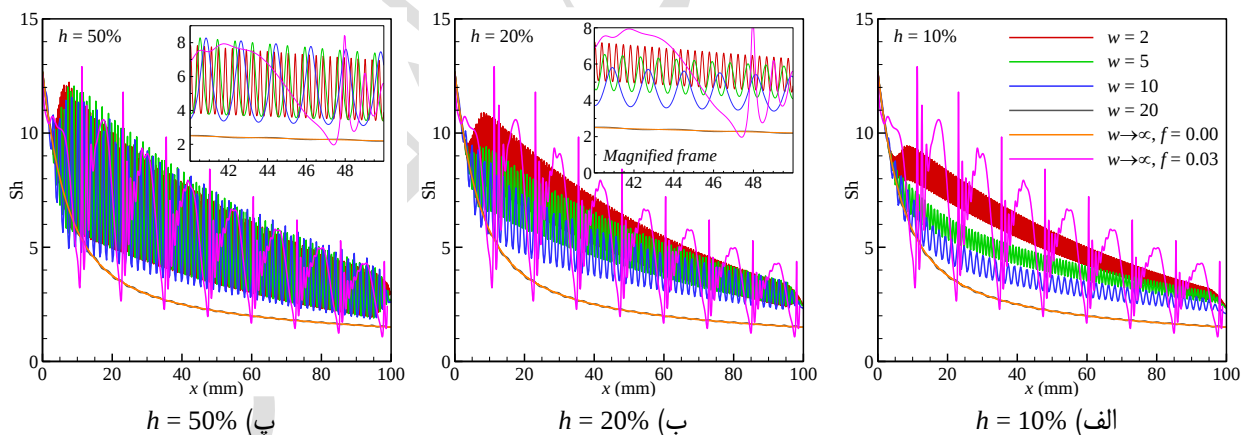
مقایسه با روش فعال (موج‌دار کردن خود فیلم روی دیواره‌ی صاف) نیز به روشن‌تر شدن سازوکارها کمک می‌کند. در روش فعال، موج‌های سطحی دائماً با سیال تازه نوسازی می‌شود. در مقابل، در دیواره‌ی سینوسی موتور اختلاط داخل حفره‌هاست و از دیواره به سمت سطح کار می‌کند. با این حال، خروجی نهایی در هر دو یکسان است: شکستن رشد یکنواخت لایه‌ی مرزی و بالا بردن شیب غلظت در مرز. همین هم‌ارزی مکانیزمی توضیح می‌دهد که چرا در رینولدزهای بالاتر و با انتخاب طول‌موج کوتاه و دامنه‌ی مناسب، عملکرد غیرفعال ما به روش فعال نزدیک شده است. در نمودارهای حاضر، منحنی روش فعال ($w \rightarrow \infty, f = 0.03$) در ابتدای طول لوله نوساناتی با دامنه زیاد، شامل قله‌هایی تا حدود $Sh \approx 7-10$ و افت‌های موضعی، نشان می‌دهد؛ اما در پایین‌دست، برخی حالت‌های دیواره سینوسی با دامنه زیاد و طول‌موج کوتاه مقادیر شروود هم‌تراز یا بالاتری نسبت به آن ایجاد می‌کنند. این نکته در جمع‌بندی‌های شکل ۱۱ به‌صورت میانگین شروود و نرخ جذب کل دیده می‌شود.



شکل ۸: توزیع عدد شروود در طول سطح فاصل برای $Re = 10$.



شکل ۹: توزیع عدد شروود در طول سطح فاصل برای $Re = 20$.



شکل ۱۰: توزیع عدد شروود در طول سطح فاصل برای $Re = 40$.

۷-۳ ارزیابی عملکرد کلی و مقایسه روش‌های بهبود جذب

شکل ۱۱ جمع‌بندی مطالعه‌ی پارامتریک این بخش را نشان می‌دهد. در این شکل، دو شاخص کلیدی گزارش شده است: «عدد شروود میانگین» که نماینده‌ی شدت متوسط انتقال جرم در طول لوله است، و «نرخ جذب جرمی کل» که مقدار CO_2 جذب‌شده را در کل دامنه خلاصه می‌کند. الگوی کلی نمودارها روشن است: هرچه طول موج دیواره (w)

کوتاه‌تر و دامنه‌ی موج (h) بزرگ‌تر باشد، هم عدد شروود میانگین و هم نرخ جذب جرمی کل افزایش می‌یابد. برای نمونه، در $Re = 20$ با کاهش w از ۲۰ به ۲، مقدار Sh_{ave} برای دامنه‌های $h = 10\%$ ، 20% و 50% به ترتیب تقریباً از 2.34، 2.33 و 2.52 به حدود 3.52، 3.55 و 3.55 افزایش می‌یابد. به طور مشابه، نرخ جذب جرمی کل در همین رینولدز و با $h = 50\%$ از حدود 8.4 در $w = 20$ به حدود 11.9 در $w = 2$ می‌رسد؛ یعنی افزایشی در حدود 41%.

