

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی مکانیک
پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی تبدیل انرژی

بررسی دو فازی سقوط قطره در کانال حاوی سیال با اثرات انتقال حرارت

نگارنده: امیرحسین نیرومند

استاد راهنما:
دکتر محسن نظری

بهمن ۱۳۹۵

تشکر و قدردانی

بر خود لازم می‌دانم تا از زحمات بی‌دریغ استاد عزیزم جناب آقای دکتر محسن نظری و دو سال راهنمایی بی‌وقفه ایشان در راستای ارتقای سطح علمی اینجانب، دانشگاه و کشورم، قدردانی نمایم. همچنین دوستان عزیزم که این حقیر را در رسیدن به هدفم یاری نمودند.

تشکر و قدردانی می‌نمایم از پدر و مادر مهربانم که در طول مدت تحصیل مرا همراهی و همیاری نمودند.

سپاسگزار همسر دلسوز و فرزند دلبندم هستم که مایه آرامش و امید من به آینده‌ای روشن هستند.

تعهد نامه

اینجانب امیرحسین نیرومند دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک تبدیل انرژی، دانشکده‌ی مهندسی مکانیک دانشگاه شاهرود نویسنده پایان‌نامه «بررسی دو فازی سقوط قطره در کانال حاوی سیال با اثرات انتقال حرارت» تحت راهنمایی دکتر محسن نظری متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.

- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.

- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.

- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه شاهرود» و یا «Shahrood University» به چاپ خواهد رسید.

- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.

- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.

- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است، اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.

- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده:

در مطالعه حاضر، پدیده سقوط یک قطره در کانال حاوی سیال و در یک هندسه دو بعدی متقارن محوری به کمک شبیه سازی عددی مورد بررسی قرار گرفته و پارامترهای قابل تأثیر روی مسأله از جمله: وجود اختلاف دما بین قطره و سیال محیطی، تأثیر اعداد بی بعد رینولدز، وبر، فراد و رایلی؛ در طول حل تغییر یافته و نتایج حاصل از این تغییرات به کمک شکل‌ها، کانتورها، جدول‌ها و منحنی‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به این که نوع جریان پیش رو، جریان دو فازی می‌باشد، برای پیدا کردن سطح مشترک بین دو فاز در هر لحظه از روش نسبت حجمی سیال استفاده شده است. که معادله مربوط به این روش به همراه سایر معادلات حاکم در نرم افزار فلونتت نسخه ۶/۳ حل گردیده‌اند. تغییر پارامترهای موثر بر مسأله باعث گردید تا سقوط قطره در کانال حاوی سیال با رژیم‌های مختلفی روبرو گردد و در پی آن زمان سقوط قطره، نرخ انتقال حرارت، میزان تغییر شکل قطره از حالت دایروی، ایجاد جدایش در قطره و ... در حالت‌های مختلف، با یکدیگر تفاوت کند که تمام موارد فوق در حالت‌های مختلف با یکدیگر مقایسه گردیده‌اند.

کلمات کلیدی: سقوط قطره در کانال، متقارن محوری، انتقال حرارت، حل عددی به کمک فلونتت،

روش نسبت حجمی سیال

فهرست عناوین:

۱	فصل یکم: مقدمه	۱
۲	۱. پیش گفتار:	۲
۴	۲. پروژه پیش رون:	۴
۴	۳. ضرورت مسأله و جنبه های نوآوری:	۴
۵	فصل دوم: معرفی معادلات حاکم	۵
۶	۱. معادلات حاکم:	۶
۶	۲. معرفی روش نسبت حجمی سیال:	۶
۱۰	۳. اثرات انتقال حرارت:	۱۰
۱۱	فصل سوم: مدلسازی مسأله	۱۱
۱۲	۱. فیزیک مسأله:	۱۲
۱۳	۲. مطالعه عدم وابستگی به شبکه (Grid Study):	۱۳
۱۵	۳. شرایط مرزی:	۱۵
۱۷	۴. تنظیمات نرم افزار:	۱۷
۱۸	۵. معتبرسازی حل عددی:	۱۸
۲۱	فصل چهارم: تعریف و انتخاب گروه های بی بُعد	۲۱
۲۲	۱. معرفی انواع گروه های بی بعد استفاده شده در مطالعات مشابه:	۲۲
۲۳	۲. تعریف اعداد بی بعد مورد استفاده:	۲۳
۲۶	۳. صحه گذاری انتخاب صحیح گروه های بی بعد مناسب:	۲۶
۲۹	فصل پنجم: نتایج بررسی سقوط قطره در سیال نیوتنی بدون حضور انتقال حرارت	۲۹
۳۰	۱. اثر تغییرات عدد رینولدز:	۳۰
۳۹	۲. اثر تغییرات عدد وبر:	۳۹
۴۷	۳. اثر تغییرات عدد فراد:	۴۷

۶	فصل ششم: نتایج بررسی سقوط قطره در سیال نیوتنی با حضور انتقال
۵۷	حرارت.....
۵۸	۱. بررسی تأثیر وجود انتقال حرارت بر رژیم جریان:.....
۶۳	۲. اثر تغییرات عدد رایلی:.....
۶۵	۳. بررسی تأثیر عوامل مختلف بر نرخ انتقال حرارت:.....
۶۹	۷. فصل هفتم: مراجع.....

فهرست اشکال:

- شکل ۳-۱ هندسه مسأله. الف: کل دامنه مورد بررسی و ب: دامنه حل شده در نرم افزار..... ۱۳
- شکل ۳-۲ نتایج مطالعه عدم وابستگی حل به تعداد شبکه بر اساس زمان عبور قطره در حال سقوط از مرکز دامنه حل..... ۱۴
- شکل ۳-۳ نتایج مطالعه عدم وابستگی حل به تعداد شبکه بر اساس مکان قطره پس از گذشت ۳۶۰ میلی ثانیه..... ۱۴
- شکل ۳-۴ هندسه و مش ایجاد شده در نرم افزار گمبیت و شرایط مرزی اعمال شده..... ۱۶
- شکل ۳-۵ تغییر شکل قطره‌های مختلف، حل شده توسط برتاکیس و همکاران [۲۲]..... ۱۹
- شکل ۳-۶ تغییر شکل قطره‌های مختلف، حل شده در پروژه حاضر..... ۲۰
- شکل ۴-۱ مقایسه دو حالت مختلف بدون حضور انتقال حرارت در اعداد بی بعد ثابت: $Re=50$, $We=50$, $Fr=0.6$ (جزئیات حل در جدول ۴-۲) ۲۶
- شکل ۴-۲ مقایسه دو حالت مختلف با حضور انتقال حرارت در اعداد بی بعد ثابت:..... ۲۷
- شکل ۵-۱ نحوه تغییر شکل قطره در حین سقوط و خطوط جریان در اعداد رینولدز مختلف و در شرایط $We50$ ۳۱
- شکل ۵-۲ نحوه تغییر شکل قطره در حین سقوط و خطوط جریان در اعداد رینولدز مختلف و در شرایط $We200$ ۳۲
- شکل ۵-۳ نحوه تغییر شکل قطره در حین سقوط و خطوط جریان در اعداد رینولدز مختلف و در شرایط $We1000$ ۳۳
- شکل ۵-۴ نحوه تغییر شکل قطره در حین سقوط و خطوط جریان در اعداد رینولدز مختلف و در شرایط $Fr0.6$ ۳۴
- شکل ۵-۵ نحوه تغییر شکل قطره در حین سقوط و خطوط جریان در اعداد رینولدز مختلف و در شرایط $Fr1.5$ ۳۵

- شکل ۵-۶ نحوه تغییر شکل قطره در حین سقوط و خطوط جریان در اعداد رینولدز مختلف و در شرایط Fr5..... ۳۶
- شکل ۵-۷ تأثیر تغییر عدد رینولدز بر زمان سقوط بی بعد در اعداد وبر مختلف و فراد ۰/۶..۳۷
- شکل ۵-۸ تأثیر تغییر عدد رینولدز بر زمان سقوط بی بعد در اعداد فراد مختلف و وبر ۵۰...۳۸
- شکل ۵-۹ نحوه تغییر شکل قطره در حین سقوط و خطوط جریان در اعداد وبر مختلف و در شرایط Re35..... ۴۰
- شکل ۵-۱۰ نحوه تغییر شکل قطره در حین سقوط و خطوط جریان در اعداد وبر مختلف و در شرایط Re85..... ۴۱
- شکل ۵-۱۱ نحوه تغییر شکل قطره در حین سقوط و خطوط جریان در اعداد وبر مختلف و در شرایط Re100..... ۴۲
- شکل ۵-۱۲ نحوه تغییر شکل قطره در حین سقوط و خطوط جریان در اعداد وبر مختلف و در شرایط Fr0.6..... ۴۳
- شکل ۵-۱۳ نحوه تغییر شکل قطره در حین سقوط و خطوط جریان در اعداد وبر مختلف و در شرایط Fr1.5..... ۴۴
- شکل ۵-۱۴ نحوه تغییر شکل قطره در حین سقوط و خطوط جریان در اعداد وبر مختلف و در شرایط Fr5..... ۴۵
- شکل ۵-۱۵ تأثیر تغییر عدد وبر بر زمان سقوط بی بعد در اعداد رینولدز مختلف و فراد ۰/۶..۴۶
- شکل ۵-۱۶ تأثیر تغییر عدد وبر بر زمان سقوط بی بعد در اعداد فراد مختلف و رینولدز ۱۰۰..... ۴۶
- شکل ۵-۱۷ نحوه تغییر شکل قطره در حین سقوط و خطوط جریان در اعداد فراد مختلف و در شرایط Re35..... ۴۸

- شکل ۵-۱۸ نحوه تغییر شکل قطره در حین سقوط و خطوط جریان در اعداد فراد مختلف و در شرایط Re85..... ۴۹
- شکل ۵-۱۹ نحوه تغییر شکل قطره در حین سقوط و خطوط جریان در اعداد فراد مختلف و در شرایط Re100..... ۵۰
- شکل ۵-۲۰ نحوه تغییر شکل قطره در حین سقوط و خطوط جریان در اعداد فراد مختلف و در شرایط We50..... ۵۱
- شکل ۵-۲۱ نحوه تغییر شکل قطره در حین سقوط و خطوط جریان در اعداد فراد مختلف و در شرایط We200..... ۵۲
- شکل ۵-۲۲ نحوه تغییر شکل قطره در حین سقوط و خطوط جریان در اعداد فراد مختلف و در شرایط We1000..... ۵۳
- شکل ۵-۲۳ تأثیر تغییر عدد فراد بر زمان سقوط بی بعد در اعداد رینولدز مختلف و وبر ۵۰ ۵۴
- شکل ۵-۲۳ تأثیر تغییر عدد فراد بر زمان سقوط بی بعد در اعداد وبر مختلف و رینولدز ۱۰۰ ۵۵
- شکل ۶-۱ مقایسه دو حالت وجود اختلاف دما و عدم وجود آن در رینولدز ۳۵ (Pe) Ra 434000, (4157) ۵۹
- شکل ۶-۲ مقایسه دو حالت وجود اختلاف دما و عدم وجود آن در رینولدز ۶۵ (Ra 434000,) (Pe 4157) ۶۰
- شکل ۶-۳ مقایسه دو حالت وجود اختلاف دما و عدم وجود آن در رینولدز ۱۰۰ (Ra 434000,) (Pe 4157) ۶۱
- شکل ۶-۴ مقایسه دو حالت سقوط قطره در شرایط Re 85, We 50, Fr 1.5, Ra 434000, Pe (4157)..... ۶۲
- شکل ۶-۵ پروفیل سرعت محوری در مقطع عبوری از مرکز قطره با شرایط شکل ۶-۴..... ۶۳

شکل ۶-۶ نحوه تغییر شکل قطره در حین سقوط و خطوط جریان در شرایط $Re\ 65, We\ 50$

۶۴Fr 0.6, Pe 4157

شکل ۶-۷ تأثیر تغییر عدد رینولدز بر نرخ انتقال حرارت بی بعد در اعداد وبر و فراد مختلف ۶۵

شکل ۶-۸ تأثیر تغییر عدد وبر بر نرخ انتقال حرارت بی بعد در اعداد رینولدز و فراد مختلف ۶۶

شکل ۶-۹ تأثیر تغییر عدد فراد بر نرخ انتقال حرارت بی بعد در اعداد رینولدز و وبر مختلف ۶۶

فهرست جداول:

جدول ۱-۴ اعداد بی بعد مورد استفاده در مقالات مربوط به قطره..... ۲۲

جدول ۲-۴ پارامترهای حل در دو حالت الف و ب برای اعداد بی بعد $Re=50, We=50$

..... $Fr=0.6$ ۲۷

جدول ۳-۴ پارامترهای حل در دو حالت الف و ب برای اعداد بی بعد زیر:..... ۲۷

فهرست علائم:

\vec{V}	سرعت سیال
t	زمان
ρ	دانسیتة سیال
P	فشار سیال
μ	ویسکوزیته سیال
μ_{∞}	ویسکوزیته سیال در نرخ برش بینهایت
μ_0	ویسکوزیته سیال در نرخ برش صفر
\vec{F}_b	نیروهای حجمی وارد بر سیال
f	مقدار تابع نسبت حجمی
f_i	مقدار تابع نسبت حجمی در فاز i
ρ_i	مقدار دانسیته سیال در فاز i
σ	ضریب کشش سطحی
κ	انحنای قطره
A	سطح جانبی قطره
\forall	حجم قطره
Ec	عدد اکرت
U	سرعت قطره
C	گرمای ویژه سیال
T	دمای قطره یا سیال

h	انتالپی سیال
k	ضریب انتقال حرارت هدایت
u	مولفه سرعت سیال در راستای افقی
v	مولفه سرعت سیال در راستای قائم
g	شتاب گرانش زمین
R_0	شعاع اولیه قطره قبل از سقوط
L	طول مشخصه
Re	عدد رینولدز
ρ_l	دانسیتة سیال اطراف قطره
μ_l	ویسکوزیته سیال اطراف قطره
ρ_g	دانسیتة سیال داخل قطره
μ_g	ویسکوزیته سیال داخل قطره
Fr	عدد فراد
We	عدد وبر

۱. فصل یکم: مقدمه

۱. پیش گفتار:

مطالعه تغییر شکل^۱ و فروپاشی^۲ قطره ها برای کاربردهایی از جمله: فرایند اختلاط در سیستم های چندفازی، مخلوط کردن پلیمرهای مذاب، پرینترهای جوهر افشان، تغییر شکل سلولهای بیولوژیک، شکل گیری قطرات باران در اتمسفر و ... اهمیت فراوانی دارد.

همچنانکه قبل از مطالعه حاضر، اگرز [۱] مطالعه ای بر پیشروی تئوری فروپاشی و دینامیک غیر خطی در جریانهای سطح آزاد داشته است. لیو و همکارانش [۲] و نیز سان و همکاران او [۳] مطالعات گسترده ای روی دینامیک برخورد قطرات داشته اند. همچنین استون [۴] ناپایداری مویبندی در فروپاشی و تغییر شکل قطره ها در جریان های ویسکوز با عدد رینولدز پایین را خلاصه سازی نموده است.

برای جریانهایی با عدد رینولدز پایین، حرکت سیال تحت تأثیر معادلات ناویر-استوکس و پیوستگی قرار دارد و درجه تغییر شکل قطره و مشخصه های فروپاشی آن عمدتاً با محاسبه بزرگی تنش برشی بین سطحی نسبت به بزرگی تنش ویسکوز ایجاد شده توسط جریان، بدست خواهد آمد. نسبت لزجت ها و عدد مویبندی دو پارامتر بدون بعد کلیدی در جریان های رینولدز پایین هستند. در اعداد رینولدز پایین، احتمال بدست آمدن اثرات ضعیف اینرسی با حل اغتشاشی معادلات استوکس وجود دارد. لیل [۵] متوجه شد که اثرات تجمعی اینرسی ضعیف می تواند اثرات بزرگ غیر قابل پیش بینی توسط تئوری خطی را به وجود آورد.

در زمینه برخورد قطرات با یکدیگر نیز مطالعات گسترده ای انجام شده است. پسندیده فرد [۶]، مهدی نژاد [۷]، عزیز [۸]، باسمن [۹] و همکارانشان از جمله افرادی هستند که بررسی های تجربی و عددی روی این موضوع داشته اند.

¹ Deformation

² Breakup

حل‌های تحلیلی صریح در مسائل کاملاً غیر خطی حرکت‌های سیال و ذرات، بسیار به ندرت یافت می‌شوند. فنگ و همکارانش [۱۰] اثرات غیر خطی حرکت سیال و ذرات را به کمک روش المان محدود بررسی کردند. آنها خاطر نشان ساختند که عمده مشکلاتی که در زمان بدست آوردن اثرات غیر خطی ظاهر می‌شوند زمانی هستند که: الف) عدد رینولدز به اندازه کافی بزرگ باشد تا اینرسی مهم شود. ب) سیال، غیر نیوتنی بوده و جریان ذاتاً غیر خطی باشد و ج) ذرات تغییر شکل پذیر باشند. در مطالعه آنها فقط در حالت ذرات صلب در سیال نیوتنی، تغییر شکل ذرات در نظر گرفته نشده بود.

