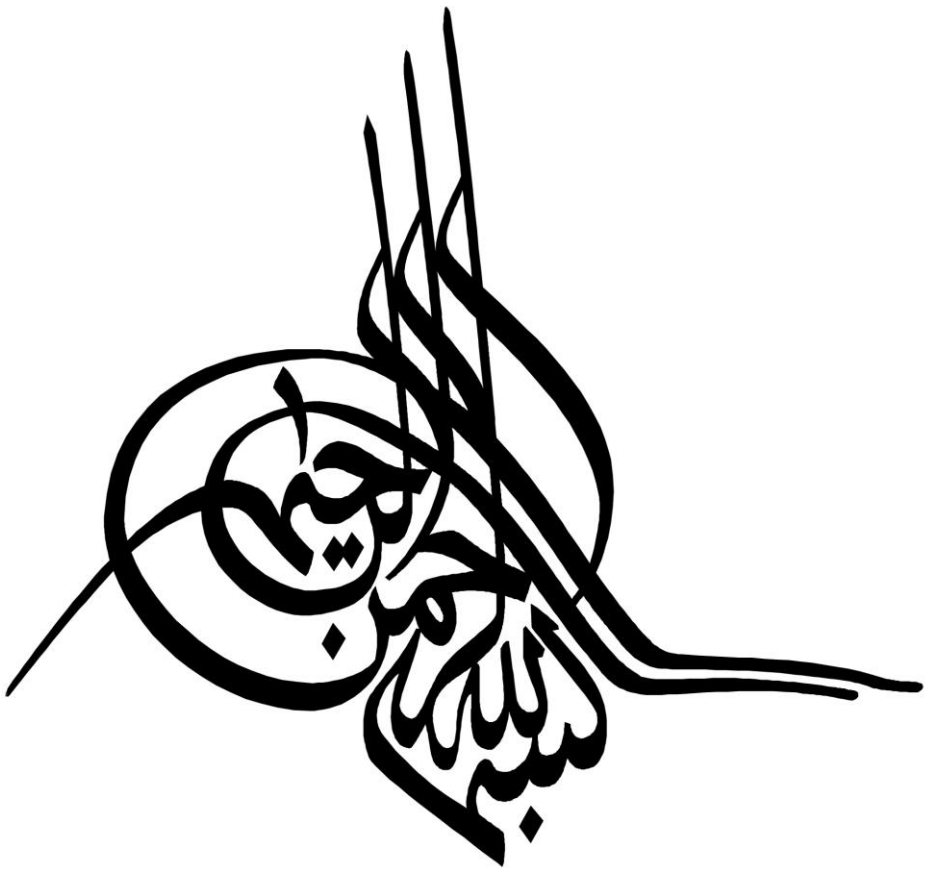
بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

دانشکده مکانیک

پایان‌نامه دوره‌ی کارشناسی ارشد در مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی

موضوع:

شبیه‌سازی برخورد یک حباب به یک صفحه تخت مورب تحت زوایای مختلف با روش عددی حجم سیال (VOF)

استاد راهنما:

دکتر مفید گرجی

دکتر داود دومیری گنجی

نگارش:

سجاد خدادادی

تابستان ۱۳۹۳

تقدیر و تشکر

از اساتید فرهیخته و فرزانه، جناب آقای دکتر مفید گرجی و آقای دکتر داود دومیری گنجی که با راهنمائی‌ها و حمایت‌های ارزندهٔ خویش اینجانب را در اتمام این پایان‌نامه یاری نمودند و همچنین در طول این مدت همواره مشوق بنده بوده‌اند، کمال تشکر و قدردانی را می‌نمایم و برای آن‌ها سلامتی و موفقیت را آرزومندم. از سایر اساتید ارزنده دانشکده مهندسی مکانیک، خصوصاً آقایان دکتر رامیار و دکتر آقاجانی که در طی این دوره از وجودشان بهره‌مند شدم تقدیر و تشکر می‌نمایم. هم‌چنین از جناب آقای نیما سام خانیانی، حسن برارنیا و حسین یحیی زاده نیز به دلیل کمک‌ها و راهنمایی‌های ارزشمندشان سپاسگزارم و برای ایشان نیز سلامتی و موفقیت روزافزون را آرزومندم.