اثر عدد رینولدز (Re) نیز در همین شکل قابل پیگیری است. با افزایش Re از ۱۰ به ۲۰ و سپس ۴۰، هر دو شاخص بالا می‌رود. سرعت‌های بالاتر باعث می‌شود چرخه‌های «ورود به فرو رفتگی-تازه‌سازی-خروج» در واحد طول بیشتر تکرار شوند. به بیان دیگر، در یک طول ثابت، موج‌های بیشتری عمل می‌کنند و مجموع اثر آن‌ها بر میانگین انتقال جرم بیشتر می‌شود. نکته‌ی مهم‌تر این است که با بالا رفتن Re ، فاصله‌ی بین پیکره‌بندی‌های مختلف هم بیشتر می‌شود؛ یعنی همان هندسه‌ای که در Re پایین کمی بهتر از حالت صاف بود، در Re بالاتر اختلاف چشم‌گیرتری دارد. به طور کمی، در حالت مرجع دیواره صاف و بدون تحریک ($h = 0\%$ ، $f = 0$)، مقدار Sh_{ave} از حدود 1.67 در $Re = 10$ به حدود 2.34 در $Re = 20$ و 3.00 در $Re = 40$ افزایش می‌یابد؛ در حالی که نرخ جذب جرمی کل متناظر از حدود 5.27 به 7.55 و سپس 10.0 افزایش پیدا می‌کند. در پیکره‌بندی‌های موج‌دار مناسب، این افزایش بسیار محسوس‌تر است؛ برای مثال، در $w = 2$ و $h = 20\%$ مقدار Sh_{ave} از حدود 1.92 در $Re = 10$ به حدود 3.55 در $Re = 20$ و حدود 5.6 در $Re = 40$ می‌رسد. نرخ جذب متناظر نیز از حدود 6.1 به 11.6 و 19.1 افزایش می‌یابد. بنابراین، در $Re = 40$ ، این حالت موج‌دار نسبت به دیواره صاف، حدود 85-90% افزایش در نرخ جذب جرمی کل ایجاد می‌کند.

شکل ۱۱ امکان مقایسه‌ی مستقیم روش غیرفعال (دیواره‌ی موج‌دار) و روش فعال (موج‌دار کردن خود فیلم روی دیواره‌ی صاف) را هم فراهم می‌کند؛ منحنی‌های روش فعال با خط منقطع نارنجی مشخص شده‌اند. همان‌طور که انتظار می‌رود، روش فعال در بسیاری از حالت‌ها بالاترین مقدار عدد شروود میانگین و نرخ جذب کل را به دست می‌دهد، چون محرک اصلی دقیقاً روی سطح تماس کار می‌کند. با این حال، یک نکته‌ی کاربردی بسیار مهم در نمودارها دیده می‌شود: در $Re = 40$ و برای هندسه‌های بهینه‌ی غیرفعال یعنی دامنه‌ی ۵۰٪ و طول موج‌های کوتاه، منحنی دیواره‌ی موج‌دار تا حد بسیار کمی از روش فعال عقب می‌ماند و در برخی نقاط عملاً به آن می‌چسبد. این یعنی اگر محدوده‌ی عملیاتی اجازه‌ی کار در رینولدزهای نسبتاً بالاتر را می‌دهد، می‌توان با طراحی دیواره، بدون مصرف انرژی خارجی مداوم، به کارایی بسیار نزدیک به روش فعال رسید. به طور مشخص، در $Re = 40$ ، برای $h = 50\%$ و $w = 5$ ، مقدار Sh_{ave} حدود 5.3 است که اختلاف آن با مقدار روش فعال (≈ 5.55) کمتر از 5% است؛ نرخ جذب جرمی کل همین حالت نیز حدود 18.5 بوده و تقریباً 3% از مقدار متناظر در روش فعال بیشتر است. افزون بر این، پیکره‌بندی $h = 20\%$ و $w = 2$ مقادیر تقریبی $Sh_{ave} \approx 5.6$ و $m_{tot} \approx 19.1$ ایجاد می‌کند که به ترتیب هم‌تراز یا اندکی بالاتر از مقادیر روش فعال هستند. بنابراین، بر مبنای شاخص‌های میانگین این شکل، دیواره سینوسی با انتخاب مناسب دامنه و طول موج می‌تواند عملکردی نزدیک به روش فعال، و حتی اندکی بالاتر برای برخی ترکیب‌های هندسی، فراهم کند. این مقایسه صرفاً بر عملکرد انتقال جرم استوار است و به معنای نتیجه‌گیری درباره هزینه ساخت، افت فشار، دوام سطح یا مقیاس‌پذیری صنعتی نیست.