مرتضوی و تریگواسون [۱۱] مطالعه‌ای در زمینه حرکت قطرات شناور خنثی در جریان پوازی^۱ انجام دادند.

فرانکوئیز و شی [۱۲ و ۱۳] محاسبات دینامیک قطره را انجام دادند. تکنیک مرز غوطه‌ور^۲ [۱۲] و [۱۴ و ۱۵] برای به دست آوردن مرز بین دو سیال در حال حرکت استفاده شد. مشایک و همکارانش [۱۶] نیز مطالعه‌ای روی برخورد و بهم آمیختگی دو قطره آب با استفاده از روش المان محدود گالرکین^۳ داشتند. باسمن [۹ و ۱۷] از روش Volume Tracking برای بدست آوردن سطح مشترک بین دو سیال استفاده نمود در حالیکه جاین و همکارانش [۱۸] از روش نسبت حجمی سیال^۴ در حل جریان دو فازی استفاده کردند.

البته روش شبکه بولتزمن نیز محبوبیت زیادی داشته و از جمله پژوهش‌هایی که به این روش انجام شده فعالیت‌های لی و لیو [۱۹] در زمینه برخورد قطره با سطح خشک، تقی لو و رحیمیان [۲۰] در زمینه حل جریان دو فازی در محیط متخلخل و همچنین شن و همکارانش [۲۱] در زمینه برخورد قطره با سطح دارای انحنا می‌باشد.

¹ Poiseuille Flow

² Immersed boundary technique

³ Galerkin finite element method

⁴ Volume of Fluid (VOF)

۲. پروژه پیش رو:

هدف از مطالعه حاضر، شفاف سازی اثرات تغییر شکل قطره، فروپاشی، اینرسی، ویسکوزیته و تغییرات دما بر روی حرکت سیال به کمک حل عددی در مسأله سقوط قطره در کانال حاوی سیال می باشد. معادلات ناویر استوکس تراکم ناپذیر گذرا به روش نسبت حجمی سیال حل خواهند شد. در فصل دوم معادلات حاکم در هر مرحله آورده شده است و همچنین به روابطی که از حل آنها مرز قطره در هر لحظه به دست خواهد آمد، اشاره شده است.

در فصل سوم عمدتاً روی مدلسازی مسأله صحبت شده است؛ از مطالعه شبکه تا نحوه تنظیمات نرم افزار. همچنین در این فصل معتبرسازی حل عددی نیز صورت گرفته است.

در فصل چهارم اعداد بی بعد تمام موضوع را به خود اختصاص داده اند. از چگونگی انتخاب گروه های بی بعد مناسب تا تعریف آنها در مسأله حاضر.

در ادامه و در فصلهای پنجم و ششم نتایج حل های انجام شده برای سقوط قطره در یک کانال حاوی سیال نیوتنی در شرایط بدون حرارت و با اثرات انتقال حرارت جابجایی آزاد و اجباری آورده شده است.

۳. ضرورت مسأله و جنبه های نوآوری:

همانطور که در بخش پیش گفتار مختصراً اشاره گردید، بررسی حرکت قطرات در حالت های مختلف و در شرایط گوناگون، موضوعی است که تاکنون بسیار مورد علاقه پژوهشگران در این رشته قرار گرفته است. بررسی اجمالی این مطالعات نشان می دهد سقوط قطره در یک کانال بسته موضوعی بوده که در میان این تحقیقات گسترده، نقش کم رنگ تری را بازی نموده است. بنابراین سعی بر این قرار گرفت تا با انجام یکسری بررسی ها و مطالعات، بتوان تا حدودی این خلأ را پوشش داد.

به منظور نوآوری در این زمینه، وجود اثرات حرارتی به این موضوع اضافه گردید تا نتایج حاصله از این پژوهش کاربرد بیشتری پیدا نماید.

۲. فصل دوم: معرفی معادلات حاکم

۱. معادلات حاکم:

در این پروژه، معادلات ناویر-استوکس در یک دامنه دو بعدی متقارن محوری حل می‌شوند. برای یک جریان تراکم ناپذیر، آرام و نیوتنی معادلات پیوستگی و ناویر-استوکس به شکل زیر در می‌آیند:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0 \quad (1-2)$$

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\vec{V} \cdot \vec{V}) = -\frac{1}{\rho} \vec{\nabla} P + \frac{1}{\rho} \vec{\nabla} \cdot \left[\mu \left[(\vec{\nabla} \vec{V}) + (\vec{\nabla} \vec{V})^T \right] \right] + \frac{1}{\rho} \vec{F}_b \quad (2-2)$$

که در این معادلات، \vec{V} بردار سرعت، ρ دانسیته، μ ویسکوزیته دینامیکی، P فشار و \vec{F}_b بیانگر نیروهای حجمی بر واحد حجم هستند که روی سطح قطره اثر می‌کنند؛ مقدار این نیرو در فاز سیال محیطی برابر با صفر و در فاز قطره برابر با کشش سطحی می‌باشد که از رابطه زیر بدست خواهد آمد:

$$\vec{F}_b = \sigma \kappa \frac{A}{V} \hat{n} \quad (6-2)$$

در معادله فوق، σ کشش سطحی، κ انحنای سطح آزاد قطره، A مساحت سلول‌های قطره و V حجم قطره می‌باشد.

۲. معرفی روش نسبت حجمی سیال:

در دینامیک سیالات محاسباتی روش نسبت حجمی سیال یک تکنیک مدلسازی سطح آزاد یا به عبارتی یک تکنیک عددی برای ردیابی و یافتن موقعیت سطح آزاد یا سطح مشترک دو سیال به شمار می‌رود. این روش از کلاس روش‌های اویلری به حساب می‌آید. مشخصه این کلاس از روش‌ها وجود یک مش ثابت یا متحرک با یک روش از پیش تعیین شده به منظور ارتباط هندسه در حال تغییر با سطح آزاد آن می‌باشد.

بنابراین روش نسبت حجمی سیال یک دست‌ورالعمل عددی بوده که به برنامه نویسی این امکان را می‌دهد تا شکل و موقعیت سطح مشترک سیال را ردیابی کند اما این روش یک الگوریتم حل

جریان مستقل نمی‌باشد و می‌بایست معادلات ناویر-استوکس به منظور توصیف حرکت سیال به طور جداگانه حل شوند.

روش نسبت حجمی سیال بر پایه روش‌های ابتدایی «سلول و نشان گذار»^۱ بنا شده است. اولین اطلاعات پیرامون آنچه که امروزه از روش نسبت حجمی سیال شناخته شده است، در سال ۱۹۷۶ میلادی توسط نو و وودوارد [۲۳] ارائه شد جایی که تابع نسبی f ظاهر گردید. اما با این حال اولین ژورنال منتشر شده در این خصوص به نام هرت و نیکولاس [۲۴] در سال ۱۹۸۱ ثبت شد. روش نسبت حجمی سیال به دلیل کاهش دادن نیازهای پردازش و ذخیره اطلاعات کامپیوتری از روش سلول و نشانه گذار پیشی گرفت و به سرعت محبوب گردید.

از اولین کاربردهای نسبت حجمی سیال می‌توان به کد نوشته شده برای سازمان ناسا در سالهای ۱۹۸۷-۱۹۸۵ توسط توری و همکارانش [۲۵] اشاره نمود.

اولین اجراهای عملی روش نسبت حجمی سیال با توصیفات ناقصی از سطح مشترک سیال همراه بود اما بعد تر با معرفی روش «محاسبات سطح مشترک تکه‌ای خطی»^۲ بهبود یافت. استفاده همزمان از روش‌های نسبت حجمی سیال و محاسبات سطح مشترک تکه‌ای خطی این روزها به یک استاندارد تبدیل شده و در شماری از کدهای کامپیوتری از قبیل FLOW-3D، Gerris، ANSYS Fluent و STAR-CCM استفاده می‌شود.

این روش بر پایه ایده‌ای به نام تابع نسبی f بنا شده که یک تابع اسکالر بوده و به صورت «انتگرال تابع مشخصه‌ای از سیال در حجم کنترل» تعریف می‌شود. نسبت حجم هر سیال از طریق تمامی سلولهای موجود در دامنه حل عددی ردیابی می‌شود در حالیکه تمام سیال‌ها یک مجموعه از معادلات مومنتوم را مشترکاً حل می‌نمایند.

¹ Marker and Cell (MAC) methods

² Piecewise-Linear Interface Calculation (PLIC)

وقتی درون یک سلول خالی از سیال مورد بررسی باشد، مقدار f برابر با صفر است؛ زمانی که سلول پر باشد، مقدار f برابر با یک است و وقتی که یک سطح آزاد در سلول مورد نظر وجود داشته باشد مقدار f عددی بین صفر و یک خواهد بود.

$$f = \begin{cases} 1 & \text{سلولهایی که با سیال درون قطره پر شده اند.} \\ < 1 \text{ and } > 0 & \text{سلولهایی که با هر دو سیال پر شده اند.} \\ 0 & \text{سلولهایی که با سیال اطراف قطره پر شده اند.} \end{cases} \quad (3-2)$$

f یک تابع ناپیوسته است و مقدار آن زمانی که آرگومان داخل آن وارد فاز سیال مورد نظر می شود از صفر به یک تغییر می کند. وقتی مقدار تابع f به سرعت تغییر کند مسیر کلی سطح آزاد سیال پیدا خواهد شد اما به منظور رسیدن به جواب دقیق، انجام بهسازی موضعی در شبکه اجتناب ناپذیر می باشد. معیار بهسازی بسیار آسان است، سلولهایی که مقادیر f در آنها بین صفر و یک باشد نیاز به بهسازی دارند. یک روش برای این کار که به عنوان روش «ریز سلول و نشانه گذار» شناخته می شود توسط راد و همکارانش [۲۶] ارائه شده است.

توزیع سیال m ام در یک سیستم n سیالی با معادله انتقال به صورت زیر:

$$\frac{\partial f_m}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} f_m = 0 \quad (4-2)$$

و با قید:

$$\sum_{m=1}^n f_m = 1 \quad (5-2)$$

بیان می شود به این معنی که حجم سیالات ثابت هستند.

در هر سلول، خواص مثل دانسیته و ... به صورت میانگین نسبت حجمی تمام سیالات در آن سلول محاسبه می شوند:

$$\rho = \sum f_i \rho_i \quad (6-2)$$

سپس این مشخصات برای حل یک معادله مومنتوم واحد در کل دامنه استفاده شده و دامنه سرعت بدست آمده از حل معادله مومنتوم در تمام سیالات به اشتراک گذاشته می‌شود.

روش نسبت حجمی سیال به لحاظ محاسباتی روش مساعدی است چرا که تنها یک معادله به مجموعه معادلات اضافه می‌نماید و بنابراین حداقل فضا را نیاز دارد.

همچنین این روش به دلیل قدرت بالای حل معادلات به شدت غیر خطی نیز معروف است؛ جایی که سطح آزاد سیال از لحاظ موقعیت مکانی، تغییرات بسیار شدیدی را تجربه می‌کند.

با استفاده از روش نسبت حجمی سیال همچنین می‌توان از زیر بار استفاده از الگوریتم‌های پیچیده تغییر شکل مش که در روش‌های ردیابی سطح آزاد استفاده می‌شود نیز شانه خالی نمود.

مشکل بزرگی که استفاده از روش نسبت حجمی سیال دارد، پهن بودن خط سطح آزاد سیال بدست آمده در این روش است که این مشکل هم از وجود شدید خاصیت پخش در معادله انتقال نشأت می‌گیرد.

۳. اثرات انتقال حرارت:

انتقال حرارت در این پروژه با حل معادله انرژی و با فرض چشم پوشی از اتلافات ویسکوز، مدل می‌شود. درستی فرض ناچیز بودن اتلافات ویسکوز را می‌توان با محاسبه عدد اکرت^۱ بررسی نمود.

[۳۱]

$$Ec = \frac{U^2}{C\Delta T} \quad (۸-۲)$$

که در معادله فوق، U سرعت قطره، C گرمای ویژه و ΔT اختلاف دمای قطره و محیط آن می‌باشد. در این پروژه و هندسه‌ای که مورد بررسی قرار گرفته است، مقدار این عدد از مرتبه 10^{-5} می‌باشد که نشان می‌دهد اتلافات ویسکوز واقعاً ناچیز و قابل نظر نمی‌باشند. با این فرض، معادله انرژی در هر فاز به صورت زیر در خواهد آمد:

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + (\rho \vec{V} \cdot \vec{V})h = \vec{V} \cdot (k \vec{\nabla} T) \quad (۹-۲)$$

که ρ دانسیته، h مقدار انتالپی، k ضریب هدایت حرارتی و T دمای سیال می‌باشد. یادآور می‌گردد که با توجه به این که در این بررسی، اثرات انتقال حرارت آزاد نیز مورد توجه بوده است، مقدار دانسیته وابسته به دما بوده و ثابت نمی‌باشد.

با توجه به اینکه معادله ۹-۲ برای تمام فازها مشترکاً حل می‌شود، مقادیر دانسیته در هر فاز از معادله ۶-۲ بدست آمده و در معادله ۹-۲ جایگذاری می‌گردد. بدین ترتیب معادله انرژی و معادله ۲-۲ ۴ به یکدیگر وابسته خواهند بود.

¹ Eckert number

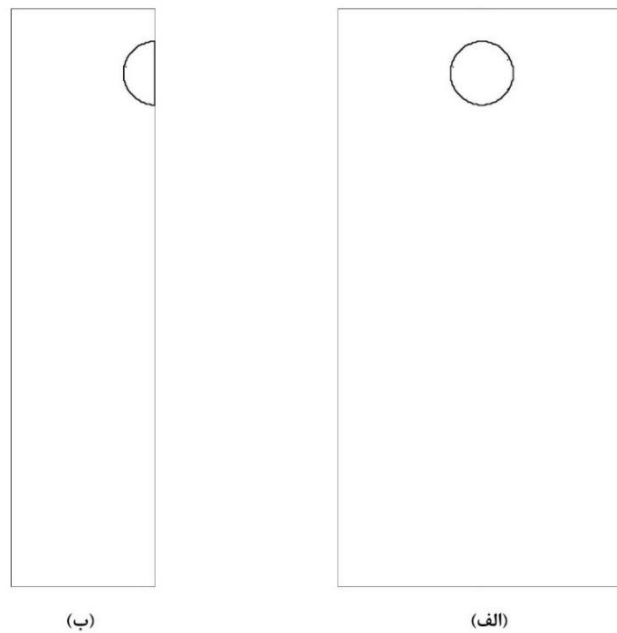
۳. فصل سوم: مدل‌سازی مسأله

۱. فیزیک مسأله:

با توجه به ماهیت ۳ بعدی قطره از یک طرف و در نظر گرفتن سهولت در انجام و معتبرسازی حل عددی از طرف دیگر، مسأله سقوط قطره در کانال حاوی سیال نیوتنی در یک هندسه دو بعدی **متقارن محوری** مورد بررسی قرار گرفت. بنابراین می‌توان مسأله فوق را در یک فضای دو بعدی دارای محور تقارن نیز حل نمود.

به این منظور یک هندسه مستطیل شکل به ابعاد 9×18 واحد به عنوان حجم کنترل (دامنه حل) در نظر گرفته شده که قطره‌ای به قطر ۲ واحد در آن سقوط می‌کند. با توجه به ماهیت متقارن محوری بودن مسأله، نصف دامنه (مستطیلی به ابعاد 4.5×18 واحد) با کد تجاری Fluent ورژن ۶/۳ تحلیل و شبیه سازی گردید.

قطره که در لحظه اول به شکل یک کره تو پر در نظر گرفته شده است، از حالت سکون و بدون سرعت اولیه بر اثر نیروی گرانش سقوط کرده و در لحظه اولیه موقعیت آن در مرکز کانال و در ارتفاع ۱۶ واحد از کف پایین کانال می‌باشد. (شکل ۳-۱) همچنین در فصل ششم نیز قطره با دمای اولیه ۴۰۰ درجه کلوین و سیال محیطی با دمای اولیه ۳۰۰ درجه کلوین تنظیم خواهند گردید.