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم

که آرامش روحی و آسایش فکری را برای این‌جانب فراهم نمودند تا با حمایت‌های همه‌جانبه در محیطی مطلوب ، مراتب تحصیلی و نیز پایان‌نامه درسی را به نحو احسن به اتمام برسانم

چکیده

در این پژوهش برخورد یک حباب به یک صفحه مایل با استفاده از روش حجم سیال شبیه‌سازی‌شده است. برای این منظور از نرم‌افزار منبع باز OpenFoam استفاده گردید. پیش از انجام این شبیه‌سازی، جهت حصول اطمینان از کد، ابتدا، صعود تک حباب در یک سیال ساکن ، شبیه‌سازی گشت و با نتایج تجربی و عددی مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج حاصل از این شبیه‌سازی منطبق بر نتایج پژوهش‌های انجام‌شدهٔ پیشین بوده است. در ادامه، حرکت حباب در کنار یک صفحه مایل شبیه‌سازی شد. جهت انجام اعتبار سنجی، نتایج حاصل از شبیه‌سازی رژیم‌های مختلف در صعود تک حباب و هم‌چنین حرکت حباب در کنار یک صفحه مایل، با نتایج حاصل از پژوهش تجربی مقایسه شد. نتایج این شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که اعداد بی‌بعد و زاویه شیب نقش بسزایی را در رژیم حاکم بر حباب دارند. در کار حاضر پارامترها و اعداد بی‌بعد تغییر داده‌شده‌اند و تأثیر این پارامترها و این اعداد بدون بعد بر سرعت و شکل حباب به‌دست‌آمده است و این نتایج باهم مقایسه شده‌اند. ازجمله این پارامترها زاویه شیب و زاویه تماسی و ازجمله این اعداد بدون بعد اعداد مورتون و باند را می‌تواند ذکر کرد. با افزایش زاویه شیب سرعت نیز افزایش می‌یابد تا این‌که در زاویه شیب ۵۰ درجه به ماکزیمم خود می‌رسد. هم‌چنین با ثابت نگه‌داشتن عدد مورتون و با تغییر عدد باند سرعت و هم‌چنین دامنه نوسانات سرعت افزایش می‌یابد چون رژیم حاکم بر حباب تغییر پیدا می‌کند و اینرسی بر مسئله حاکم می‌شود. از طرفی دیگر با افزایش عدد مورتون و ثابت نگه‌داشتن عدد باند سرعت و همچنین نوسانات سرعت حباب کم و کم‌تر می‌شود زیرا نیروی ویسکوزیته بر مسئله حاکم خواهد شد. هم‌چنین با افزایش عدد مورتون حباب در یک‌زمان مشخص مسافت کم‌تری را طی می‌کند و هم‌چنین حرکت حباب از یک حرکت شتاب‌دار به حرکت سرعت ثابت مبدل خواهد شد.

کلمات کلیدی: تغیر شکل حباب، برخورد حباب به صفحه، عدد مورتون، عدد باند، رژیم خیس، رژیم لغزشی، زاویه شیب، زاویه تماسی، روش حجم سیال