جدول ۲، دبی جرمی کل (m_{tot}) را برای سه حالت اصلی گزارش می‌کند که با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\dot{m}_{tot} = \int_{S_{int}} -D \frac{\partial C}{\partial n} \bigg|_{int} dS \quad (18)$$

دیواره صاف بدون موج (پایه)، دیواره صاف با فعال سازی سطحی (فرکانس ۰,۰۳)، و دیواره ی موج دار غیرفعال با ترکیب های گوناگون از طول موج (w) و دامنه (h). اعداد داخل پرانتز، درصد بهبود نسبت به حالت پایا ($f=0$) دیواره صاف در اعداد رینولدز مختلف را نشان می دهد. نخستین مشاهده، اثر قوی عدد رینولدز است. با افزایش Re از ۱۰ به ۴۰، همه ی مقادیر $\dot{m}_{tot}$ رشد چشمگیری دارند؛ مثلاً برای حالت فعال ($f=0.03$) در $Re=40$ ، افزایش ۸۰٪ نسبت به پایه دیده می شود. این نشان می دهد سرعت بالاتر، چرخه های تازه سازی سطح را افزایش می دهد. به طور مشخص، مقدار مرجع دیواره صاف و پایا از 5.28 در $Re=10$ ، به 7.60 در $Re=20$ و 10.00 در $Re=40$ افزایش می یابد. مقدار متناظر برای روش فعال نیز به ترتیب 6.04، 11.35 و 17.95 است. بنابراین، افزایش روش فعال نسبت به حالت پایه برابر با 14٪، 49٪ و 80٪ به ترتیب برای $Re=10$ ، ۲۰ و ۴۰ است. این نتایج نشان می دهد که اثر تحریک سطحی با افزایش رینولدز تقویت می شود. دوم، در روش غیرفعال (دیواره موج دار)، کوتاه شدن طول موج (از ۱۰٪ به ۲٪) و بزرگ تر شدن دامنه (از ۱۰٪ به ۵۰٪) همواره باعث افزایش دبی جرمی می شود. برای مثال در $Re=20$ و $w=2$ و $h=50\%$ به دبی جرمی کل به 11.90 می رسد که ۵۷٪ بهتر از حالت پایه است. اما نکته ی کلیدی در $Re=40$ نمایان می شود: ترکیب بهینه ی غیرفعال ($w=2$, $h=50\%$) با مقدار 19.10، عملاً به روش فعال (18.50 تا 19.10) رسیده و حتی در برخی نقاط از آن فراتر می رود. به طور دقیق، این پیکربندی نسبت به حالت پایه (10.00) بهبود 91٪ ایجاد می کند؛ در حالی که روش فعال نسبت به همان حالت پایه بهبود 80٪ دارد. اختلاف مقدار $\dot{m}_{tot}$ میان پیکربندی غیرفعال بهینه و روش فعال برابر 1.15 است که معادل حدود 6.4٪ بیشتر از مقدار روش فعال است. افزون بر این، حالت های $w=2$ و $h=10\%$ یا 20٪ نیز با مقدار 18.50، بهبود 85٪ نسبت به حالت پایه و اختلافی در حدود 3.1٪ نسبت به روش فعال نشان می دهند. این یعنی در رینولدزهای نسبتاً بالا، می توان بدون مصرف انرژی خارجی، کارایی نزدیک به روش فعال به دست آورد.

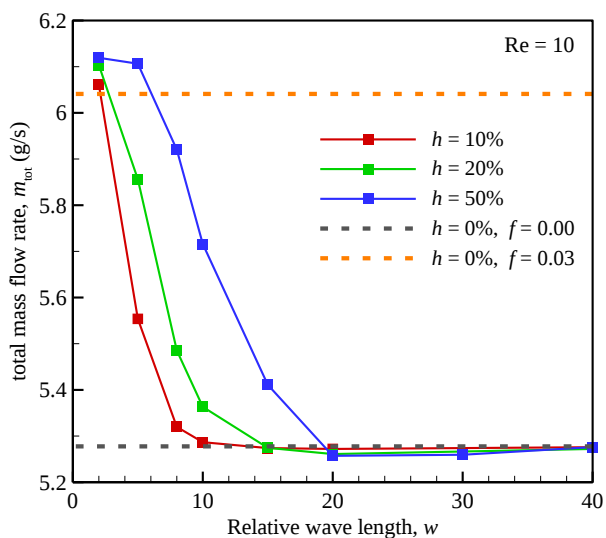
جدول ۲ دبی جرمی کل برای مسئله جذب CO_2 روی دیواره صاف (فرکانس صفر و 0.03) و دیواره موج دار در زوج های منتخب (w, h).

Re	Frequency		Total mass flow rate $\dot{m}_{tot}$ (g/s)								
			$f=0, w=10$			$f=0, w=5$			$f=0, w=2$		
	$f=0$	$f=0.03$	$h=10\%$	$h=20\%$	$h=50\%$	$h=10\%$	$h=20\%$	$h=50\%$	$h=10\%$	$h=20\%$	$h=50\%$
10	5.28	06.04 (14%)	05.29 (0%)	05.37 (2%)	05.92 (12%)	05.56 (5%)	05.86 (11%)	06.11 (16%)	06.06 (15%)	06.10 (16%)	06.12 (16%)
20	7.6	11.35 (49%)	08.15 (7%)	09.10 (20%)	10.80 (42%)	09.68 (27%)	10.92 (44%)	11.70 (54%)	11.55 (52%)	11.85 (56%)	11.90 (57%)
40	10	17.95 (80%)	13.30 (33%)	15.70 (57%)	17.70 (77%)	15.50 (55%)	17.55 (76%)	18.50 (85%)	18.50 (85%)	18.50 (85%)	19.10 (91%)