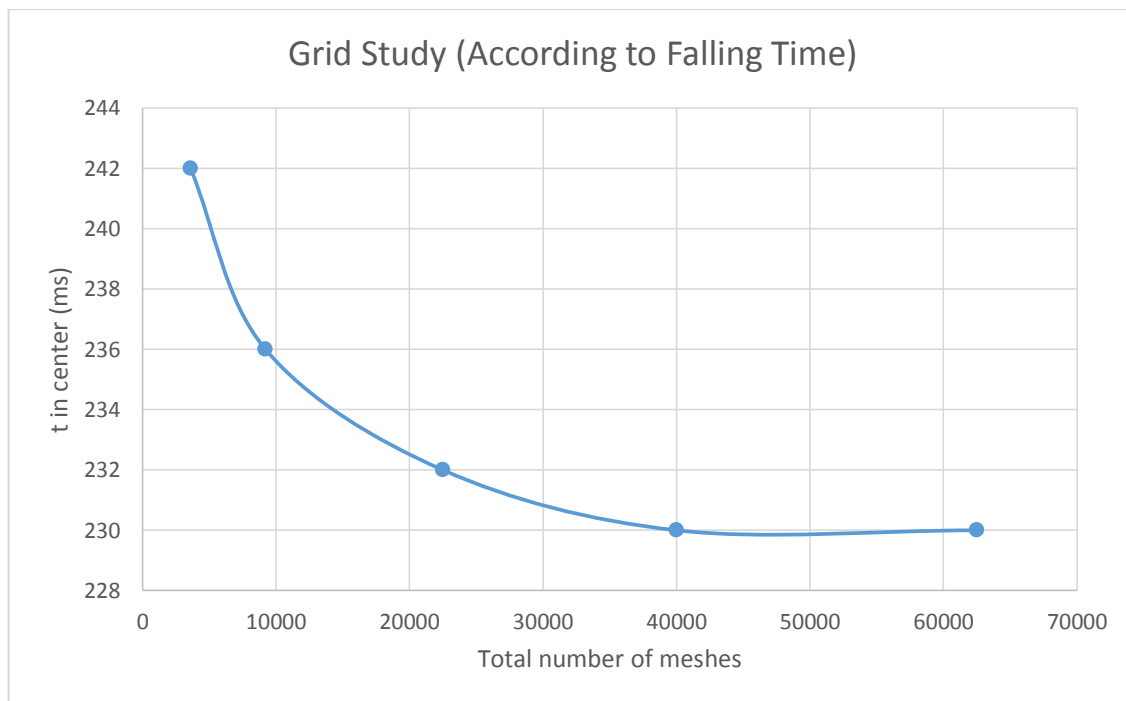


شکل ۳-۱ هندسه مسأله. الف: کل دامنه مورد بررسی و ب: دامنه حل شده در نرم افزار

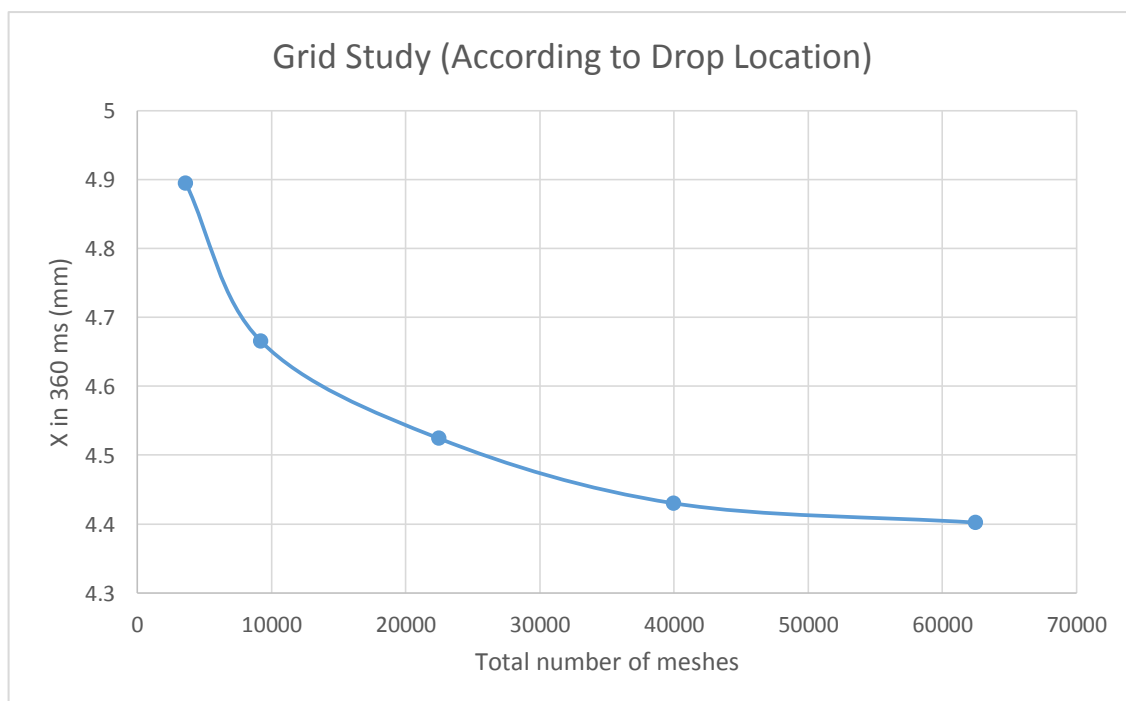
۲. مطالعه عدم وابستگی به شبکه (Grid Study):

با توجه به این که در پروژه از حل عددی استفاده شده است، ضرورت مطالعه شبکه مش به منظور پیدا کردن تعداد شبکه بهینه به طوری که حل مستقل از آن بدست آید، کاملاً محسوس می‌باشد. با در نظر گرفتن نسبت طول به عرض ۴ در دامنه حل، تعداد مش های شبکه نیز به همین نسبت انتخاب شدند.

مطالعه شبکه برای تعداد شبکه های ۱۲۰×۳۰ ، ۱۹۲×۴۸ ، ۳۰۰×۷۵ ، ۴۰۰×۱۰۰ و ۵۰۰×۱۲۵ انجام گرفته و نتایج حاصل از آن در این قسمت آورده شده است. پارامتر مورد بررسی در این حل، یکی زمان سقوط قطره تا رسیدن آن به یک مکان مشخص و دیگری مکان قطره پس از سقوط در یک زمان مشخص، بوده است.



شکل ۲-۳ نتایج مطالعه عدم وابستگی حل به تعداد شبکه بر اساس زمان عبور قطره در حال سقوط از مرکز دامنه حل



شکل ۳-۳ نتایج مطالعه عدم وابستگی حل به تعداد شبکه بر اساس مکان قطره پس از گذشت ۳۶۰ میلی ثانیه

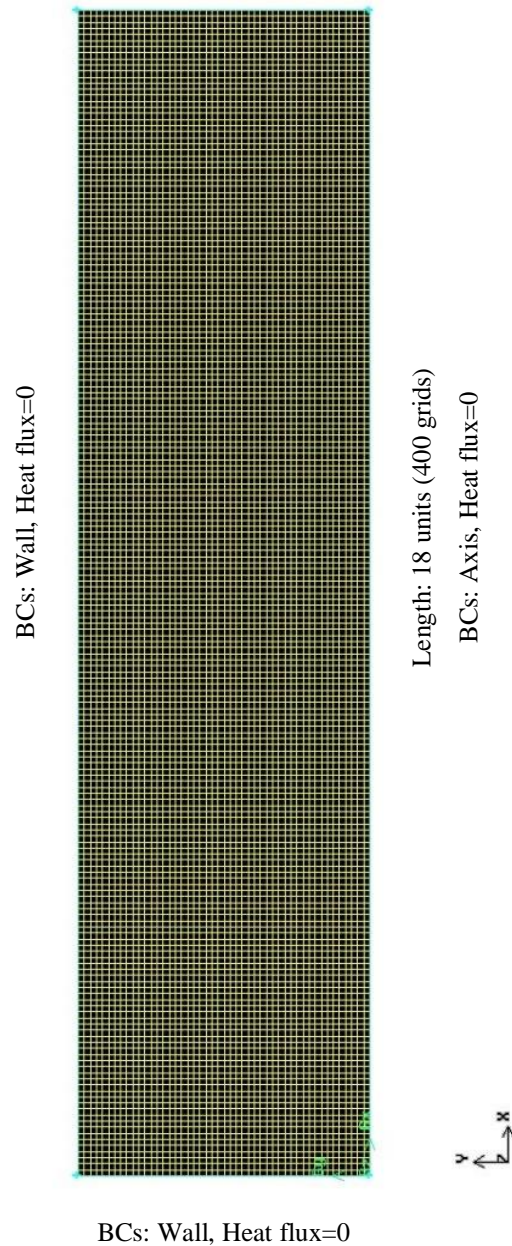
بنا بر بررسی‌های انجام گرفته و همانطور که از شکل‌های ۲-۳ و ۳-۳ مشخص است، با انتخاب یک شبکه مش به صورت 100×400 عدد در هندسه مورد نظر، نتایج حل با تقریب خوبی مستقل از اندازه شبکه خواهند بود.

۳. شرایط مرزی:

هندسه این مسأله یک مستطیل به ابعاد $4/5 \times 18$ واحد با تعداد مش 100×400 عدد مطابق شکل زیر خواهد بود:

Width: 4.5 units (100 grids)

BCs: Free Surface, Heat flux=0



شکل ۳-۴ هندسه و مش ایجاد شده در نرم افزار گمبیت و شرایط مرزی اعمال شده

این هندسه در نرم افزار Gambit 2.4.6 ایجاد شده و با توجه به مطالعه عدم وابستگی به تعداد شبکه، تعداد 100×400 عدد مش زده شده است. همانطور که در شکل ۳-۴ نیز قابل مشاهده است، مبدأ مختصات در گوشه پایین و سمت راست دامنه حل و محورهای x و y به ترتیب در راستاهای

قائم و افقی قرار دارند. برای حل مسأله یک قطره با قطر اولیه ۲ واحد در این هندسه تحت اثر نیروی گرانش سقوط خواهد کرد.

همچنین با توجه به هندسه دامنه حل (شکل ۳-۴) شرایط مرزی مومنتوم و حرارت به شرح ذیل در نظر گرفته شده اند:

- شرط مرزی سطح آزاد^۱ ($u = 0, \partial v / \partial y = 0$) در مرز بالایی
- شرط مرزی عدم لغزش در مرز سمت چپ و مرز تحتانی
- شرط مرزی محور تقارن (چون مسأله ۳ بعدی متقارن محوری است) در مرز سمت راست
- شرط مرزی عایق حرارتی در تمام مرزها

۴. تنظیمات نرم افزار:

برای حل مسأله فوق الذکر در نرم افزار فلوئنت، دامنه حل با سیال محیطی پوشانده شده و قطره با قطر اولیه ۲ واحد درون این دامنه قرار گرفته خواهد شد، سپس اثرات اعمال نیروی وزن و وجود اختلاف دما با سیال محیطی، بررسی خواهد گردید.

در نرم افزار فلوئنت نوع مدل حل کننده: Pressure Based ناپایا، مدل لزجت: جریان لایه‌ای، نحوه ارتباط سرعت و فشار: Fractional Step، نوع گسسته سازی فشار: PRESTO!، نوع گسسته سازی مومنتوم: آپویند مرتبه دوم، گسسته سازی نسبت حجمی سیال: Geo-Reconstruct، گسسته سازی انرژی: آپویند مرتبه اول و طول گام زمانی با توجه به همگرا شدن حل به طور تجربی برابر با ۰/۰۰۰۱ ثانیه در نظر گرفته شده‌اند.

^۱ Free-surface boundary condition

۵. معتبرسازی حل عددی:

حل های عددی و کامپیوتری علاوه بر دارا بودن مزایا و سهولت های بسیار، ایرادی گاهاً سخت دارند و آن هم معتبرسازی^۱ حل عددی است.

معتبرسازی همانطور که از نامش پیداست شامل ارائه دلایل و براهینی می باشد که صحت حل و نتایج بدست آمده از کامپیوتر و یا حل های عددی را تصدیق نماید. دلیل نیاز به این مطلب هم منطق ضعیف کامپیوتر می باشد چرا که کامپیوتر وسیله ای است که فقط محاسبات طبق فرمول های تعریف شده انجام می دهد و تشخیصی در درستی یا نادرستی حل و نتایج ندارد. معتبرسازی که معمولاً به صورت مقایسه با یک حل معتبر و صحیح انجام می گیرد، می تواند به روش های مختلفی صورت پذیرد از جمله:

۱- مقایسه بخشی از حل عددی با یک حل تحلیلی (بهترین و مطمئن ترین حالت)

۲- مقایسه بخشی از حل عددی با نتایج یک کار عملی و آزمایشگاهی

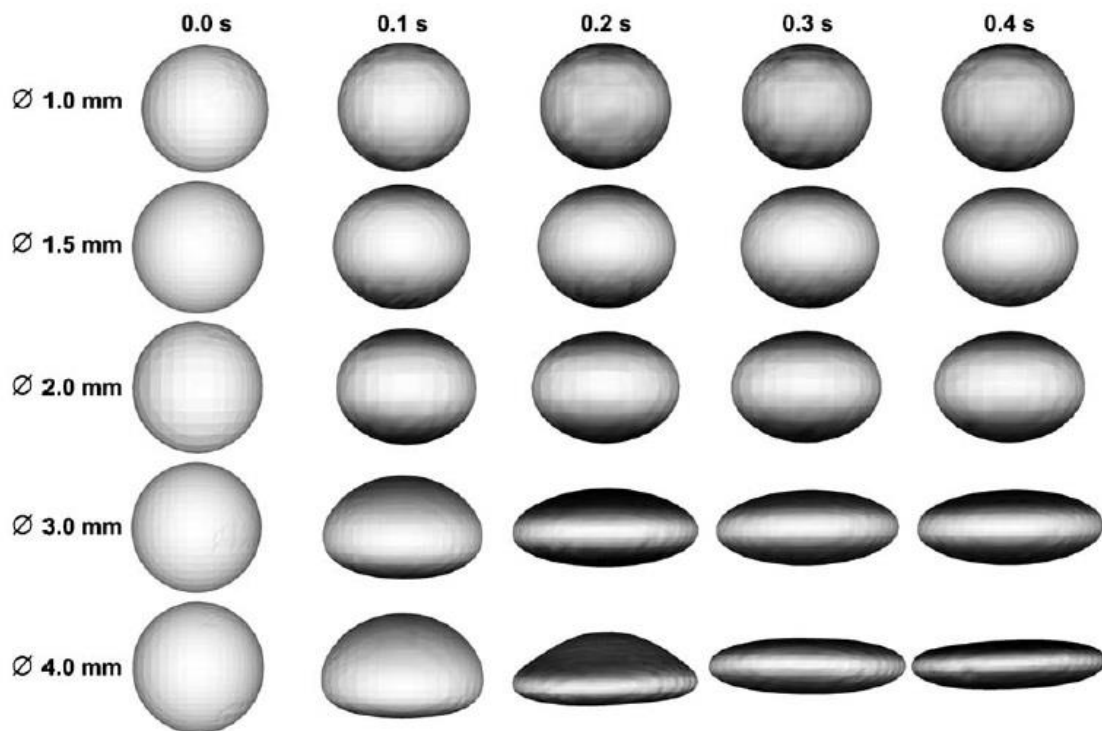
۳- مقایسه بخشی از حل عددی با نتایج یک حل عددی معتبر شده دیگر

لازم به ذکر است که معتبرسازی حل عددی در یک پژوهش وقتی هندسه و مشخصات کلی حل عددی یکسان باشد معمولاً فقط یک بار و برای یک حالت نمونه با یک حل معتبر مقایسه گشته و در صورت تطابق نتایج با یکدیگر فرض بر صحت کلیه نتایج قرار خواهد گرفت.

کار حاضر نیز از قاعده نیاز به معتبرسازی مستثنا نبوده و روش معتبرسازی آن نیز از حالت سوم می باشد. یعنی مسأله حل شده در این پروژه با یک نمونه از حل عددی انجام شده مشابه توسط برتاکیس و همکارانش [۲۲] مقایسه خواهد گردید.

¹ Validation

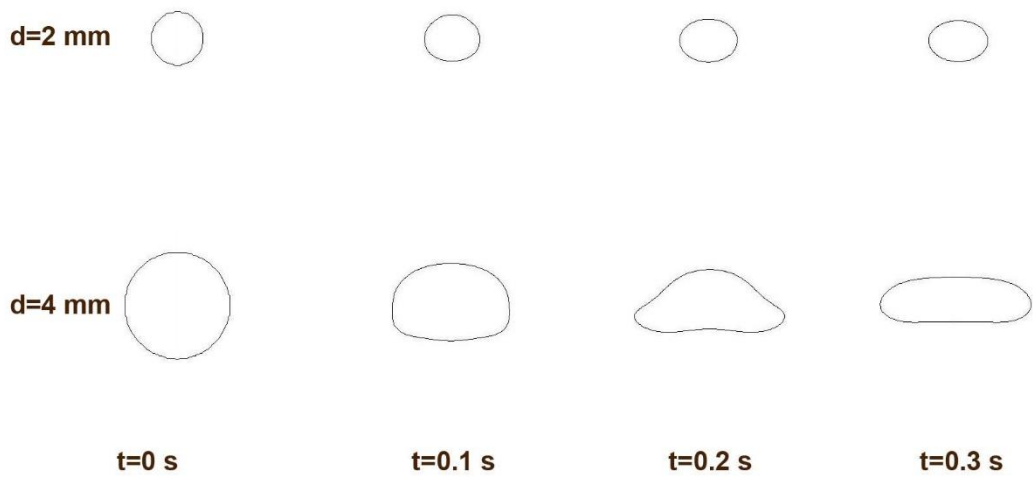
در پژوهش عددی فوق -که خود با یک مطالعه آزمایشگاهی، معتبرسازی گشته است- یک قطره کروی با قطرهای مختلف در یک سیال پیوسته ته نشین می‌گردد. در شکل ۳-۵ تغییر شکل قطره‌های با اندازه‌های مختلف و در زمان‌های مختلف که توسط برتاکیس و همکارانش بدست آمده است را مشاهده نمایید.