فهرست مطالب

۱ فصل اول ۱

۱-۱ جریان دوفازی ۲

۱-۲ دینامیک حباب‌ها ۳

۱-۲-۱ انواع رژیم‌های حباب ۴

۱-۲-۱-۱ رژیم کروی ۴

۱-۲-۱-۲ رژیم بیضوی: ۵

۱-۲-۱-۳ رژیم کلاه کروی: ۶

۱-۳ کاربردها ۱۰

۱-۳-۱ سلول‌هال هرولت ۱۰

۱-۴ مروری بر کارهای انجام شده ۱۱

۱-۵ هدف تحقیق حاضر ۱۸

۱-۶ رئوس مطالب ارائه‌شده ۱۹

۲ فصل دوم ۲۰

۲-۱ تعریف مسئله ۲۱

۲-۲ روش‌های مختلف شبیه‌سازی عددی دینامیک حباب‌ها و معادلات حاکم ۲۱

۲-۳ روش‌های تشخیص سطح مشترک ۲۲

۲-۳-۱ روش‌های سطح ۲۲

۲-۳-۱-۱ روش اجزا بر روی سطح مشترک ۲۳
۲-۳-۱-۲ روش تابع طول ۲۳
۲-۳-۱-۳ روش لول‌ست ۲۴
۲-۳-۲ روش‌های لاگرانژی ۲۴
۲-۳-۳ روش‌های شبه لاگرانژی ۲۵
۲-۳-۳-۱ ردیابی جبهه ۲۵
۲-۳-۳-۲ روش‌های ترکیبی ردیابی و تسخیر سطح ۲۵
۲-۳-۴ روش‌های حجم ۲۶
۲-۳-۴-۱ روش علامت‌گذاری بر ذرات سیال ۲۷
۲-۳-۴-۲ روش کسر حجمی ۲۷
۲-۳-۵ روش حجم سیال ۲۸
۲-۴ گسسته سازی فضای محاسباتی ۳۸
۲-۴-۱ ترتیب و ذخیره‌سازی متغیرها ۳۹
۲-۵ گسسته سازی معادلات ۴۳
۲-۵-۱ درون‌یابی ۴۴
۲-۵-۲ گرادیان ۴۴
۲-۵-۳ مشتق زمانی ۴۵
۲-۵-۴ عبارت جابجایی ۴۵

۲-۵-۵ عبارت نفوذ ۴۶
۲-۵-۶ عبارت چشمه ۴۶
۲-۵-۷ گسسته سازی زمانی ۴۷
۲-۵-۷-۱ کنترل تطبیق‌پذیر گام زمانی ۴۸
۲-۵-۸ نمادسازی در حجم محدود ۴۹
۲-۶ گسسته سازی معادلات حاکم بر صعود حباب ۵۱
۲-۶-۱ معادله انتقال کسر حجمی ۵۱
۲-۶-۲ حل معادله فشار- سرعت، حلقه PISO ۵۲
۲-۷ اعداد بی‌بعد ۵۴
۲-۷-۱ عدد رینولدز ۵۴
۲-۷-۲ عدد وبر ۵۴
۲-۷-۳ عدد Morton ۵۴
۲-۷-۴ عدد Eötvös ۵۵
۲-۸ دینامیک حباب ۵۵
۲-۸-۱ نیروی شناوری(Buoyancy force) ۵۵
۲-۸-۲ نیروی جرم اضافه‌شده: ۵۶
۲-۸-۳ نیروی پسا(Drag Force) ۵۷
۳ فصل سوم ۵۸

۳-۱ تولید شبکه ۵۹
۳-۲ نحوه ایجاد دامنه محاسباتی..... ۵۹
۳-۲-۱ نحوه ایجاد دامنه محاسباتی در صعود تک حباب ۵۹
۳-۲-۲ نحوه ایجاد دامنه محاسباتی حرکت حباب در کنار یک صفحه مایل ۶۰
۳-۲-۳ تأثیر اندازه ابعاد میدان محاسباتی بر شکل و سرعت نهایی در صعود تک حباب ۶۱
۳-۲-۳-۱دیواره‌های کناری ۶۱
۳-۲-۳-۲ دیواره زیرین و بالایی ۶۲
۳-۳ تأثیر تفکیک‌پذیری شبکه ۶۳
۳-۴ تولید شبکه جهت شبیه‌سازی حرکت حباب کنار صفحه مایل..... ۶۸
۴فصل چهارم ۷۱
۴-۱اعتبار سنجی کد ۷۲
۴-۱-۱اعتبارسنجی صعود حباب ۷۲
۴-۱-۱-۱ سرعت و شکل حباب برای حالت‌های مختلف از دیاگرام بهاگا و وبر در صعود تک حباب ۷۵
۴-۱-۱-۲ محاسبه ضریب درگ در صعود تک حباب ۸۱
۴-۱-۲ اعتبار سنجی برای شبیه‌سازی حرکت حباب در کنار صفحه مایل و زاویه تماسی ۸۲
۴-۱-۲-۱ مقایسه شکل حباب برای زاویه ۱۰ درجه بین نتایج تجربی و کار موجود:..... ۸۴
۴-۱-۲-۲ مقایسه سرعت حباب برای زاویه ۱۰ درجه بین نتایج تجربی و کار موجود: ۸۵
۴-۱-۲-۳ مقایسه شکل حباب برای زاویه ۲۰ درجه بین نتایج تجربی و کار موجود:..... ۸۶