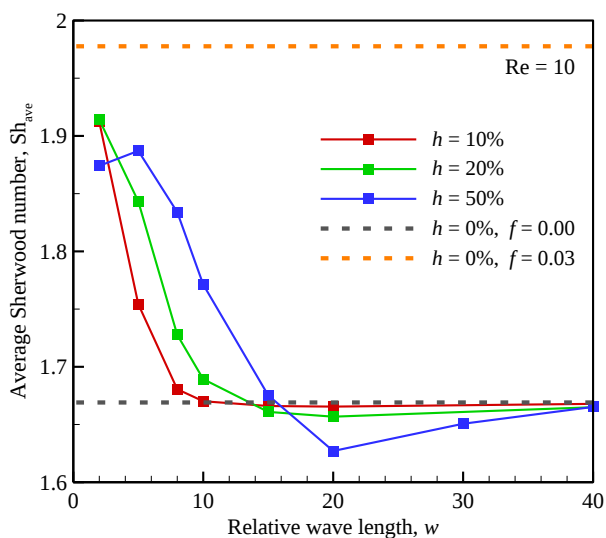
توضیح: مقادیر داخل پرانتز، درصد رشد نسبت به میزان جذب فیلم پایا در فرکانس صفر است.

با دقت بیشتر به روندها، چند نکته ی ظریف هم به چشم می آید. نخست این که افزایش کارایی با کوتاه کردن طول موج، بی انتها نیست. در طول موج های خیلی کوتاه، فاصله ی بین دو موج آن قدر کم می شود که ناحیه ی کارآمد هر موج با موج بعدی هم پوشانی پیدا می کند. در این حالت، افزایش بیشتر ریزی موج اگرچه هنوز مفید است، شیب رشد کارایی را کندتر می کند. همین رفتار را برای دامنه هم می توان دید. این همان «بازده نزولی» است که در طراحی باید به آن توجه

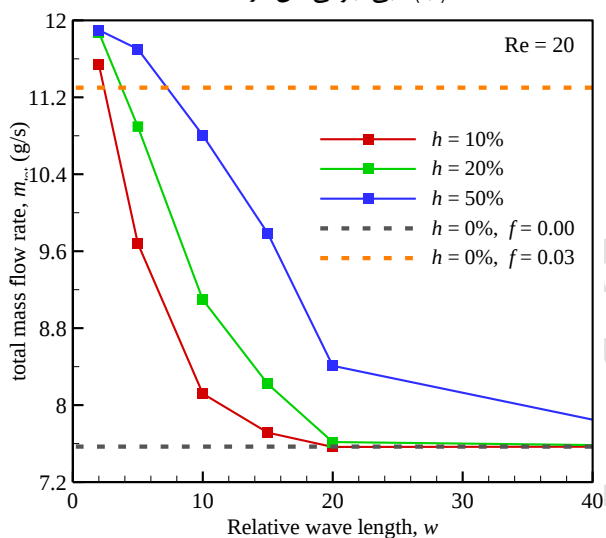
شود. یعنی در نقطه‌ای از دامنه و طول موج، هزینه‌های هندسی و عملیاتی (ساخت، پرداخت سطح، کنترل پایداری فیلم) می‌تواند از سود افزوده‌ی انتقال جرم پیشی بگیرد. با این حال، مطالعه حاضر شامل تحلیل کمی هزینه، افت فشار، قابلیت ساخت، پایداری بلندمدت فیلم یا دوام دیواره نیست؛ بنابراین، این موارد باید به عنوان ملاحظات طراحی و موضوع پژوهش آینده، نه نتیجه مستقیم داده‌های جدول ۲، بیان شوند. دوم، مقایسه با روش فعال یک پیام طراحی مهم دارد. مزیت مهم روش فعال این است که می‌توان دامنه و فرکانس موج را با شرایط کاری تنظیم کرد؛ یعنی اگر دبی یا خواص سیال تغییر کند، با تنظیم محرک سطح را دوباره «بهینه» کرد. نقطه‌ی ضعف آن مصرف انرژی و پیچیدگی تجهیزاتی است. در مقابل، روش غیرفعال بعد از ساخت دیگر تنظیم‌پذیر نیست، اما ساده و پایدار است.



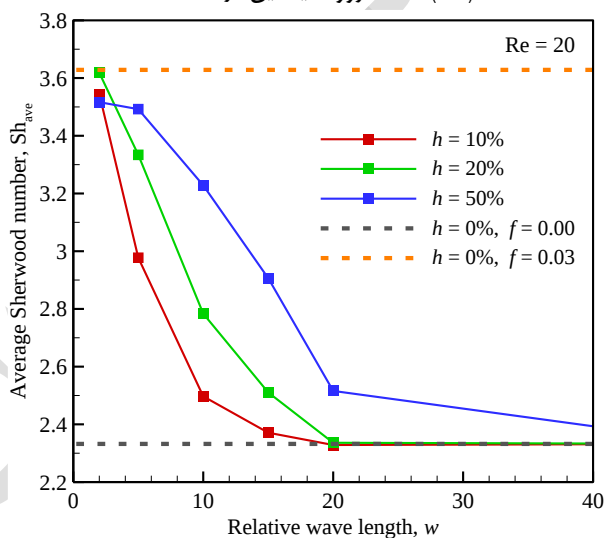
Re = 10 دبی جرمی کل در (ب)