شکل ۳-۵ تغییر شکل قطره‌های مختلف، حل شده توسط برتاکیس و همکاران [۲۲]

حل‌های مشابهی نیز در پروژه حاضر به کمک کد تجاری فلونت صورت گرفت تا با مقایسه

نتایج با شکل ۳-۵ بتوان صحت پارامترهای حل را اثبات نمود.



شکل ۳-۶ تغییر شکل قطره‌های مختلف، حل شده در پروژه حاضر

همانطور که از مقایسه شکل های ۳-۵ و ۳-۶ مشخص می‌باشد، حل انجام شده با نتایج بدست آمده توسط برتاکیس و همکاران کاملاً تطابق دارد. بنابراین صحت نحوه مدلسازی و تنظیمات به کار گرفته شده در نرم افزار اثبات می‌گردد.

۴. فصل چهارم: تعریف و انتخاب گروه‌های بی بُعد

۱. معرفی انواع گروه های بی بعد استفاده شده در مطالعات مشابه:

به منظور انتخاب صحیح اعداد بی بعد مناسب در پروژه حاضر، نمونه پژوهش های مشابه انجام شده به صورت دقیق تر مطالعه گشته و اعداد بی بعد استفاده شده در آنها بررسی گردید.

اعداد بی بعدی که عمدتاً در مقالات بررسی قطره مورد استفاده قرار می گیرند به شرح ذیل

می باشند:

جدول ۴-۱ اعداد بی بعد مورد استفاده در مقالات مربوط به قطره

<i>Non-Thermal</i>			<i>Thermal</i>		
No	Name	Symbol	No	Name	Symbol
1	Reynolds Number	<i>Re</i>	1	Grashof number	<i>Gr</i>
2	Archimedes Number	<i>Ar</i>	2	Peclet Number	<i>Pe</i>
3	Eötvös Number	<i>Eo</i>	3	Prandtl Number	<i>Pr</i>
4	Weber Number	<i>We</i>	4	Rayleigh Number	<i>Ra</i>
5	Morton Number	<i>Mo</i>			
6	Ohnesorge Number	<i>Oh</i>			
7	Bond Number	<i>Bo</i>			
8	Capillary Number	<i>Ca</i>			
9	Froude Number	<i>Fr</i>			

لذا با انتخاب با اعداد بی بعد Re , We , Fr در مباحث سیالاتی و اعداد Ra , Pe در مباحث

حرارتی می توان اثر تغییر سایر اعداد بی بعد دیگر را نیز در نظر گرفت.

در زیر روابط بین سایر اعداد بدون بعد با اعداد انتخاب شده آمده است.

$$Bo = \frac{We}{Fr^2} \quad (۱-۴)$$

$$Eo \propto Bo = \frac{We}{Fr^2} \quad (۲-۴)$$

$$Oh = \frac{\sqrt{We}}{Re} \quad (۳-۴)$$

$$Ar = \frac{Eo}{Oh^2} = \frac{Re^2}{Fr^2} \quad (۴-۴)$$

$$Mo = Eo * Oh^4 = \frac{We^3}{Fr^2 * Re^4} \quad (۵-۴)$$

$$Ca = \frac{Re}{We} \quad (۶-۴)$$

$$Pr = \frac{Pe}{Re} \quad (۷-۴)$$

$$Gr = \frac{Ra}{Pr} = \frac{Ra * Re}{Pe} \quad (۸-۴)$$

۲. تعریف اعداد بی بعد مورد استفاده:

بنا بر آنچه که قبلاً نیز اشاره شد، اعداد بی بعد مورد استفاده (سیالاتی و حرارتی) در این پژوهش

عبارتند از: Re , We , Fr , Ra , Pe که به شرح ذیل تعریف می شوند:

$$Re = \frac{\rho V d}{\mu} \quad (۹-۴)$$

$$We = \frac{\rho V^2 d}{\sigma} \quad (۱۰-۴)$$

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gd}} \quad (۱۱-۴)$$

$$Ra = \frac{\rho g \beta \Delta T d^3}{\mu \alpha} \quad (۱۲-۴)$$

$$Pe = \frac{V d}{\alpha} \quad (۱۳-۴)$$

پس از تعریف اعداد بی بعد به شرح فوق، می‌بایست مشخص نمود که مقادیر استفاده شده در این تعاریف دقیقاً بیانگر چه چیزی خواهند بود.

در کلیه روابط بالا d قطر اولیه قطره، g شتاب گرانش، ρ دانسیته سیال محیطی، μ ویسکوزیته سیال محیطی، β ضریب انبساط حجمی سیال محیطی، α ضریب پخش حرارتی سیال محیطی، σ ضریب کشش سطحی بین دو فاز و ΔT اختلاف دمای اولیه قطره و سیال محیطی می‌باشد.

بنابراین کلیه پارامترهای مورد استفاده در روابط فوق به جز V به شرح فوق تعریف گردیدند. اما مسأله مهم انتخاب V که یک مؤلفه سرعت می‌باشد، است. چرا که سرعت اولیه قطره صفر بوده و نیز در حین سقوط نیز سرعت‌های متغیری دارد. همچنین در شرایط مختلف که رژیم جریان عوض می‌شوند هم نحوه تغییر سرعت سقوط متفاوت خواهد بود.

یک روش نسبتاً مرسوم این است که مقدار عدد فراد برابر با واحد قرار داده شود و از رابطه آن مقدار سرعت بدست آید. اما عیب بزرگ این روش این است که سرعت بدست آمده تنها حکم یک مقدار قرارداد شده دارد و یک مقدار واقعی نخواهد بود.

برتاکیس و همکارانش در پژوهشی که بر روی ته نشین شدن قطره انجام دادند [۲۲] بر اساس یک سری روابط تئوری و تجربی، رابطه جدیدی را برای سرعت بدست آوردند. این رابطه برای انتخاب مؤلفه مورد نیاز سرعت در پژوهش حاضر نیز مورد استفاده قرار گرفت. روابط استفاده شده توسط برتاکیس و همکارانش برای محاسبه مقدار سرعت ته نشین شدن (V_{sed}) در زیر آورده شده است. آنها سه رژیم صلب (Rigid)، چرخشی (Circulating) و نوسانی (Oscillating) را برای قطره در حال سقوط در نظر گرفته و مقدار سرعت را بر اساس این رژیم‌ها بدست آوردند.

$$Re_{rigid} = \sqrt{\frac{4 Ar}{3 C_{D,rigid}}} \quad (۱۴-۴)$$

$$C_{D,rigid} = \frac{432}{Ar} + \frac{20}{Ar^{1/3}} + 0.51 \frac{Ar^{1/3}}{Ar^{1/3} + 140} \quad (۱۵-۴)$$

$$Re_{circ.} = \frac{Ar}{12(0.065Ar + 1)^{\frac{1}{6}}} \quad (16-4)$$

$$f_{circ.} = 1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{d}{p1}\right)^{10}} \quad (17-4)$$

$$p1 = 1.63 \text{ mm} \quad (18-4)$$

$$\dot{K}_{HR} = \frac{3\left(\mu_l + \frac{\mu_d}{f_{circ.}}\right)}{2\mu_l + 3\frac{\mu_d}{f_{circ.}}} \quad (19-4)$$

$$Re_{sphere} = (1 - \dot{f}_{circ.})Re_{rigid} + \dot{f}_{circ.}Re_{circ.} \quad (20-4)$$

$$\dot{f}_{circ.} = 2(\dot{K}_{HR} - 1) \quad (21-4)$$

$$v_{sphere} = \frac{\mu_l Re_{sphere}}{d\rho_l} \quad (22-4)$$

$$v_{def} = \sqrt{\frac{dg\Delta\rho}{2\rho_l}} \quad (23-4)$$

$$v_{os} = \sqrt{\frac{7.52\sigma}{d\rho_l}} \quad (24-4)$$

$$v_{def,os} = (v_{def}^8 + v_{os}^8)^{\frac{1}{8}} \quad (25-4)$$

$$v_{sed} = \frac{v_{def,os}v_{sphere}}{(v_{def,os}^{2.98} + v_{sphere}^{2.98})^{1/2.98}} \quad (26-4)$$

بنابراین مقدار سرعت مورد نیاز در روابط (۹-۴)، (۱۰-۴)، (۱۱-۴) و (۱۳-۴) از رابطه (۲۶-۴)

بدست خواهد آمد.

همچنین زمان بی بعد و انتقال حرارت بی بعد نیز طبق روابط زیر تعریف می‌شوند:

$$t^* = \frac{t v_{sed}}{d} \quad (27-4)$$

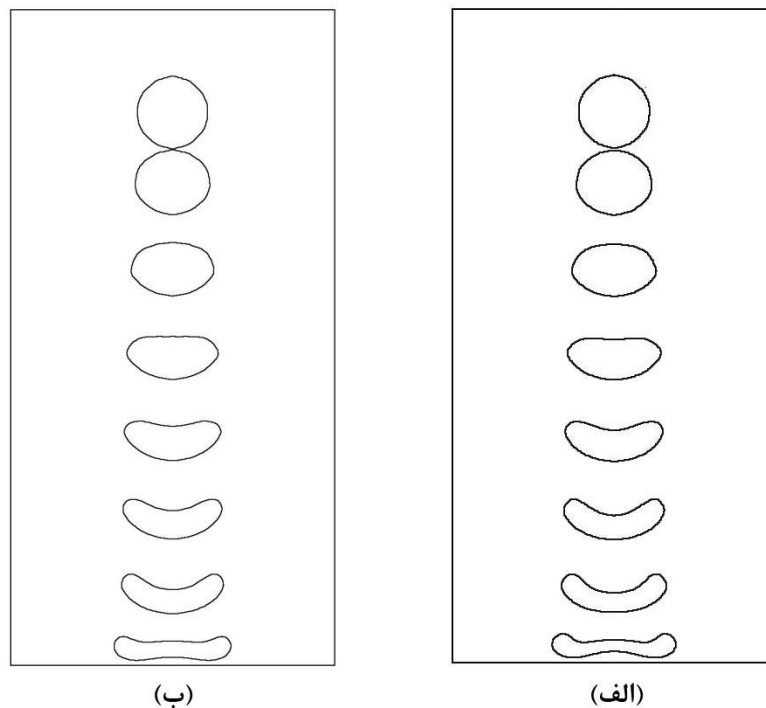
$$q^* = \frac{q}{q_{max}} \quad (28-4)$$

$$q_{max} = \frac{\rho_d \nabla_d C_{p,d} \Delta T}{d/v_{sed}} \quad (29-4)$$

در روابط فوق، t زمان سقوط قطره، q حرارت از دست داده شده توسط قطره داغ در طول سقوط، ∇_d حجم قطره، $C_{p,d}$ گرمای ویژه قطره و ΔT اختلاف دمای اولیه قطره و سیال محیطی است.

۳. صحنه گذاری انتخاب صحیح گروه های بی بعد مناسب:

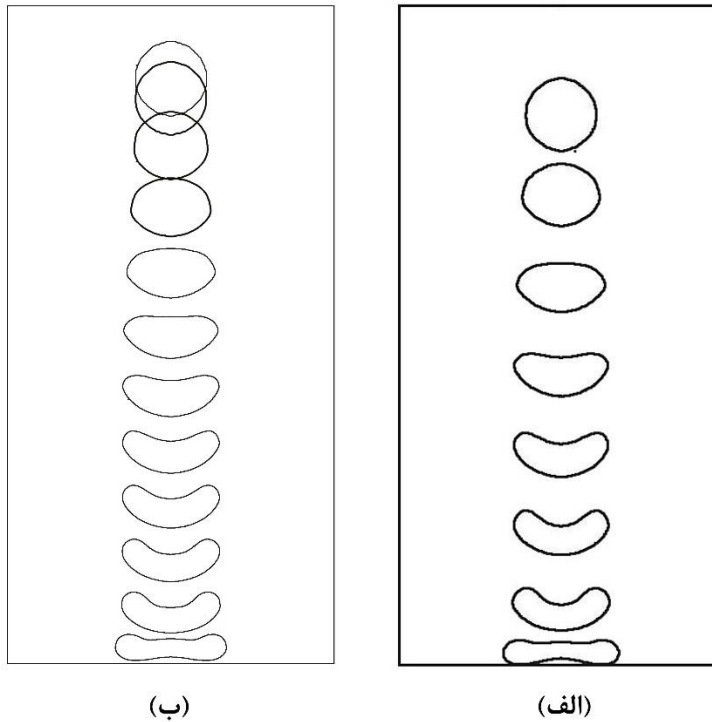
علیرغم اینکه انواع اعداد بی بعد مورد استفاده در مقالات بررسی گردیده و موارد مناسب طبق روابط ۹-۴ تا ۱۳-۴ انتخاب گردیدند، اما باز هم جهت اطمینان از صحت انتخاب این اعداد دو حل مختلف در دو شرایط نامساوی طوری انجام شدند که گروه بی بعد آنها یکسان باشد. این مسأله برای هر دو حالت بدون حرارت و با حرارت انجام شده و نتایج آن به شرح ذیل بدست آمد:



شکل ۴-۱ مقایسه دو حالت مختلف بدون حضور انتقال حرارت در اعداد بی بعد ثابت: $Re=50$, $We=50$, $Fr=0.6$ (جزئیات حل در جدول ۴-۲)

جدول ۲-۴ پارامترهای حل در دو حالت الف و ب برای اعداد بی بعد $Re=50, We=50, Fr=0.6$

حالت	ρ_l (kg/m ³)	ρ_d (kg/m ³)	g (m/s ²)	σ (N/m)	μ_l (kg/m.s)	μ_d (kg/m.s)	v_{sed} (m/s)	t (s)	t^* (1)
الف	260.8	450	319.1	2.397e-3	0.005	0.2499	0.4794	0.04	9.5
ب	318.7	550	8.546	7.844e-5	0.001	0.05	0.07844	0.2408	9.4



شکل ۲-۴ مقایسه دو حالت مختلف با حضور انتقال حرارت در اعداد بی بعد ثابت:

$Re=50, We=50, Fr=0.6, Ra=434167, Pe=4157$ (جزئیات حل در جدول ۳-۴)

جدول ۳-۴ پارامترهای حل در دو حالت الف و ب برای اعداد بی بعد زیر:

$(Re=50, We=50, Fr=0.6, Ra=434167, Pe=4157)$

حالت	ρ_l, ρ_d (kg/m ³)	g (m/s ²)	σ (N/m)	μ_l, μ_d (kg/m.s)	v_{sed} (m/s)	K (W/m.K)	C_p (J/Kg.K)	β (1/K)	t (s)	t^* (1)
الف	928.1, 1600	42.58	1.138e-3	0.005, 0.25	0.1751	7.083e-2	906	5.784e-3	0.115	10
ب	522, 900	5.383	8.093e-5	0.001, 0.05	0.06226	1.573e-2	906	5.784e-3	0.3328	10

همانطور که در شکل‌های ۱-۴ و ۲-۴ و نیز جداول ۲-۴ و ۳-۴ مشاهده می‌شود زمانیکه اعداد Re , We , Fr , Ra , Pe به عنوان اعداد بی بعد اصلی بین دو حالت یکسان باشند، با تغییر سایر پارامترها و خواص فیزیکی اما هم رژیم جریان سقوط قطره و هم، زمان بی بعد سقوط یکسان خواهند بود. بنابراین مشخص می‌گردد که گروه بی بعد در نظر گرفته شده (شامل Re , We , Fr , Ra , Pe , t^*) به طور صحیح انتخاب و تعریف گردیده‌اند.

۵. فصل پنجم: نتایج بررسی سقوط قطره در سیال نیوتنی بدون حضور

انتقال حرارت

همانطور که در فصل گذشته به تفصیل اشاره شد، اعداد بی بعد قابل بررسی در شرایط عدم حضور انتقال حرارت Re , We , Fr هستند. در این فصل اثر گذاری تغییر هر کدام از این اعداد بر رژیم سقوط قطره و همچنین زمان بی بعد سقوط، بررسی خواهد گردید.

با توجه به اینکه اثر تغییرات ۳ عدد بی بعد Re , We , Fr مد نظر می باشد، در هر مرحله، فقط یکی از این اعداد تغییر کرده و ۲ عدد دیگر ثابت نگه داشته می شوند.