۴-۱-۲-۴مقایسه سرعت حباب برای زاویه ۲۰ درجه بین نتایج تجربی و کار موجود:..... ۸۸
۴-۲ ارائه نتایج شبیه‌سازی صعود حباب کنار یک صفحه مایل: ۸۸
۴-۲-۱ پیدا کردن زاویه شیبی که در آن سرعت ماکزیمم اتفاق می‌افتد..... ۹۸
۴-۲-۲ بررسی تاثیر زاویه تماسی بر حرکت حباب..... ۹۹
۴-۲-۳ تأثیر مکان و فاصله اولیه حباب از صفحه مایل بر دینامیک صعود حباب در کنار یک صفحه مایل ۱۰۵
۴-۲-۴ تأثیر عدد مورتون بر دینامیک حرکت حباب در کنار یک صفحه مایل:..... ۱۱۲
۴-۲-۵ تأثیر عدد باند بر دینامیک حرکت حباب در کنار یک صفحه مایل: ۱۱۷
۴-۳ نتیجه‌گیری : ۱۱۹
۴-۴ پیشنهادها:..... ۱۲۱
پیوست ۷۱

فهرست شکل‌ها

شکل (۱-۱): انواع رژیم‌های مختلف در مجاری بسته و در حیطه جریان‌های دوفازی از بالا به پایین (رژیم چینه‌ای، موجی، لخته‌ای، حلقوی و کف‌آلود) ۳

شکل (۱-۲): رژیم‌های مختلف جریان[۲۰] ۶

شکل (۱-۳) : رژیم‌های مختلف حباب [۲۱]. ۸

شکل (۱-۴) : نیروهای کشش سطحی مؤثر بر یک قطرهٔ ساکن بر یک سطح جامد ۹

شکل (۱-۵): زوایای مختلف تماس مایع با سطح جامد: (*a*) خنثی، (*b*) آب‌دوست و (*c*) آب‌گریز ۹

شکل (۱-۶): نمای برش خورده سلول هال‌هرولت [۷] ۱۱

شکل (۱-۷): نمایش صعود آزاد یک حباب در رژیم‌های مختلف توسط بهاگا و بر[۲۱] ۱۳

شکل (۲-۱) : نمای شماتیک برخورد حباب به صفحه مایل ۲۱

شکل (۲-۲) : روش اجزا روی سطح مشترک [۶۶]. ۲۳

شکل (۲-۳) : روش تابع طول[۶۶]. ۲۴

شکل (۲-۴) : روش لول‌ست[۶۶]. ۲۴

شکل (۲-۵) : شبکه ثابت و متحرک درروش ترکیبی[۷۰]. ۲۶

شکل (۲-۶) : روش نشانه‌گذاری بر ذرات سیال[۶۶]. ۲۷

شکل (۲-۷): توزیع شماتیک کسر حجمی در شبکه ۳۰

شکل (۲-۸): بردارهای نرمال و مماسی سطح مشترک (چپ)، بردارهای نرمال و مماسی سطح دیواره و خط تماس (راست) [۵۳] ۳۴

شکل (۲-۹): کانتور سطح یک قطرهٔ گلیسیرین بر روی سطح wax، (*a*) پخش‌شدگی و (*b*) پس‌زنی [۸۶] ۳۴