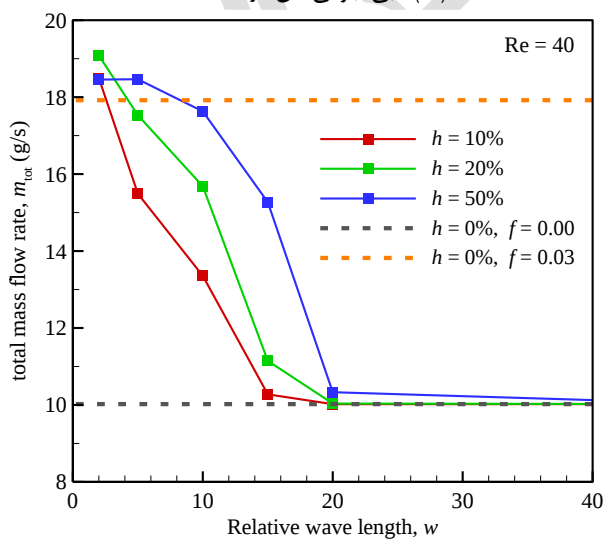
Re = 10 عدد شروود میانگین در (الف)



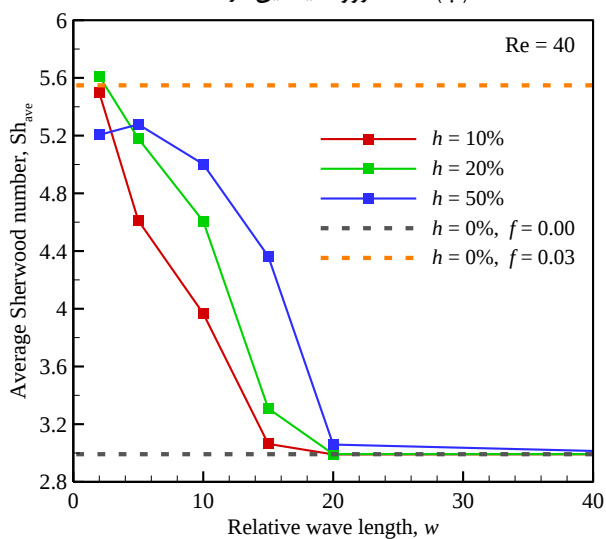
Re = 20 دبی جرمی کل در (ت)



Re = 20 عدد شروود میانگین در (پ)



Re = 40 دبی جرمی کل در (ج)



Re = 40 عدد شروود میانگین در (ث)

شکل ۱۱: تغییرات عدد شروود میانگین Sh_{ave} و دبی جرمی کل $\dot{m}_t$ برحسب طول و دامنه موج دیواره.

سوم، محدودیت‌های عملی را باید کنار این نمودارها گذاشت. موج‌های بسیار ریز یا بسیار عمیق می‌تواند ساخت را سخت و گران کند، پرداخت مناسب سطح را دشوار سازد و حتی در برخی دبی‌ها پایداری فیلم را به خطر بیندازد. اگر موج‌ها خیلی عمیق باشند، ممکن است در کف بعضی فرورفتگی‌ها نواحی کم‌حرکت و رسوب شکل بگیرد که شست‌وشوی آن‌ها دشوار است. از سوی دیگر، موج‌های خیلی بلند یا کم‌دامنه از نظر ساخت ساده‌ترند، اما همان‌طور که در شکل ۱۱ دیده می‌شود، بخش قابل توجهی از سود جذب را از دست می‌دهند. بنابراین انتخاب هندسه باید نتیجه‌ی یک موازنه‌ی روشن باشد: هدف‌گذاری کارایی (Sh و m)، توان ساخت و بازرسی، و محدوده‌ی رینولدز عملیاتی.

در نهایت، پیام کاربردی شکل ۱۱ را می‌توان این‌گونه خلاصه کرد: برای جذب CO_2 در فیلم متانول روی لوله، اگر هدف رسیدن به کارایی نزدیک به روش فعال است، ترکیب «طول موج کوتاه» با «دامنه‌ی زیاد (حدود ۵۰٪)» و کار در رینولدزهای بالاتر (مثلاً $Re \approx 40$) بهترین نتیجه را می‌دهد و منحنی‌های دیواره‌ی موج‌دار را تا آستانه‌ی منحنی‌های روش فعال بالا می‌کشد. اگر محدودیت‌های ساخت اجازه‌ی دامنه‌ی ۵۰٪ را نمی‌دهد، دامنه‌ی میانی ۲۰٪ همراه با طول موج کوتاه همچنان جهش معناداری در هر دو شاخص ایجاد می‌کند و فاصله را با حالت صاف به‌خوبی کم می‌کند. این جمع‌بندی با مشاهدات موضعی بخش‌های قبلی سازگار است و مسیر روشنی برای طراحی هندسه‌ی بهینه بدون نیاز به محرک خارجی پیش روی جذب‌کننده‌های فیلمی در مقیاس صنعتی می‌گذارد.