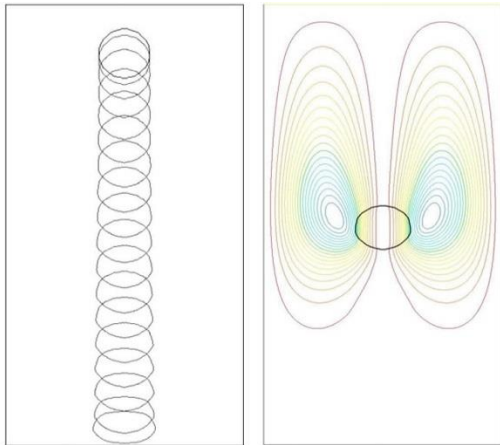
۱. اثر تغییرات عدد رینولدز:

در این قسمت، قطره در شرایطی با اعداد رینولدز ۱۵، ۳۵، ۵۰، ۶۵، ۸۵ و ۱۰۰ سقوط می نماید. این شرایط برای سه حالت مختلف عدد وبر (۵۰، ۲۰۰ و ۱۰۰۰) و سه حالت مختلف عدد فراد (۰/۶، ۱/۵ و ۵) بررسی شده است.

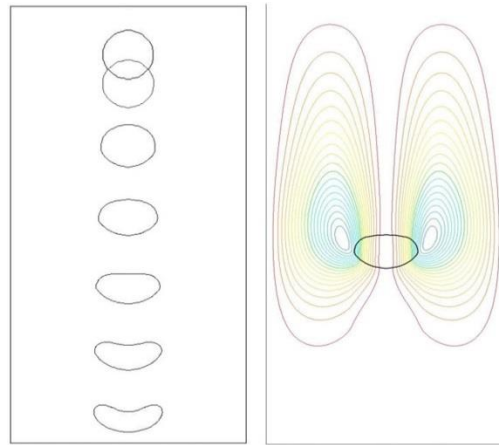
شکل های ۱-۵ تا ۶-۵ نحوه تغییر شکل قطره در حین سقوط و خطوط جریان در اعداد رینولدز مختلف را نشان می دهند. که در شکل های ۱-۵ تا ۳-۵ اعداد وبر ۵۰، ۲۰۰ و ۱۰۰ بوده و در هر سه حالت عدد فراد برابر با ۰/۶ می باشد. همچنین در شکل های ۴-۵ تا ۶-۵ اعداد فراد ۰/۶، ۱/۵ و ۵ بوده و در هر سه حالت عدد وبر برابر با ۵۰ می باشد.

همانطور که از شکل ها مشخص می باشد، با افزایش عدد رینولدز، کشیدگی قطره در حین سقوط بیشتر می گردد. چنانکه در رینولدز ۱۵ و حتی ۳۵ قطره در انتهای زمان سقوط و در پایین کانال از حالت کروی به بیضوی تبدیل گشته اما در رینولدزهای بالاتر این تغییر شکل بیشتر شده و به حالت کشیده تری تبدیل می گردد تا جاییکه حتی باعث ایجاد جدایش و گسیختگی در قطره می گردد.

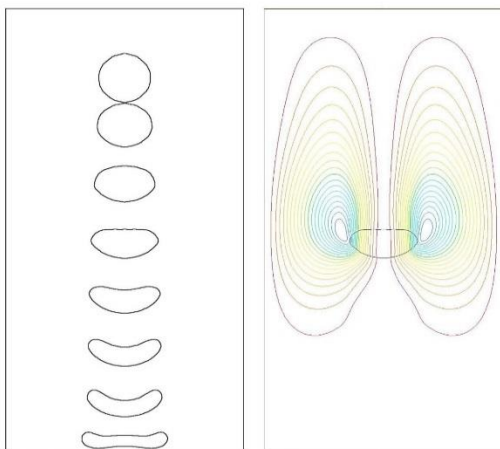
همچنین طبیعی است که با افزایش عدد رینولدز و یا به عبارتی کاهش نیروی ویسکوز، تراکم خطوط جریان اندکی کمتر می گردد زیرا نفوذ سرعت به لایه های مجاور به دلیل کاهش ویسکوزیته راحت تر صورت می گیرد.



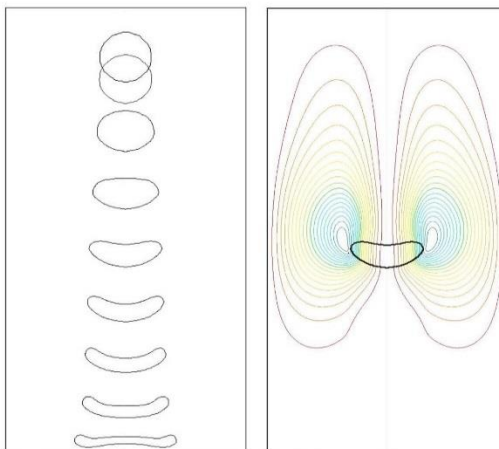
Re15 Falling Pattern and Stream Functions



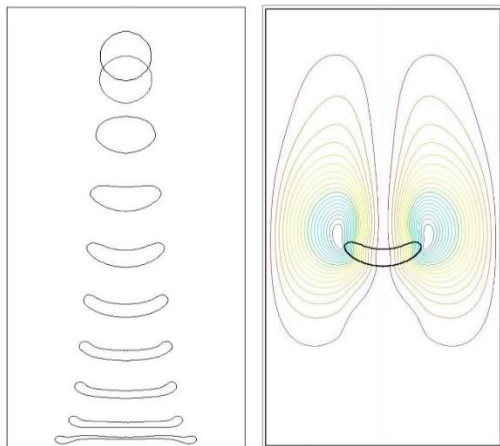
Re35 Falling Pattern and Stream Functions



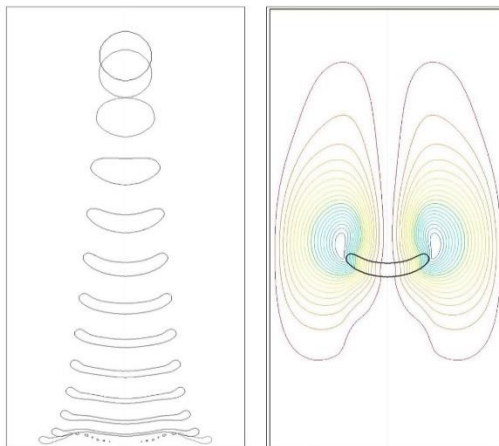
Re50 Falling Pattern and Stream Functions



Re65 Falling Pattern and Stream Functions

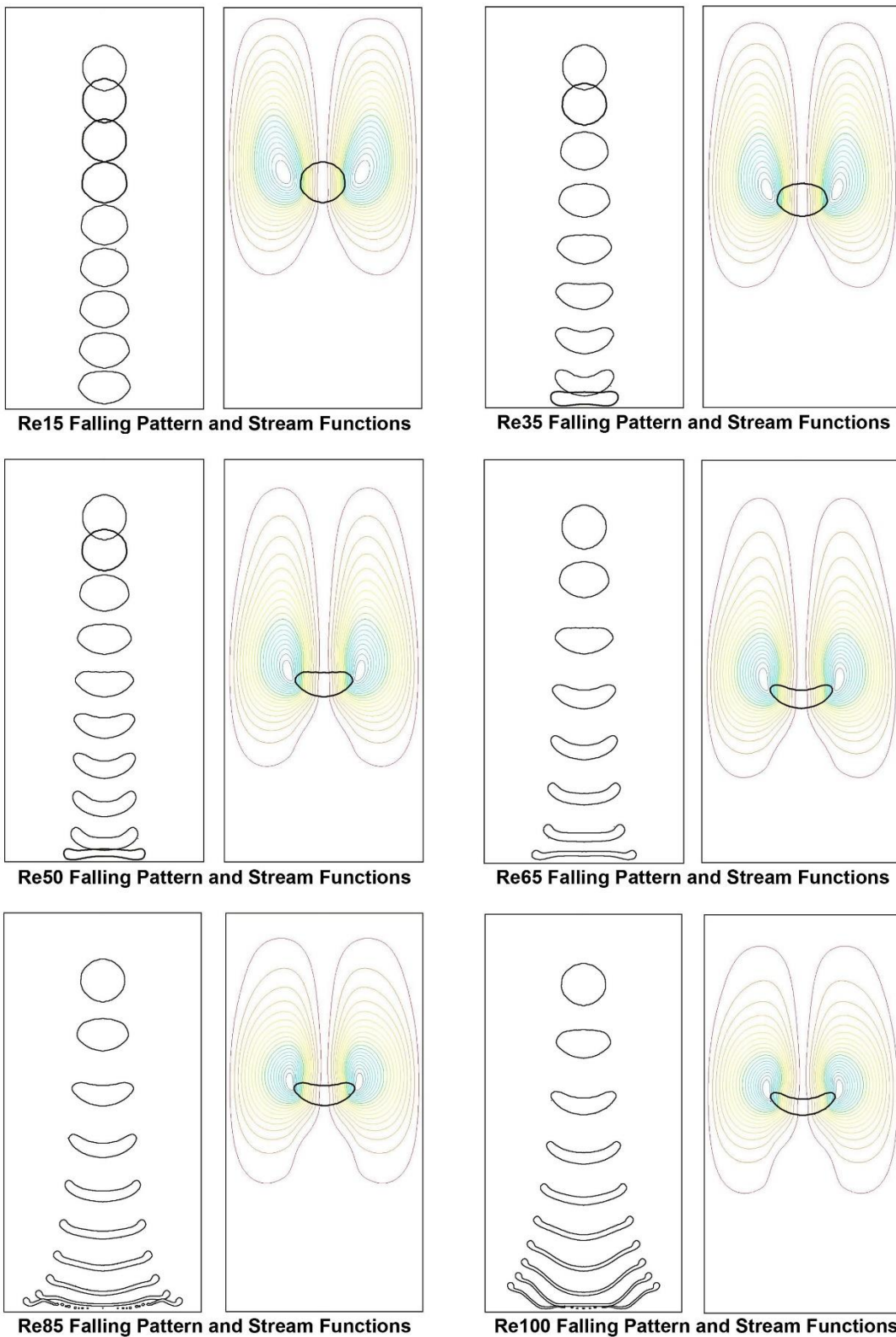


Re85 Falling Pattern and Stream Functions

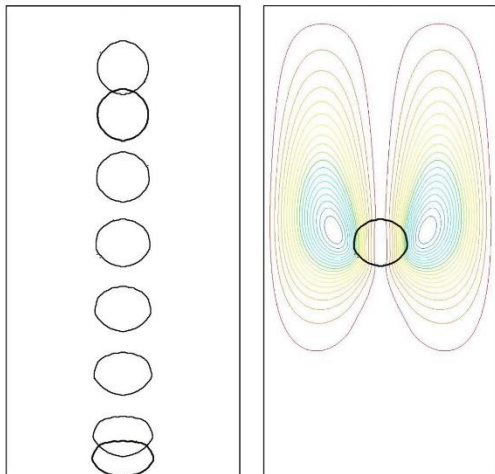


Re100 Falling Pattern and Stream Functions

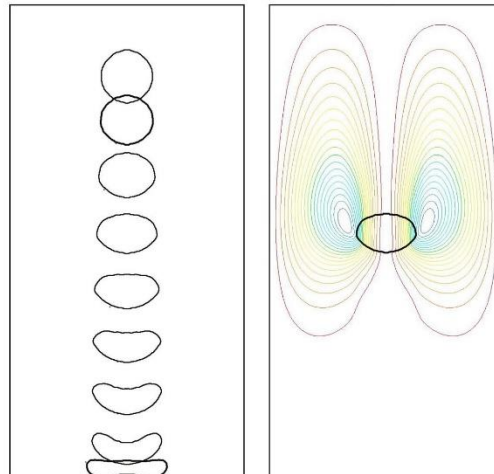
شکل ۵-۱ نحوه تغییر شکل قطره در حین سقوط و خطوط جریان در اعداد رینولدز مختلف و در شرایط We_{50}



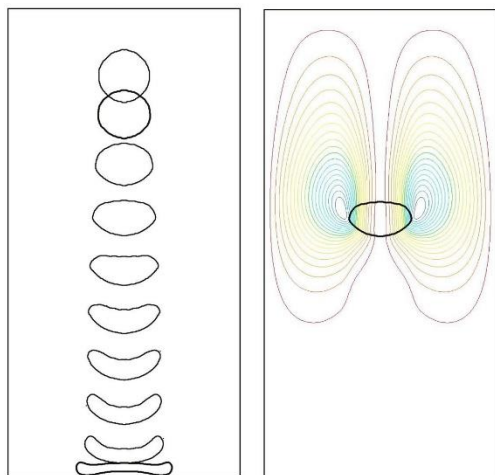
شکل ۵-۲ نحوه تغییر شکل قطره در حین سقوط و خطوط جریان در اعداد رینولدز مختلف و در شرایط We200



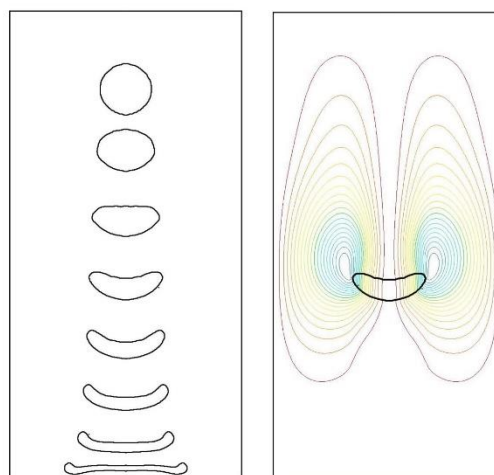
Re15 Falling Pattern and Stream Functions



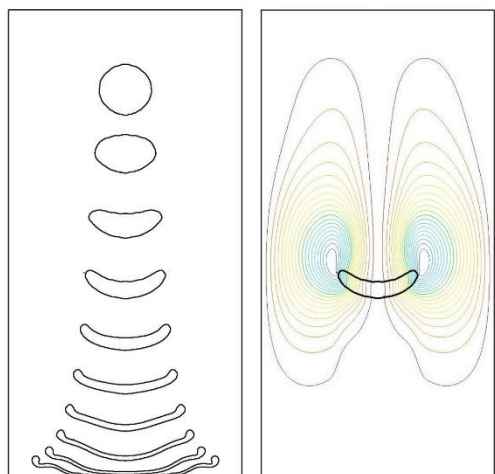
Re35 Falling Pattern and Stream Functions



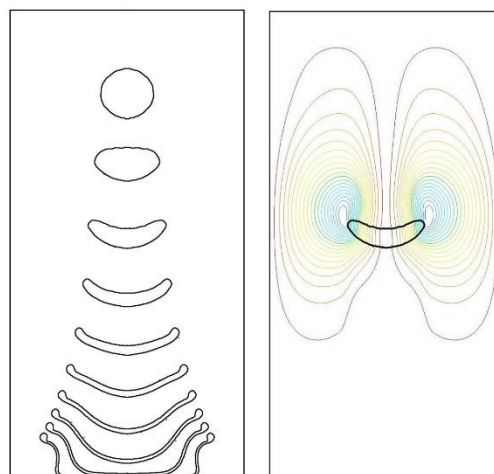
Re50 Falling Pattern and Stream Functions