شکل (۲-۱۰): زاویهٔ تماس دینامیکی با توجه به‌سرعت خط تماس [۸۵] ۳۵

شکل (۲-۱۱): زوایای تماسی پیشرو و پس‌رو در یک قطره در حال سرخوردن از یک صفحهٔ تخت مورب [۸۵] ۳۵
شکل (۲-۱۲): نمودار شماتیک تغییرات زاویهٔ تماسی دینامیکی [۸۵] ۳۶
شکل (۲-۱۳): گسسته سازی فضای محاسباتی [۸۹] ۳۸
شکل (۲-۱۴): پارامترهای موجود در گسسته سازی حجم کنترل [۸۹]..... ۳۹
شکل (۲-۱۵): دو نوع ترتیب و ذخیره‌سازی متغیرها، a) متغیرها در مرکز سلول هر سلول ذخیره می‌شوند، b) متغیرها در سطوح سلول ذخیره می‌شوند [۸۹] ۴۰
شکل (۲-۱۶): توزیع فشار غیریکنواخت در یک شبکه هم‌جا..... ۴۱
شکل (۲-۱۷): یک المان در شبکه هم‌جا..... ۴۱
شکل (۳-۱): نمای کلی از فضای محاسباتی در حالت متقارن محوری برای صعود تک حباب..... ۶۰
شکل ۳-۲: نمای کلی از فضای محاسباتی برای حرکت حباب در کنار صفحه مایل..... ۶۰
شکل (۳-۳): تأثیر عرض دامنه محاسباتی بر رینولدز..... ۶۱
شکل (۳-۴): تأثیر عرض دامنه محاسباتی بر شکل نهایی..... ۶۱
شکل (۳-۵): تأثیر موقعیت اولیه حباب بر رینولدز..... ۶۲
شکل (۳-۶): تأثیر موقعیت اولیه حباب بر شکل نهایی حباب..... ۶۲
شکل (۳-۷): تأثیر تفکیک‌پذیری شبکه بر رینولدز..... ۶۴
شکل (۳-۸): تأثیر تفکیک‌پذیری شبکه بر شکل نهایی حباب..... ۶۴
شکل (۳-۹): شبکه‌های تولیدشده جهت شبیه‌سازی صعود تک حباب ۶۷
شکل (۳-۱۰):شکل حباب در شبکه‌های تولیدشده جهت شبیه‌سازی حرکت در کنار صفحه مایل..... ۶۹
شکل (۳-۱۱): شبکه‌های تولیدشده جهت شبیه‌سازی حرکت حباب در کنار صفحه مایل..... ۷۰
شکل (۳-۱۲): ریزتر شدن شبکه در کنار صفحه مایل..... ۷۰

شکل (۳-۱۳): شرایط مرزی حاکم بر مساله ۷۰
شکل (۴-۱): ارزیابی شکل و موقعیت برحسب زمان بی‌بعد در حالت C ۷۸
شکل (۴-۲): ارزیابی شکل و موقعیت برحسب زمان بی‌بعد در حالت D ۷۸
شکل (۴-۳): عدد رینولدز برحسب زمان بی‌بعد در حالت C ۷۸
شکل (۴-۴): عدد رینولدز برحسب زمان بی‌بعد در حالت D ۷۸
شکل (۴-۵): ارزیابی شکل و موقعیت برحسب زمان بی‌بعد در حالت E ۷۹
شکل (۴-۶): ارزیابی شکل و موقعیت برحسب زمان ۷۹
شکل (۴-۷): عدد رینولدز برحسب زمان بی‌بعد در حالت E ۷۹
شکل (۴-۸): عدد رینولدز برحسب زمان بی‌بعد در حالت F ۷۹
شکل (۴-۹): ارزیابی شکل و موقعیت برحسب زمان بی‌بعد در حالت G ۸۰
شکل (۴-۱۰) : ارزیابی شکل و موقعیت برحسب زمان بی‌بعد در حالت H ۸۰
شکل (۴-۱۱):عدد رینولدز برحسب زمان بی‌بعد در حالت G ۸۰
شکل (۴-۱۲):عدد رینولدز برحسب زمان بی‌بعد در حالت H ۸۰
شکل (۴-۱۳): نمودار ضریب درگ برحسب عدد رینولدز ۸۲
شکل(۴-۱۴): شکل حباب در کار تجربی و شبیه‌سازی انجام‌شده توسط سنزیل کومار[۹۸]برای زاویه شیب صفحه مایل به‌اندازه ۱۰ درجه از افق ۸۵
شکل (۴-۱۵): شکل حباب در کار حاضر برای زاویه شیب صفحه مایل به‌اندازه ۱۰ درجه از افق و زاویه تماسی ۳۰ درجه ۸۵
شکل (۴-۱۶): نمودار سرعت در کار تجربی و شبیه‌سازی انجام‌شده توسط سنزیل کومار[۹۸] و شبیه‌سازی موجود برای زاویه شیب صفحه مایل به‌اندازه ۱۰ درجه از افق و زوایای تماسی ۳۰ درجه ۸۶
شکل (۴-۱۷) : شکل حباب در کار تجربی و شبیه‌سازی انجام‌شده توسط سنزیل کومار[۹۸]برای زاویه