۸ جمع‌بندی

این پژوهش با هدف مقایسه راهکارهای بهبود فرآیند جذب گاز CO_2 در فیلم مایع ریزان انجام شد که اهمیت زیادی در کاربردهای صنعتی دارد. چالش اصلی در این سیستم‌ها، غلبه بر مقاومت بالای لایه مرزی غلظتی در رژیم جریان آرام است. برای این منظور، یک روش عددی پیشرفته مبتنی بر تعقیب سطح فاصل در رهیافت اولی‌ری-لاگرانژی اختیاری (ALE-IT) به کار گرفته شد تا عملکرد روش‌های مختلف بهبود جذب به‌صورت دقیق ارزیابی شود. روش‌های بررسی‌شده شامل استفاده از دیواره سینوسی به‌عنوان رویکرد غیرفعال و موجی کردن فیلم مایع از طریق نوسان جریان ورودی به‌عنوان رویکرد فعال تحلیل شدند. برای مطالعه جذب روی لوله، روش وکیلی‌پور و همکاران (۲۰۲۱) به هندسه متقارن محوری توسعه یافت. دستاوردهای حاصل از شبیه‌سازی‌ها و تحلیل‌های ارائه شده در این پایان‌نامه را می‌توان به صورت خلاصه و در قالب پاسخ به سوالات بنیادین پژوهش به‌صورت زیر بیان کرد.

عملکرد نوسانی کردن جریان ورودی: ایجاد نوسان در ورودی جریان می‌تواند به شکل‌گیری امواج سطحی با طول

موج بلند و ریزموج‌های ناشی از کشش سطحی منجر شود که نرخ جذب کل را نسبت به حالت پایه (دیواره صاف بدون نوسان ورودی) از حدود ۱۴٪ در عدد رینولدز ۱۰ تا حدود ۸۰٪ در عدد رینولدز ۴۰ افزایش می‌دهد.

عملکرد دیواره سینوسی: در هندسه لوله، دیواره سینوسی به عنوان یک روش غیرفعال کارآمد، با دو راهکار «افزایش

سطح دیواره به سطح فیلم» و «ایجاد گردابه‌های موضعی در فرورفتگی‌ها» باعث بهبود جذب CO_2 شد. عملکرد این هندسه با افزایش دامنه موج و کاهش طول موج دیواره به حداکثر خود رسید. این مقدار در طول موج $w \leq 10$ و دامنه موج $h \geq 20$ با رویکرد فعال برابری می‌کند و در برخی موارد شرایط بهتری دارد.

اثر دیواره موج‌دار (سینوسی) و تنظیمات مطلوب: در لوله موج‌دار، کوتاه‌تر شدن طول موج و بزرگ‌تر شدن دامنه، اختلاط را افزایش و عدد شروود میانگین و نرخ جریان جرمی کل را بهبود می‌بخشد. در بازه $Re = 10-40$ ، موج‌های با دامنه نسبتاً بزرگ و طول موج کوتاه بهترین توازن کارایی/پیچیدگی را ایجاد کردند.

روش بهبود فعال یا غیرفعال: مقایسه کلی نشان داد که برای جذب CO_2 روش فعال (ایجاد موج در فیلم) به دلیل مکانیزم نوسازی سطح، به طور کلی بالاترین نرخ جذب را دارد. با این حال، یک روش غیرفعال بهینه (مانند دیواره سینوسی با دامنه بزرگ و طول موج کوتاه)، به ویژه در اعداد رینولدز بالاتر، می‌تواند عملکردی بسیار نزدیک و قابل رقابت با روش فعال داشته باشد، که آن را به گزینه‌ای ساده‌تر برای کاربردهای صنعتی تبدیل می‌کند.

این پژوهش با وجود دستاوردهای کسب شده، دارای محدودیت‌هایی است که رفع هر کدام می‌تواند مسیری را برای تحقیقات آینده ترسیم کند. در این تحقیق فیلم مایع به صورت تک‌فازی با سطح آزاد مدل شد که دینامیک فاز گاز را نادیده می‌گیرد. به علاوه، مسئله جذب روی سطح بیرونی لوله مطالعه شد. با توجه به اثر ناپایدارکننده انحنای شعاعی سطح فاصل در جریان متقارن محوری، مطالعه مسئله جذب در فیلم داخل ریزلوله‌ها می‌تواند پدیده‌های هیدروترمودینامیک بیشتری به دنبال داشته باشد. علاوه بر این، مطالعه پارامتریک انجام شده می‌تواند با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی هوشمند به منظور یافتن خودکار بهینه‌ترین ترکیب پارامترهای هندسی تکمیل گردد. نکته پایانی، ارزیابی جامع هزینه، افت فشار، پیچیدگی ساخت، دوام سطح و مقیاس‌پذیری است که خارج از حیطه مطالعه حاضر بوده و به عنوان زمینه‌ای برای کارهای آینده پیشنهاد می‌شود.