Re65 Falling Pattern and Stream Functions

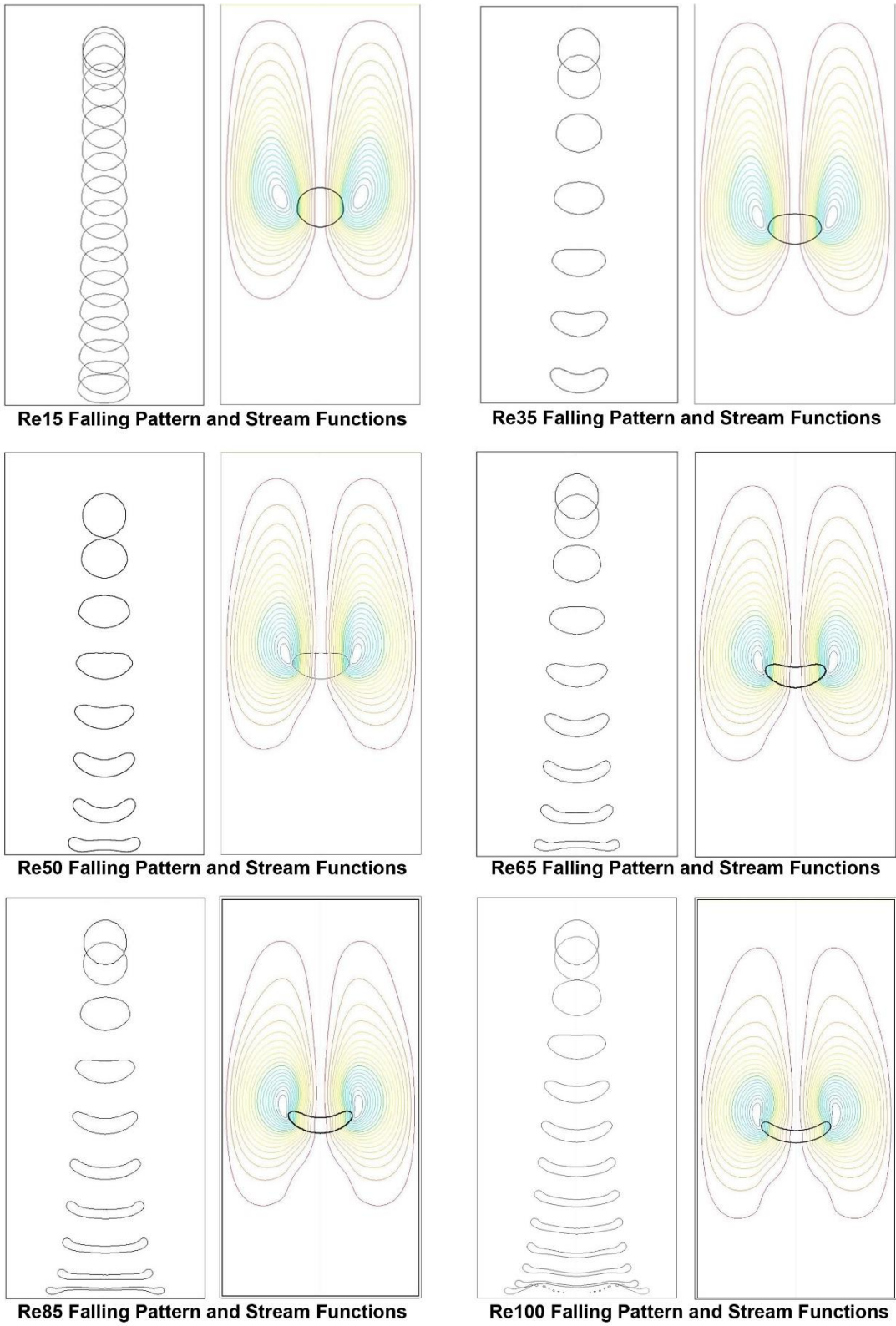


Re85 Falling Pattern and Stream Functions

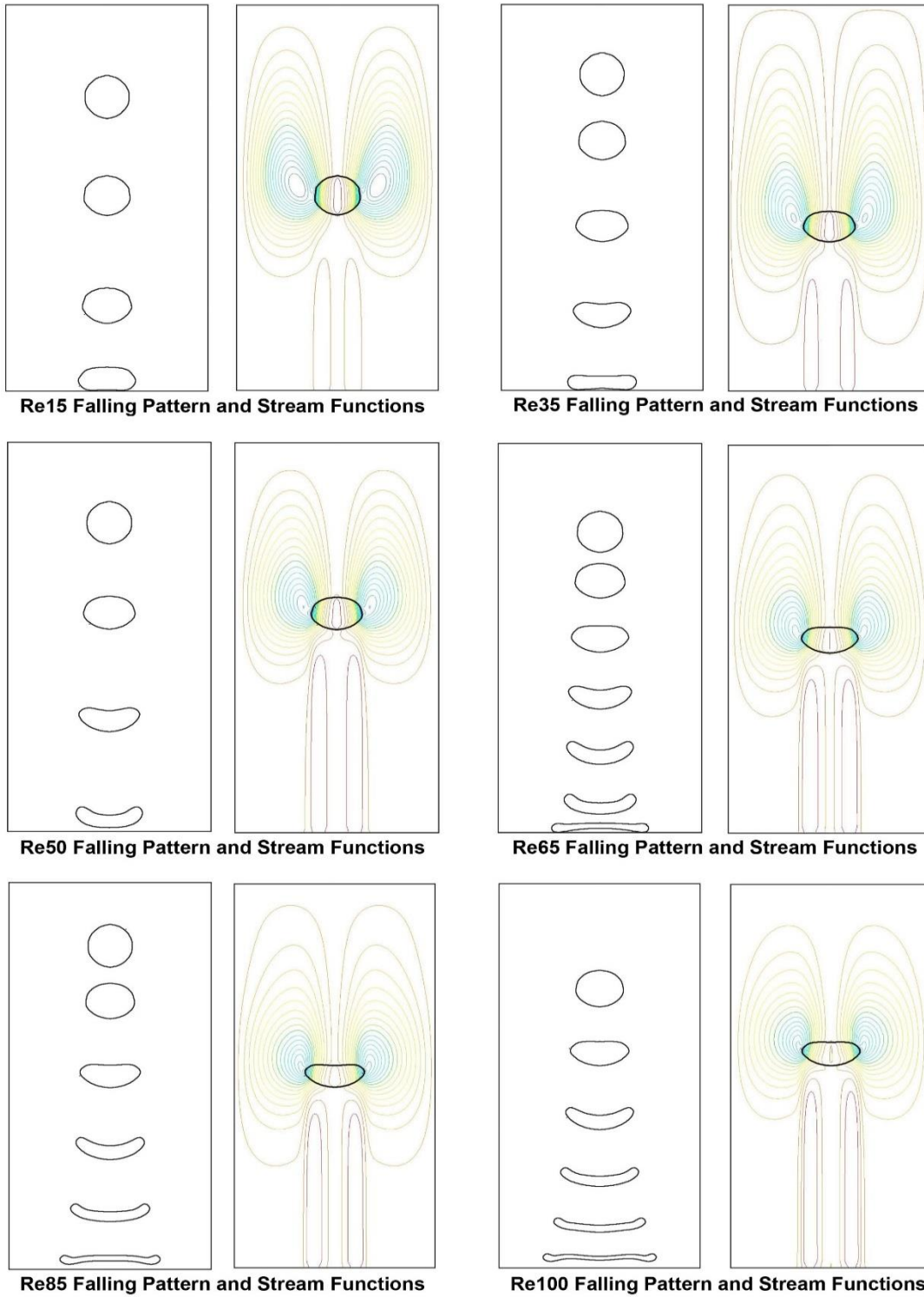


Re100 Falling Pattern and Stream Functions

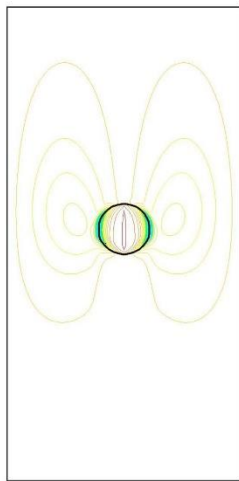
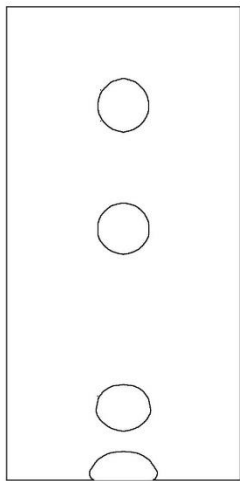
شکل ۵-۳ نحوه تغییر شکل قطره در حین سقوط و خطوط جریان در اعداد رینولدز مختلف و در شرایط $We1000$



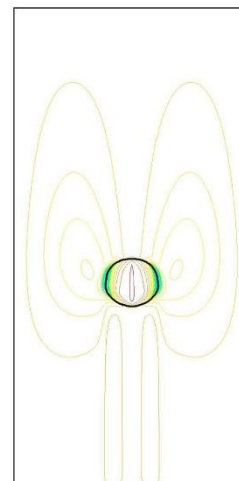
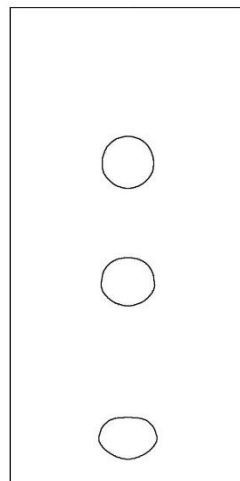
شکل ۴-۵ نحوه تغییر شکل قطره در حین سقوط و خطوط جریان در اعداد رینولدز مختلف و در شرایط Fr0.6



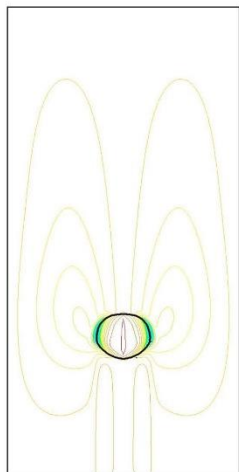
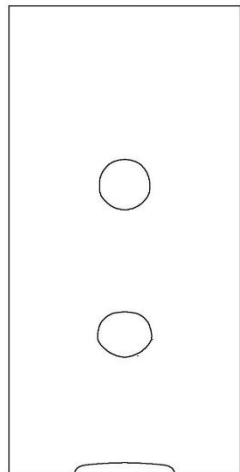
شکل ۵-۵ نحوه تغییر شکل قطره در حین سقوط و خطوط جریان در اعداد رینولدز مختلف و در شرایط $Fr=1.5$



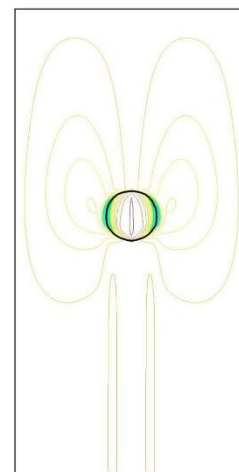
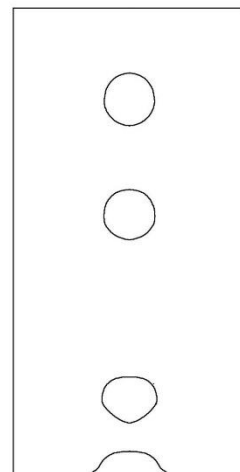
Re15 Falling Pattern and Stream Functions



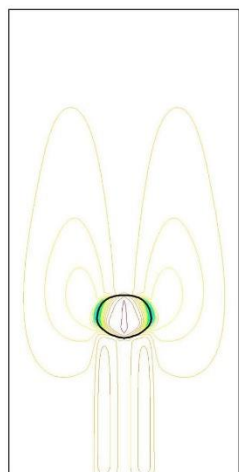
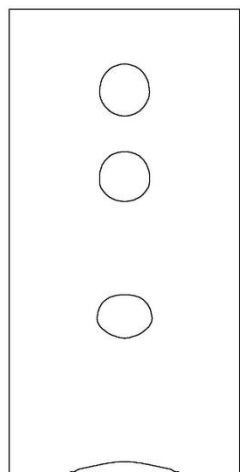
Re35 Falling Pattern and Stream Functions



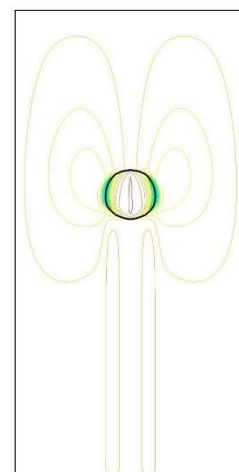
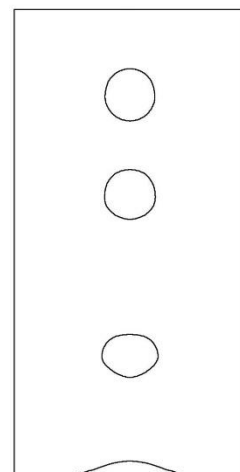
Re50 Falling Pattern and Stream Functions



Re65 Falling Pattern and Stream Functions



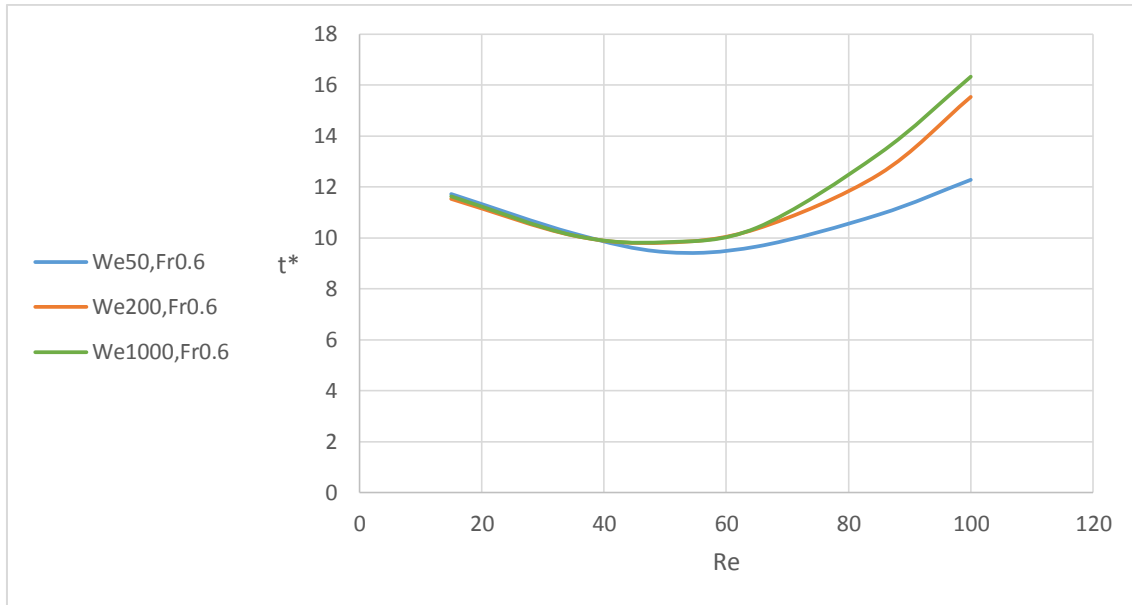
Re85 Falling Pattern and Stream Functions



Re100 Falling Pattern and Stream Functions

شکل ۵-۶ نحوه تغییر شکل قطره در حین سقوط و خطوط جریان در اعداد رینولدز مختلف و در شرایط Fr5

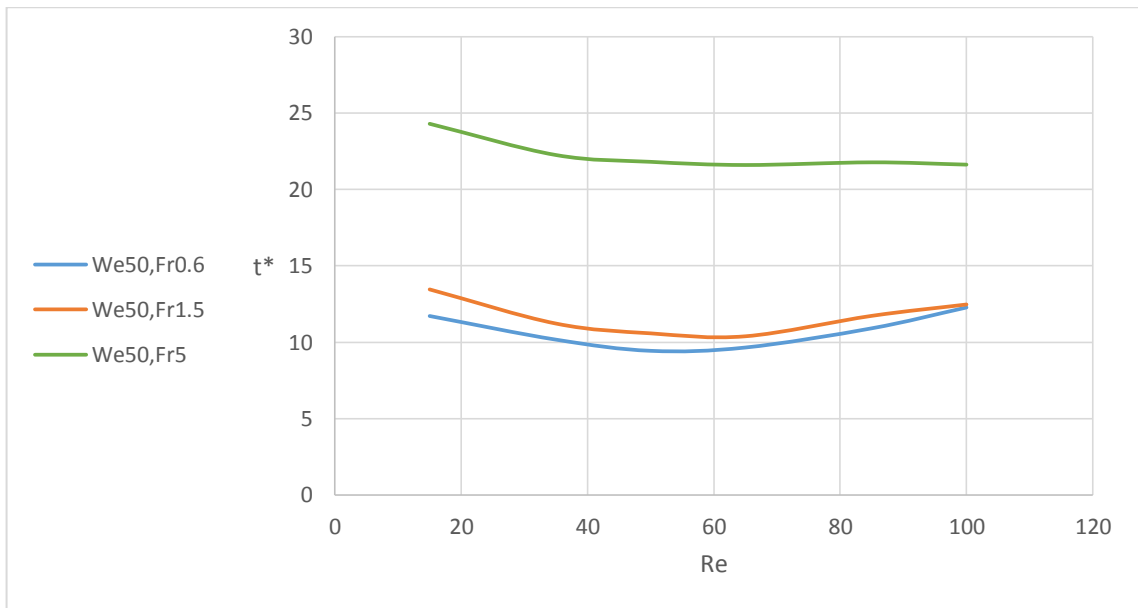
در این قسمت، اثر تغییر عدد رینولدز بر زمان سقوط بی بعد قطره در قالب منحنی آورده شده است. بررسی دقیق این منحنی‌ها اطلاعات جالب توجهی را بدست می‌دهد.



شکل ۵-۷ تأثیر تغییر عدد رینولدز بر زمان سقوط بی بعد در اعداد وبر مختلف و فراد ۰/۶

همانطور که از شکل‌های ۵-۷ و ۵-۸ مشاهده می‌شود رینولدز ۵۰ تقریباً مرزی برای تغییر جزئی رفتار سقوط قطره می‌باشد؛ چرا که در رینولدزهای کمتر از ۵۰ تغییر عدد وبر تأثیری بر زمان سقوط ندارد و همانطور که در شکل ۵-۷ مشاهده می‌شود در این بازه، هر ۳ منحنی بر یکدیگر منطبق هستند. در حالیکه برای رینولدزهای بالاتر این حالت صادق نیست.