شیب صفحه مایل به‌اندازه ۲۰ درجه از افق ۸۷
شکل (۴-۱۸): شکل حباب در کار حاضر برای زاویه شیب صفحه مایل به‌اندازه ۲۰ درجه از افق و زاویه تماسی ۳۰ درجه ۸۷
شکل (۴-۱۹): نمودار سرعت در کار تجربی و شبیه‌سازی انجام‌شده توسط سنزیل کومار[۹۸] و شبیه‌سازی موجود برای زاویه شیب صفحه مایل به‌اندازه ۲۰ درجه از افق و زوایای تماسی ۳۰ درجه ۸۸
شکل (۴-۲۰): شکل حباب در کار حاضر برای زاویه شیب صفحه مایل به‌اندازه صفر درجه از افق و زاویه تماسی ۳۰ درجه ۸۹
شکل (۴-۲۱): نمودار سرعت در کار حاضر برای زاویه شیب صفحه صفر درجه از افق و زاویه تماسی ۳۰ درجه ۸۹
شکل (۴-۲۲): شکل حباب در کار حاضر برای زاویه شیب صفحه مایل به‌اندازه ۱۰ درجه از افق و زاویه تماسی ۳۰ درجه ۸۹
شکل (۴-۲۳): نمودار سرعت در کار حاضر برای زاویه شیب صفحه ۱۰ درجه از افق و زوایای تماسی مختلف ۹۰
شکل (۴-۲۴): شکل حباب در کار حاضر برای زاویه شیب صفحه مایل به‌اندازه ۲۰ درجه از افق و زاویه تماسی ۳۰ درجه ۹۰
شکل (۴-۲۵): نمودار سرعت در کار حاضر برای زاویه شیب صفحه ۲۰ درجه از افق و زوایای تماسی مختلف ۹۱
شکل (۴-۲۶): نمودار سرعت در کار حاضر برای زاویه شیب صفحه ۳۰ درجه از افق و زاویه تماسی ۳۰ درجه ۹۱
شکل (۴-۲۷): شکل حباب در کار حاضر برای زاویه شیب صفحه مایل به‌اندازه ۳۰ درجه از افق و زاویه تماسی ۳۰ درجه ۹۱

شکل (۴-۲۸): شکل حباب در کار حاضر برای زاویه شیب صفحه مایل به‌اندازه ۴۰ درجه از افق و زاویه تماسی ۳۰ درجه ۹۲
شکل (۴-۲۹): نمودار سرعت در کار حاضر برای زاویه شیب صفحه ۴۰ درجه از افق و زوایای تماسی مختلف ۹۲
شکل (۴-۳۰):شکل حباب در کار حاضر برای زاویه شیب صفحه مایل به‌اندازه ۵۰ درجه از افق و زاویه تماسی ۳۰ درجه ۹۲
شکل (۴-۳۱): نمودار سرعت در کار حاضر برای زاویه شیب صفحه ۵۰ درجه از افق و زوایای تماسی مختلف ۹۳
شکل (۴-۳۲): شکل حباب در کار حاضر برای زاویه شیب صفحه مایل به‌اندازه ۶۰ درجه از افق و زاویه تماسی ۳۰ درجه ۹۳
شکل (۴-۳۳): نمودار سرعت در کار حاضر برای زاویه شیب صفحه ۶۰ درجه از افق و زوایای تماسی مختلف ۹۳
شکل (۴-۳۴): شکل حباب در کار حاضر برای زاویه شیب صفحه مایل به‌اندازه ۷۰ درجه از افق و زاویه تماسی ۳۰ درجه ۹۴
شکل (۴-۳۵): نمودار سرعت در کار حاضر برای زاویه شیب صفحه ۷۰ درجه از افق و زوایای تماسی مختلف ۹۴
شکل (۴-۳۶): شکل حباب در کار حاضر برای زاویه شیب صفحه مایل به‌اندازه ۸۰ درجه از افق و زاویه تماسی ۳۰ درجه ۹۵
شکل (۴-۳۷): نمودار سرعت در کار حاضر برای زاویه شیب صفحه ۸۰ درجه از افق و زوایای تماسی مختلف ۹۵
شکل (۴-۳۸) : شکل حباب در کار حاضر برای زاویه شیب صفحه مایل به‌اندازه ۹۰ درجه از افق ۹۵