واژه‌نامه

Active wave generation	موج‌زایی فعال
Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) formulation	فرمول‌بندی لاگرانژی-اولری دلخواه
Axisymmetric	متقارن محوری
Capillary pressure	فشار موئینگی
Concentration boundary layer	لایه مرزی غلظتی
Control volume	فاصله کنترل
Falling film	فیلم ریزان
Finite volume	حجم محدود
Free surface	سطح آزاد
Interface tracking	تعقیب سطح فاصل
Mass transfer rate	نرخ انتقال جرم
No-slip boundary condition	شرط مرزی بدون لغزش

Physical absorption	جذب فیزیکی
Passive wave generation	موج‌زایی غیرفعال
Reynolds number (Re)	عدد رینولدز
Recirculation vortex	گردابه بازگشتی
Sherwood number (Sh)	عدد شروود
Sinusoidal wall	دیواره سینوسی
Species diffusion	نفوذ گونه‌ها
Wave amplitude (h)	دامنه موج
Wavelength (w)	طول موج

مراجع

- [۱] L. Fu *et al.*, "Research progress on CO₂ capture and utilization technology," *Journal of CO₂ Utilization*, vol. 66, p. 102260, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2022.102260>.
- [۲] K. M. K. Yu, I. Curcic, J. Gabriel, and S. C. E. Tsang, "Recent advances in CO₂ capture and utilization," *ChemSusChem: Chemistry & Sustainability Energy & Materials*, vol. 1, no. 11, pp. 893-899, 2008, doi: <https://doi.org/10.1002/cssc.200800169>.
- [۳] A. Adamu, F. Russo-Abegão, and K. Boodhoo, "Process intensification technologies for CO₂ capture and conversion—a review," *BMC Chemical Engineering*, vol. 2, no. 1, p. 2, 2020, doi: <https://doi.org/10.1186/s42480-019-0026-4>.
- [۴] J. Hu, X. Yang, J. Yu, and G. Dai, "Numerical simulation of carbon dioxide (CO₂) absorption and interfacial mass transfer across vertically wavy falling film," *Chemical Engineering Science*, vol. 116, pp. 243-253, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2014.05.002>.
- [۵] M. Zafir, A. Gavrilidis, C. Wille, and V. Hessel, "Carbon Dioxide Absorption in a Falling Film Microstructured Reactor: Experiments and Modeling," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 44, no. 6, pp. 1742-1751, 2005, doi: <https://doi.org/10.1021/ie049726k>.
- [۶] C. Albert, H. Marschall, and D. Bothe, "Direct Numerical Simulation of interfacial mass transfer into falling films," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 69, pp. 343-357, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.10.025>.
- [۷] G. Cekic and G. Sisoiev, "Gas absorption into a wavy two-layer falling film," *AIChE Journal*, vol. 61, no. 6, pp. 2058-2069, 2015, doi: <https://doi.org/10.1002/aic.14778>.
- [۸] J. Hu, X. Yang, J. Yu, and G. Dai, "Carbon dioxide (CO₂) absorption and interfacial mass transfer across vertically confined free liquid film—a numerical investigation," *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, vol. 111, pp. 46-56, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2016.11.002>.
- [۹] S. Chen, T. Zhang, L. Lv, Y. Chen, and S. Tang, "Simulation of the hydrodynamics and mass transfer in a falling film wavy microchannel," *Chinese Journal of Chemical Engineering*, vol. 34, pp. 97-105, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2020.09.014>.
- [۱۰] N. Maleki, S. Zarinabadi, A. Azimi, and A. Shahbazi Kootenaei, "Simulation of CO₂ Absorption by Aqueous Mono Ethanol Amine in a Falling Film Reactor," *Iranian*