همچنین در رینولدزهای زیر ۵۰، با افزایش عدد رینولدز زمان سقوط کاهش پیدا می‌کند که این امر به دلیل کاهش نیروهای ویسکوز منطقی به نظر می‌رسد اما در رینولدزهای بالاتر از ۵۰، با افزایش عدد رینولدز افزایش زمان سقوط مشاهده گردیده است. دلیل این امر کشیدگی قطره در حین سقوط و افزایش نیروی درگ می‌باشد. دقیقاً به دلیل همین کشیدگی قطره است که تغییر عدد وبر و تأثیر آن بر گسیخته شدن قطره نیز بر زمان سقوط اثر گذار شده است.



شکل ۵-۸ تأثیر تغییر عدد رینولدز بر زمان سقوط بی بعد در اعداد فراد مختلف و وبر ۵۰

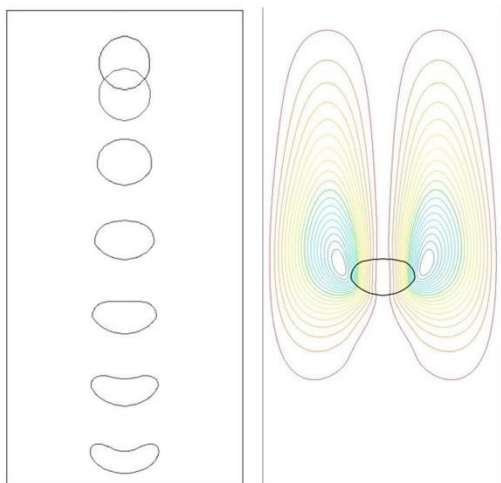
همانطور که از شکل ۵-۸ مشاهده می‌گردد، تأثیر عدد رینولدز در فرادهای بالاتر و علی‌الخصوص در رینولدزهای بزرگتر از ۵۰ بر زمان بی بعد سقوط قطره تقریباً ناچیز می‌باشد. به عبارتی در رینولدزهای بیشتر از ۵۰ و فرادهای بزرگتر یا مساوی با ۵ زمان بی بعد سقوط قطره تنها به اعداد فراد و وبر وابسته خواهد بود.

۲. اثر تغییرات عدد وبر:

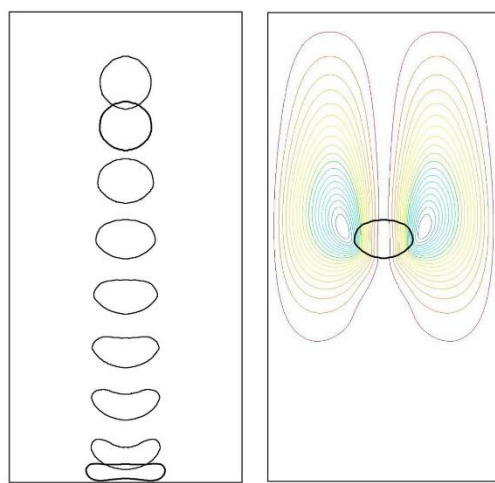
در این قسمت، قطره در شرایطی با اعداد وبر ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰ و ۱۰۰۰ سقوط می‌نماید. این شرایط برای سه حالت مختلف عدد رینولدز (۳۵، ۸۵ و ۱۰۰) و سه حالت مختلف عدد فراد (۰/۶، ۱/۵ و ۵) بررسی شده است.

شکل‌های ۹-۵ تا ۱۴-۵ نحوه تغییر شکل قطره در حین سقوط و خطوط جریان در اعداد وبر مختلف را نشان می‌دهند. که در شکل‌های ۹-۵ تا ۱۱-۵ اعداد رینولدز ۳۵، ۸۵ و ۱۰۰ بوده و در هر سه حالت عدد فراد برابر با ۰/۶ می‌باشد. همچنین در شکل‌های ۱۲-۵ تا ۱۴-۵ اعداد فراد ۰/۶، ۱/۵ و ۵ بوده و در هر سه حالت عدد رینولدز برابر با ۱۰۰ می‌باشد.

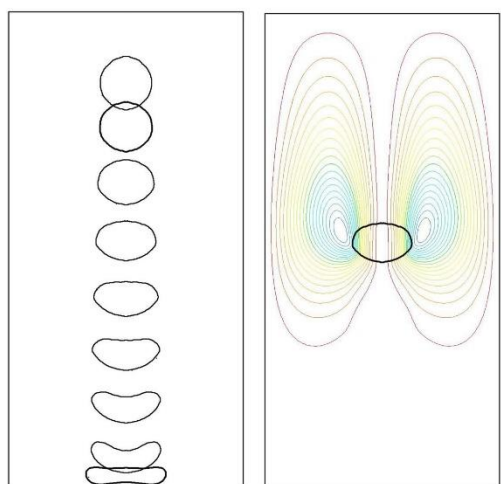
همانطور که از شکل‌ها مشخص می‌باشد، تغییر عدد وبر تأثیر واضحی بر خطوط جریان و نحوه کشیدگی قطره در حین سقوط ندارد بلکه با افزایش عدد وبر و یا به عبارتی کاهش کشش سطحی بین دو فاز، مقاومت قطره در برابر جدایش و گسیختگی بیشتر می‌گردد. چنانکه در وبر ۵۰ و ۱۰۰ قطره در انتهای زمان سقوط و در پایین کانال دچار جدایش و گسیختگی شده اما این حالت برای وبر ۱۰۰۰ اتفاق نیفتاده است. (شکل ۵-۱۱)



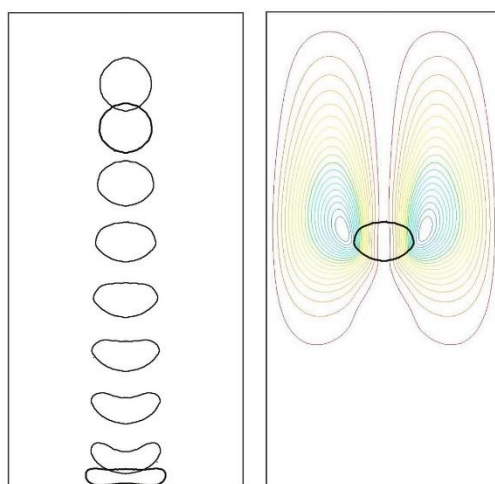
We50 Falling Pattern and Stream Functions



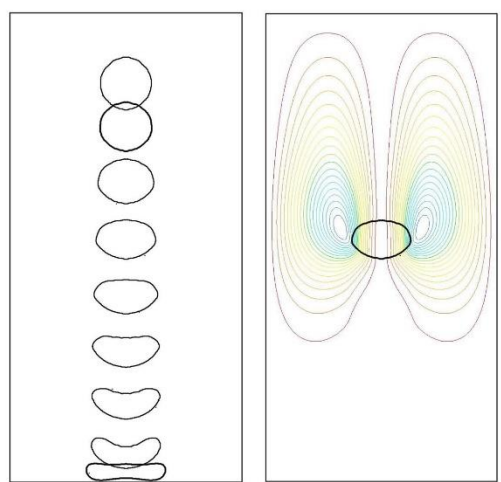
We100 Falling Pattern and Stream Functions



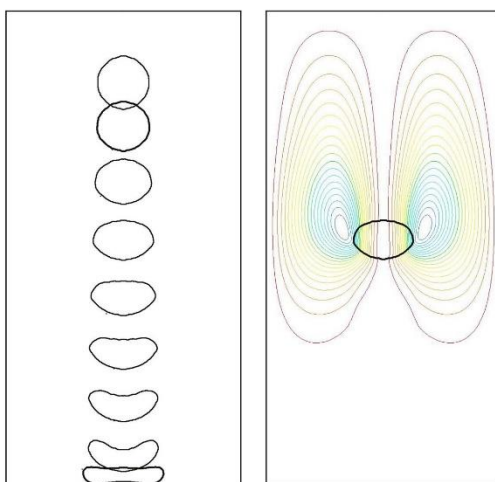
We150 Falling Pattern and Stream Functions



We200 Falling Pattern and Stream Functions

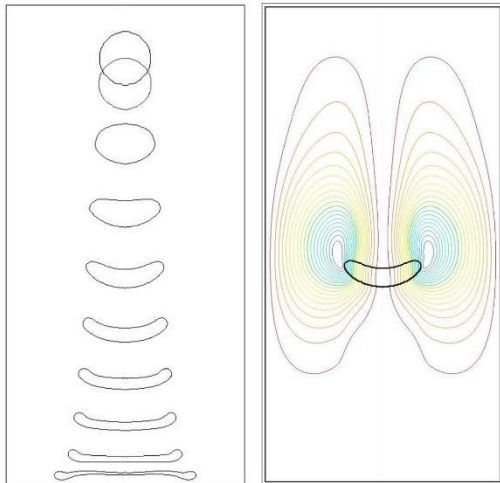


We250 Falling Pattern and Stream Functions

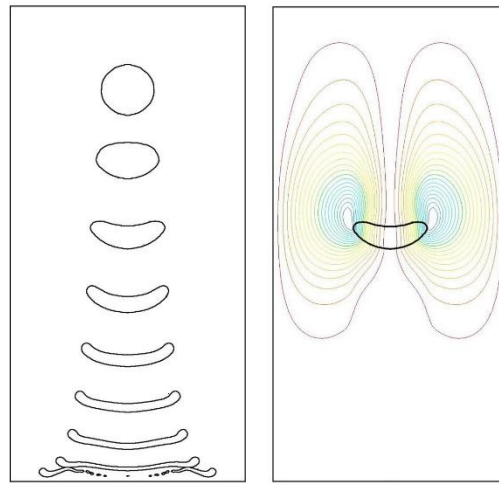


We1000 Falling Pattern and Stream Functions

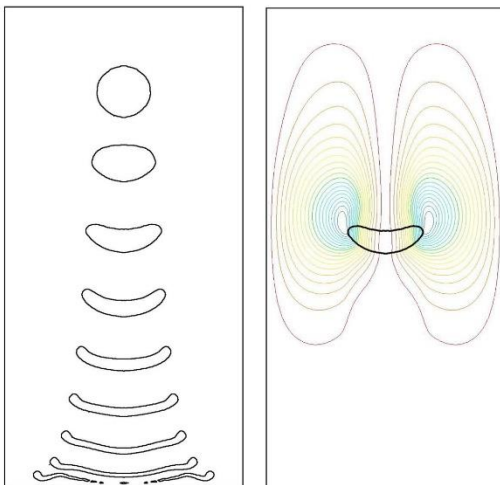
شکل ۵-۹ نحوه تغییر شکل قطره در حین سقوط و خطوط جریان در اعداد وبر مختلف و در شرایط $Re=35$



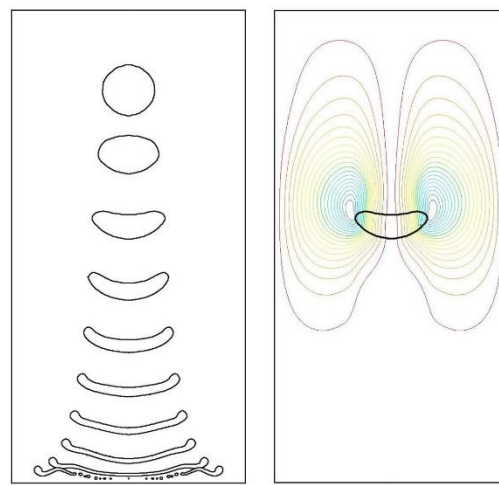
We50 Falling Pattern and Stream Functions



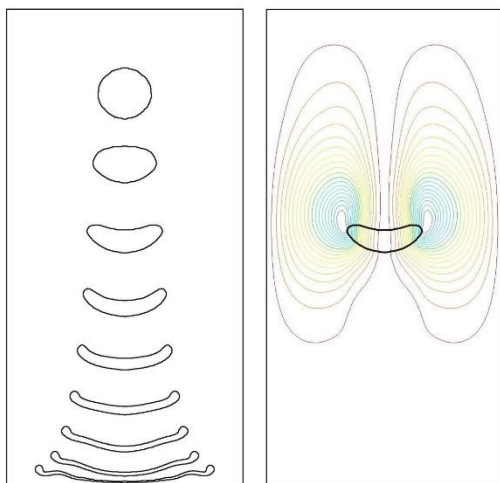
We100 Falling Pattern and Stream Functions



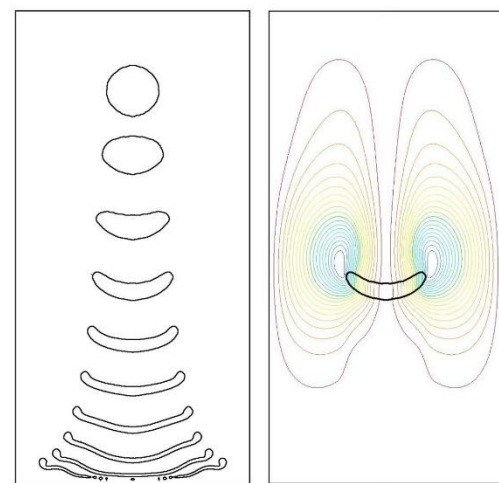
We150 Falling Pattern and Stream Functions



We200 Falling Pattern and Stream Functions

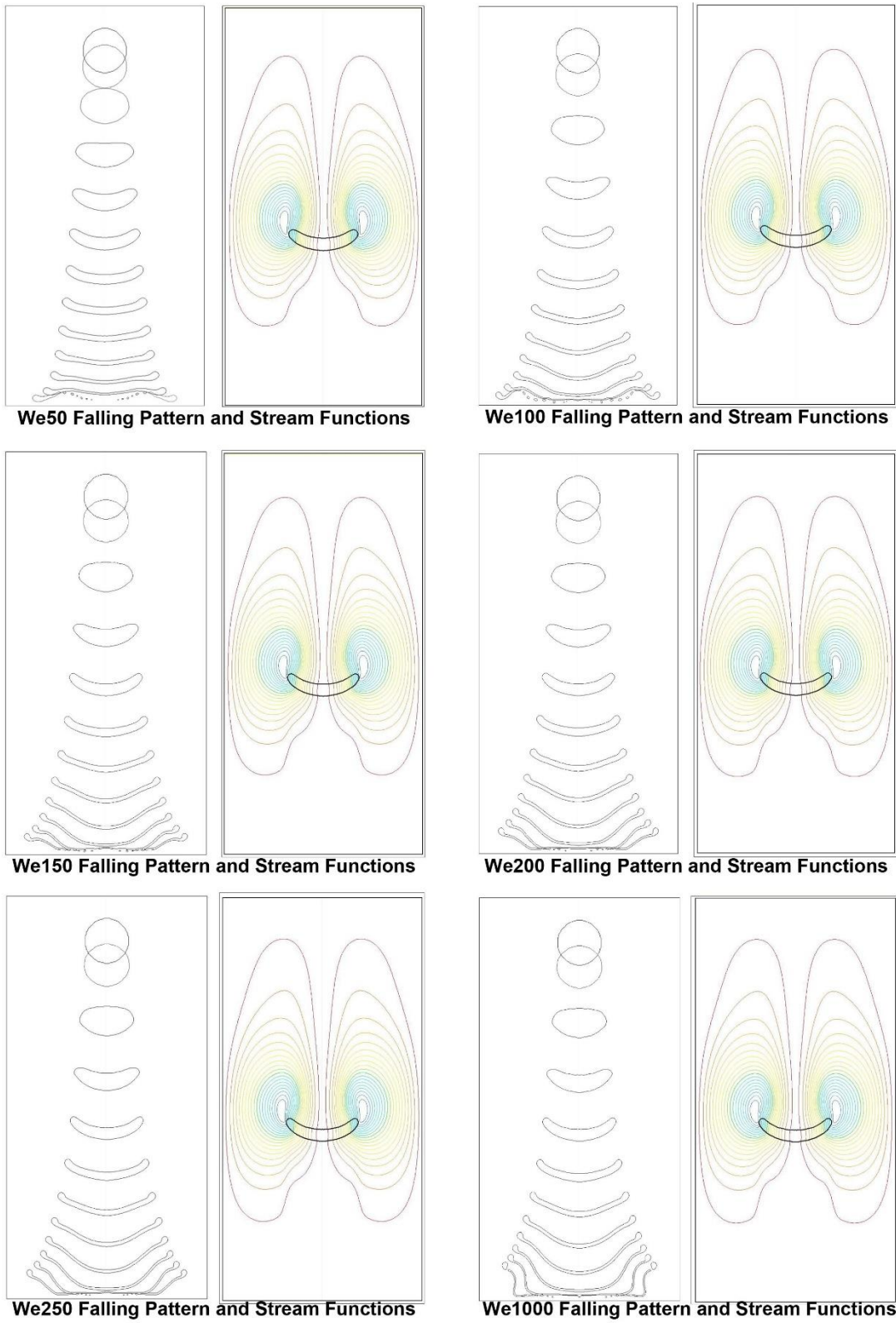


We250 Falling Pattern and Stream Functions

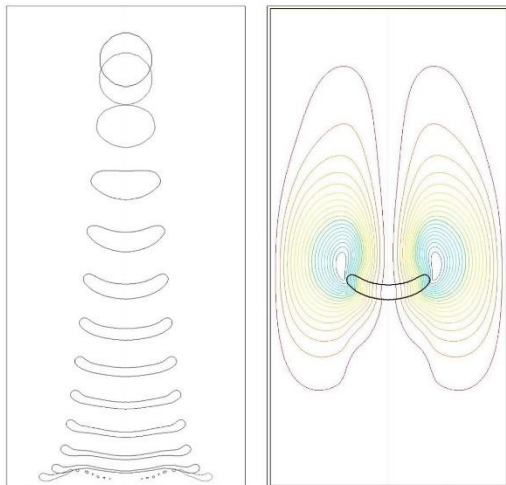


We1000 Falling Pattern and Stream Functions

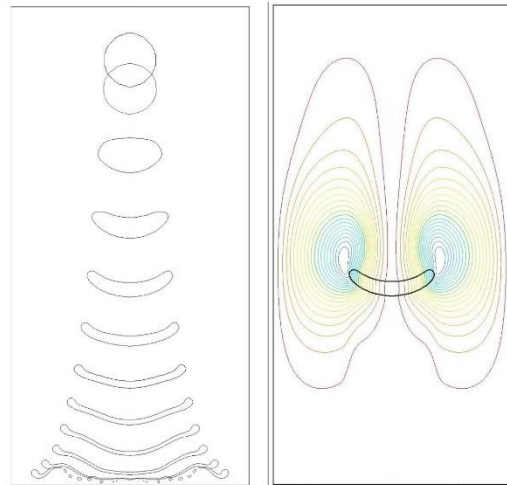
شکل ۵-۱۰ نحوه تغییر شکل قطره در حین سقوط و خطوط جریان در اعداد وبر مختلف و در شرایط $Re=85$