شکل (۴-۳۹): شکل حباب در کار حاضر برای زاویه شیب صفحه مایل به‌اندازه ۹۰ درجه از افق..... ۹۶
شکل (۴-۴۰): نیروهای واردشده بر حباب در حال صعود در کنار صفحه مایل ۹۶
شکل (۴-۴۱): نمودار سرعت ماکزیمم برحسب زوایای شیب مختلف ۹۹
شکل (۴-۴۲): شکل حباب در کار حاضر برای زاویه شیب صفحه مایل به‌اندازه ۳۰ درجه از افق..... ۱۰۰
شکل (۴-۴۳): نمودار سرعت در کار حاضر برای زاویه شیب صفحه ۳۰ درجه از افق و زوایای تماسی مختلف..... ۱۰۱
شکل (۴-۴۴): شکل حباب در کار حاضر برای زاویه شیب صفحه مایل به‌اندازه ۵۰ درجه از افق..... ۱۰۲
شکل (۴-۴۵): نمودار سرعت در کار حاضر برای زاویه شیب صفحه ۵۰ درجه از افق و زوایای تماسی مختلف..... ۱۰۳
شکل (۴-۴۶): شکل حباب در کار حاضر برای زاویه شیب صفحه مایل به‌اندازه ۹۰ درجه از افق ۱۰۴
شکل (۴-۴۷) : شکل حباب در کار حاضر برای زاویه شیب صفحه مایل به‌اندازه ۹۰ درجه از افق... ۱۰۴
شکل (۴-۴۸): نمایش زاویه تماسی بین دو فاز و سطح جامد ۱۰۵
شکل ۴-۴۹: تأثیر فاصله اولیه حباب از صفحه مورب بر شکل حباب در زاویه شیب ۱۰ درجه و زاویه تماسی ۳۰ درجه..... ۱۰۶
شکل (۴-۵۰): تأثیر فاصله اولیه حباب از صفحه مورب بر سرعت حباب در زاویه شیب ۱۰ درجه و زاویه تماسی ۳۰ درجه..... ۱۰۷
شکل (۴-۵۱): تأثیر فاصله اولیه حباب از صفحه مورب بر شکل حباب در زاویه شیب ۳۰ درجه و زاویه تماسی ۳۰ درجه..... ۱۰۸
شکل (۴-۵۲): تأثیر فاصله اولیه حباب از صفحه مورب بر سرعت حباب در زاویه شیب ۳۰ درجه و زاویه تماسی ۳۰ درجه..... ۱۰۸
شکل (۴-۵۳): تأثیر فاصله اولیه حباب از صفحه مورب بر شکل حباب در زاویه شیب ۶۰ درجه و زاویه

تماسی ۳۰ درجه ۱۰۹
شکل (۴-۵۴): تأثیر فاصله اولیه حباب از صفحه مورب بر سرعت حباب در زاویه شیب ۶۰ درجه و زاویه تماسی ۳۰ درجه ۱۱۰
شکل (۴-۵۵): تأثیر فاصله اولیه حباب از صفحه مورب بر شکل حباب در زاویه شیب ۹۰ درجه و زاویه تماسی ۳۰ درجه ۱۱۱
شکل (۴-۵۶): تأثیر فاصله اولیه حباب از صفحه مورب بر سرعت حباب در زاویه شیب ۹۰ درجه و زاویه تماسی ۳۰ درجه ۱۱۱
شکل (۴-۵۷) : تأثیر عدد مورتون بر شکل حباب در زاویه شیب ۶۰ درجه و زاویه تماسی ۳۰ درجه ۱۱۳
شکل (۴-۵۸): تأثیر عدد مورتون بر سرعت حباب در زاویه شیب ۳۰ درجه و زاویه تماسی ۳۰ درجه ۱۱۴
شکل (۴-۵۹): تأثیر عدد مورتون بر شکل حباب در زاویه شیب ۶۰ درجه و زاویه تماسی ۳۰ درجه. ۱۱۵
شکل (۴-۶۰): تأثیر عدد مورتون بر سرعت حباب در زاویه شیب ۶۰ درجه و زاویه تماسی ۳۰ درجه ۱۱۶
شکل (۴-۶۱): تأثیر عدد باند بر شکل حباب در زاویه شیب ۳۰ درجه و زاویه تماسی ۳۰ درجه ۱۱۷
شکل (۴-۶۲): تأثیر عدد باند بر سرعت حباب در زاویه شیب ۳۰درجه و زاویه تماسی ۳۰ درجه ۱۱۸
شکل (۴-۶۳): تأثیر عدد باند بر شکل حباب در زاویه شیب ۶۰ درجه و زاویه تماسی ۳۰ درجه ۱۱۸
شکل (۴-۶۴): تأثیر عدد باند بر سرعت حباب در زاویه شیب ۶۰درجه و زاویه تماسی ۳۰ درجه..... ۱۱۹