- Chemical Engineering Journal*, vol. 18, no. 104, pp. 6-21, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.104.1.8>.
- [^{١١}] H. Ishikawa, S. Ookawara, S. Yoshikawa, and H. Matsumoto, "Numerical study on mass transfer in a falling film on structured plates with micro-baffles," *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, vol. 175, p. 108903, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2022.108903>.
- [^{١٢}] K. Chen, M. Liu, J. Gu, A. Mhamdi, S. Groß, and Y. Heng, "Efficient direct numerical simulation of gas absorption in falling films using a combined high-throughput/high-performance approach," *Chemical Engineering Science*, vol. 273, p. 118603, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2023.118603>.
- [^{١٣}] V. Kalantar and M. Abbasi, "Numerical investigation of the influence of the geometrical shape of the absorber of a single-slope solar desalination device," (in Persian), *Journal Of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 36, no. 4, pp. 1-20, 2024, doi: <https://doi.org/10.22067/jacsm.2024.83738.1195>.
- [^{١٤}] N. Ghasem, "Efficient CO₂ absorption through wet and falling film membrane contactors: insights from modeling and simulation," *Scientific reports*, vol. 13, no. 1, p. 10994, 2023, doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-38249-9>.
- [^{١٥}] A. Düll, C.-L. Lagadec, J. Buchmüller, T. Häber, C. Ates, and M. Börnhorst, "Intensifying interfacial oscillations in falling film flows over rectangular corrugations," *Physics of Fluids*, vol. 36, no. 9, 2024, doi: <https://doi.org/10.1063/5.0222760>.
- [^{١٦}] A. Düll *et al.*, "How Structure-Induced Resonance Waves Intensify Mass Transfer in a Falling Film Absorber for CO₂ Capture," *Chemical Engineering Journal*, p. 168228, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.168228>.
- [^{١٧}] N. Rahaei and M. R. Jafari Nasr, "Improving heat transfer in falling film evaporators in food industries," *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, vol. 38, no. 4, 2019, doi: <https://doi.org/10.30492/ijcce.2019.31581>.
- [^{١٨}] Y. Liu, "Research on status and outlook of using different solvents for CO₂ capture in a rotating packed bed," in *E3S Web of Conferences*, 2021, vol. 294: EDP Sciences, p. 06004, doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202129406004>.
- [^{١٩}] Y. Guo *et al.*, "Advancing energy-efficient CO₂ capture with SO₄2-/ZrO₂ catalytic membrane contactor under falling film evaporation," *Journal of Membrane Science*, vol. 733, p. 124343, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2025.124343>.
- [^{٢٠}] L. Ma, Y. Ding, X. Zhu, H. Wang, and Q. Liao, "Numerical investigation on falling film flow and heat transfer characteristics over corrugated plates," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 198, p. 108882, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2024.108882>.
- [^{٢١}] H. Eskandari and S. i. Hashemi marghmaleki, "Numerical comparison of shell side thermo-hydraulic characteristics of shell and tube heat exchangers with trefoil and segmental baffle by genetic algorithm," (in Persian), *Journal Of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 35, no. 2, pp. 55-76, 2023, doi: <https://doi.org/10.22067/jacsm.2023.75777.1105>.
- [^{٢٢}] F. Vahidinia, "Evaluation of energy and exergy of a parabolic trough solar collector equipped with internal fin and star turbulator absorber tube," (in Persian), *Journal Of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 36, no. 2, pp. 97-114, 2024, doi: <https://doi.org/10.22067/jacsm.2023.83484.1199>.
- [^{٢٣}] A. Sadollah, D. Barati, and A. H. Dodangeh, "Investigating the Effect of Angle and Length of Vortex Generators with Sinusoidal Structure on Compact Heat Exchangers Performance," (in Persian), *Journal Of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 36, no. 4, pp. 57-74, 2024, doi: <https://doi.org/10.22067/jacsm.2024.81445.1171>.

- [۲۴] A. Jahanbakhshi, A. Ahmadi Nadooshan, and M. Bayareh, "Investigation of the effect of adding microtube to waveform heat sink microchannel with hydrophilic and hydrophobic surfaces for nanofluid flow," (in Persian), *Journal Of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, pp. -, 2026, doi: <https://doi.org/10.22067/jacsm.2026.95513.1360>.
- [۲۵] C. Rhie and W. L. Chow, "Numerical study of the turbulent flow past an airfoil with trailing edge separation," *AIAA journal*, vol. 21, no. 11, pp. 1525-1532, 1983, doi: <https://doi.org/10.2514/3.8284>.
- [۲۶] S. Vakilipour, M. Mohammadi, and S. Ormiston, "A fully coupled ALE interface tracking method for a pressure-based finite volume solver," *Journal of Computational Physics*, vol. 427, p. 110054, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2020.110054>.
- [۲۷] M. Mohammadi, S. Vakilipour, and R. Hekmatkhah, "Unsteady film condensation underneath the inclined wall of a solar still desalination system," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 156, p. 107632, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.107632>.
- [۲۸] W. Henry, "III. Experiments on the quantity of gases absorbed by water, at different temperatures, and under different pressures ", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, no. 93, pp. 29-274, 1803, doi: <https://doi.org/10.1098/rstl.1803.0004>.
- [۲۹] J. H. Ferziger, M. Perić, and R. L. Street, *Computational methods for fluid dynamics*. Springer, 2002.
- [۳۰] W. Nusselt "Die Oberflächenkondensation des Wasserdampfes the surface condensation of water," *Zetschr. Ver. Deutch. Ing.*, vol. 60, pp. 541-546, 1916 1916. [Online]. Available: <https://ci.nii.ac.jp/naid/10019327728/en/>.
- [۳۱] S. V. Patankar, "A calculation procedure for two-dimensional elliptic situations," *Numerical heat transfer*, vol. 4, no. 4, pp. 409-425, 1981, doi: <https://doi.org/10.1080/01495728108961801>.
- [۳۲] S. Vakilipour and S. Ormiston, "A coupled pressure-based co-located finite-volume solution method for natural-convection flows," *Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals*, vol. 61, no. 2, pp. 91-115, 2012, doi: <https://doi.org/10.1080/10407790.2012.642281>.
- [۳۳] H. Nourshad, M. Mohammadi, S. Vakilipour, and R. Rahmati, "Enhancement of vapor absorption in LiBr falling film on the sinusoidal wall of cooling water channel: A fully-coupled approach," *International Journal of Refrigeration*, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2025.07.013>.
- [۳۴] S. Vakilipour, M. Mohammadi, V. Badrkhani, and S. Ormiston, "Developing a physical influence upwind scheme for pressure- based cell- centered finite volume methods," *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, vol. 89, no. 1-2, pp. 43-70, 2019, doi: <https://doi.org/10.1002/fld.4682>.