فهرست جداول

جدول (۱-۱): رژیم‌های مختلف جریان ۷

جدول (۲-۱): نمادسازی حجم کنترل [۸۲] ۵۰

جدول (۴-۱): برخی از رژیم‌های حباب در کار حاضر ۷۲

جدول (۴-۲):ویژگی فیزیکی و اعداد بدون بعد برای هر یک از حالت‌ها در صعود تک حباب..... ۷۳

جدول (۴-۳) : مقایسه نتایج تجربی و عددی گذشته باکار موجود ۷۵

جدول (۴-۴): مقایسه رینولدز نهایی در شبیه‌سازی حاضر و شبیه‌سازی‌های گذشته باکار تجربی و محاسبه درصد خطا..... ۷۶

جدول (۴-۵): مشخصات فیزیکی برای شبیه‌سازی صعود حباب در کنار صفحه مایل:..... ۸۳

فهرست علائم

سیستم معادلات جبری خطی	$\mathbf{A}$
قطر حباب	D
ضریب درگ	C_D
عدد کورنت	Co
بردار بین مراکز سلول محاسباتی و سلول همسایه	$\mathbf{d}$
سطوح سلول	f
نیروی بدنی در واحد جرم	$\mathbf{f}_b$
نیروی کشش سطحی	$\mathbf{f}_\sigma$
شار جرمی در سطح سلول	F
نیروی موئینگی	F_C
نیروی درگ	F_D
جاذبه گرانش	g
بردار یکه عمود بر سطح	$\mathbf{n}$
بردار نرمال اصلاح‌شده	$\mathbf{n}^*$
بردار نرمال سطح دیواره	$\mathbf{n}_{wall}$
فشار استاتیک	p
فشار اصلاح‌شده	p_d
شعاع قطره	R
شعاع آستانه جذب	R_M
بردار مساحت سطح	$\mathbf{S}$
عبارت چشمه	S_ϕ
زمان	t
گام زمانی	Δt
تانسور تنش ویسکوز	$\mathbf{T}$
بردار نرمال سطح مشترک و مماس بر دیواره	$\mathbf{t}_{wall}$
بردار سرعت	$\mathbf{U}$
سرعت تراکم	$\mathbf{U}_r$
سرعت برخورد	U^*
سرعت خط تماس	$\mathbf{U}_C$
حجم	V
موقعیت مکانی	x

موقعیت مکانی مرکز سطح	x_f
موقعیت مکانی مرکز سلول	x_P

اعداد بی‌بعد

عدد Eötvös	$Eo = \frac{\Delta\rho\, g\, D^2}{\sigma}$
عدد Morton	$Mo = \frac{\Delta\rho\, g\, \mu_L{}^4}{\sigma^3 \rho_L^2}$
عدد رینولدز	$\mathrm{Re} = \frac{\rho_d\, U\, D}{\mu_d}$
عدد وبر	$We = \frac{\rho_d U^2 D}{\sigma}$

علائم یونانی

شار حجمی	ϕ
کسر حجمی فاز	γ
نرخ برش	$\dot{\gamma}$
کشش سطحی مایع-جامد	σ_{SL}
کشش سطحی جامد-گاز	σ_{SG}
کشش سطحی مایع-گاز	σ_{LG}
چگالی	ρ
عبارت نفوذ	Γ
دلتای کرونکر	$\delta_{i,j}$
فاکتور پایدارساز	δ_n
خمیدگی	κ
زاویهٔ تماس استاتیکی	θ_c
زاویهٔ تماس دینامیکی	θ_d
زاویهٔ تماس پخش شده‌گی	θ_{CS}
زاویهٔ تماس پس‌زنی	θ_{CR}
زاویهٔ تماس پیشرو	θ_A
زاویهٔ تماس پس‌رو	θ_R

زیرنویس‌ها

نیروهای بدنی	b
محیط ساکن	c
حباب	d