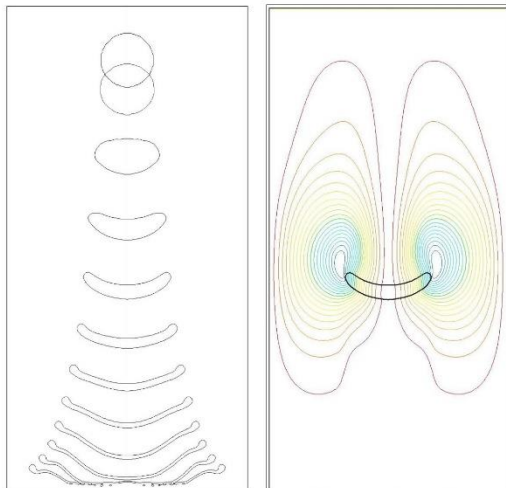
شکل ۵-۱۱ نحوه تغییر شکل قطره در حین سقوط و خطوط جریان در اعداد وبر مختلف و در شرایط $Re=100$



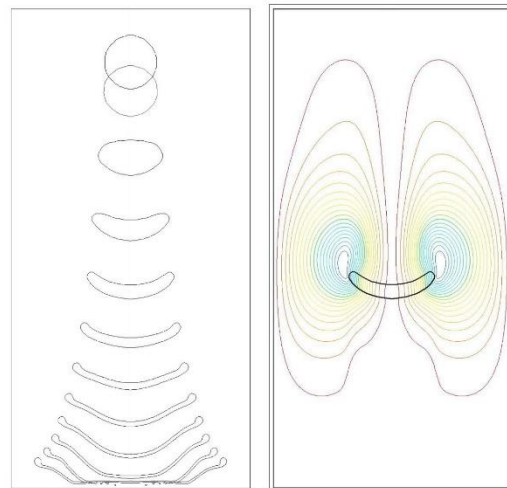
We50 Falling Pattern and Stream Functions



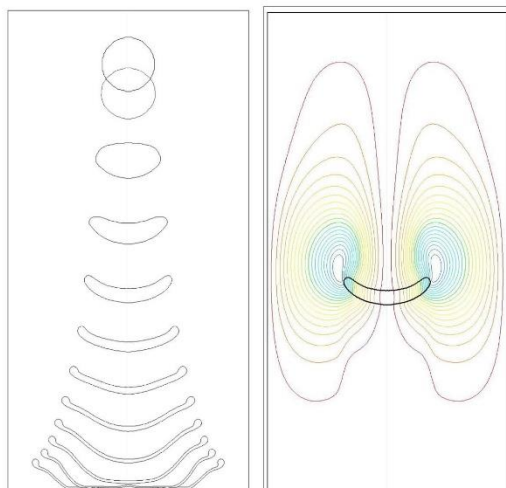
We100 Falling Pattern and Stream Functions



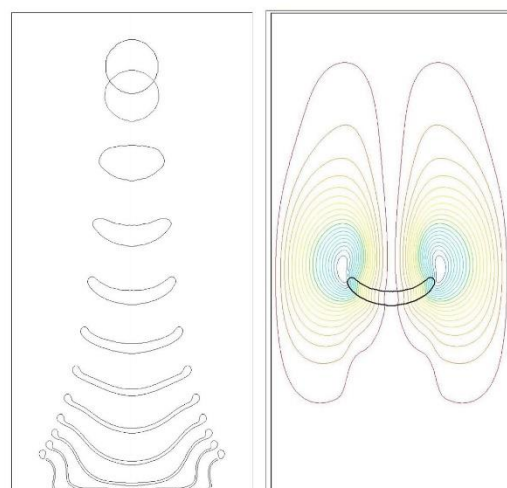
We150 Falling Pattern and Stream Functions



We200 Falling Pattern and Stream Functions

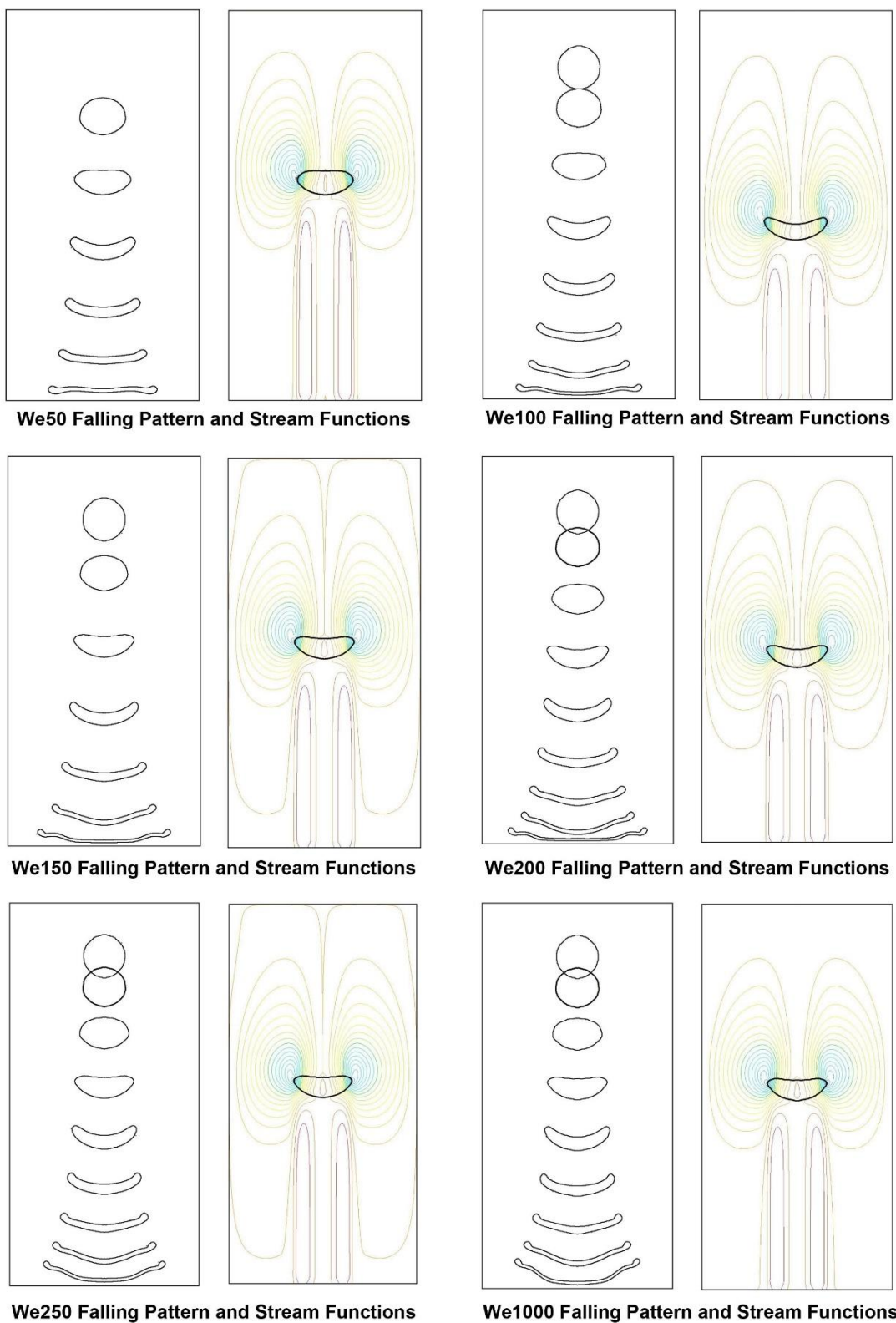


We250 Falling Pattern and Stream Functions

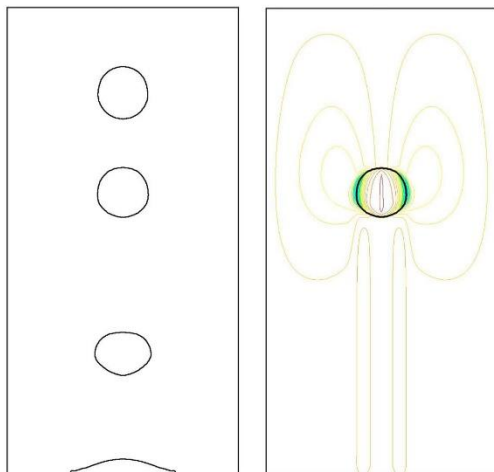


We1000 Falling Pattern and Stream Functions

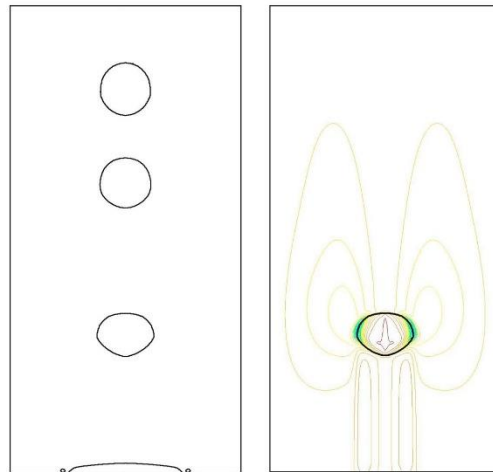
شکل ۵-۱۲ نحوه تغییر شکل قطره در حین سقوط و خطوط جریان در اعداد وبر مختلف و در شرایط $Fr=0.6$



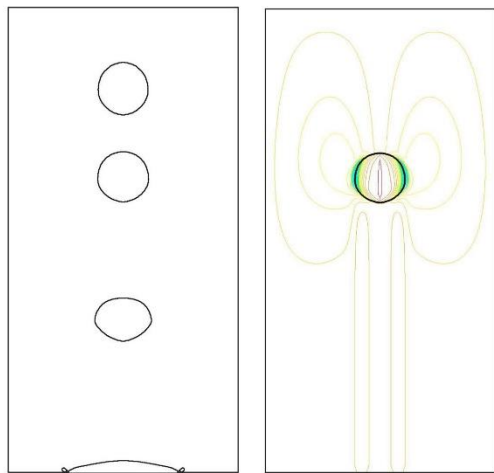
شکل ۵-۱۳ نحوه تغییر شکل قطره در حین سقوط و خطوط جریان در اعداد وبر مختلف و در شرایط $Fr=1.5$



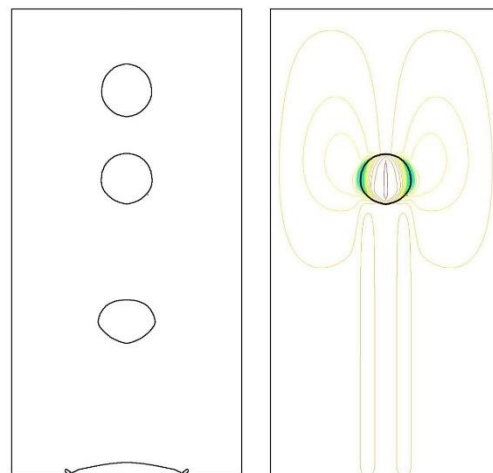
We50 Falling Pattern and Stream Functions



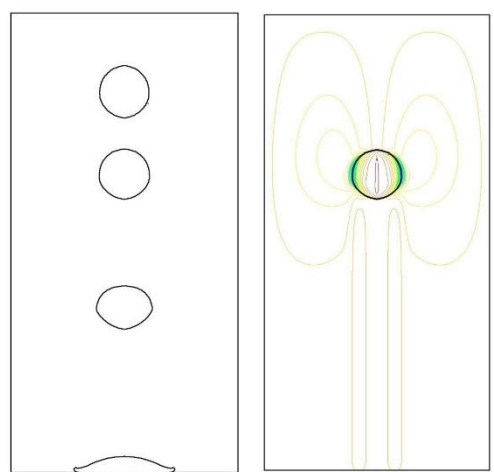
We100 Falling Pattern and Stream Functions



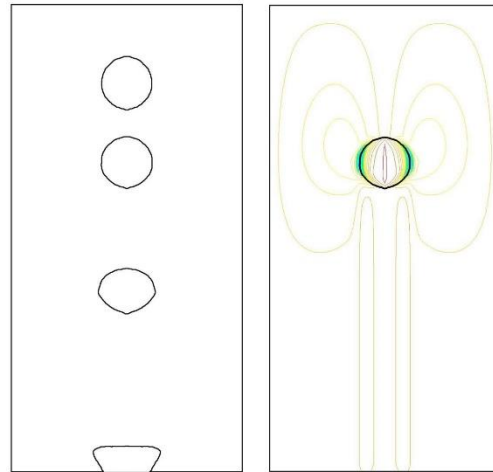
We150 Falling Pattern and Stream Functions



We200 Falling Pattern and Stream Functions



We250 Falling Pattern and Stream Functions

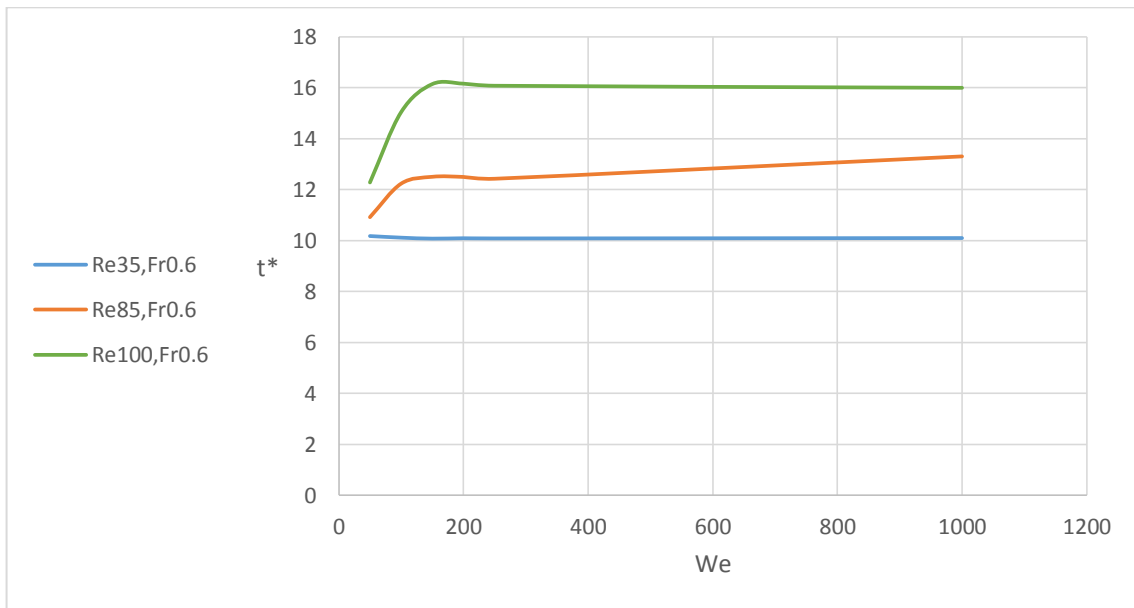


We1000 Falling Pattern and Stream Functions

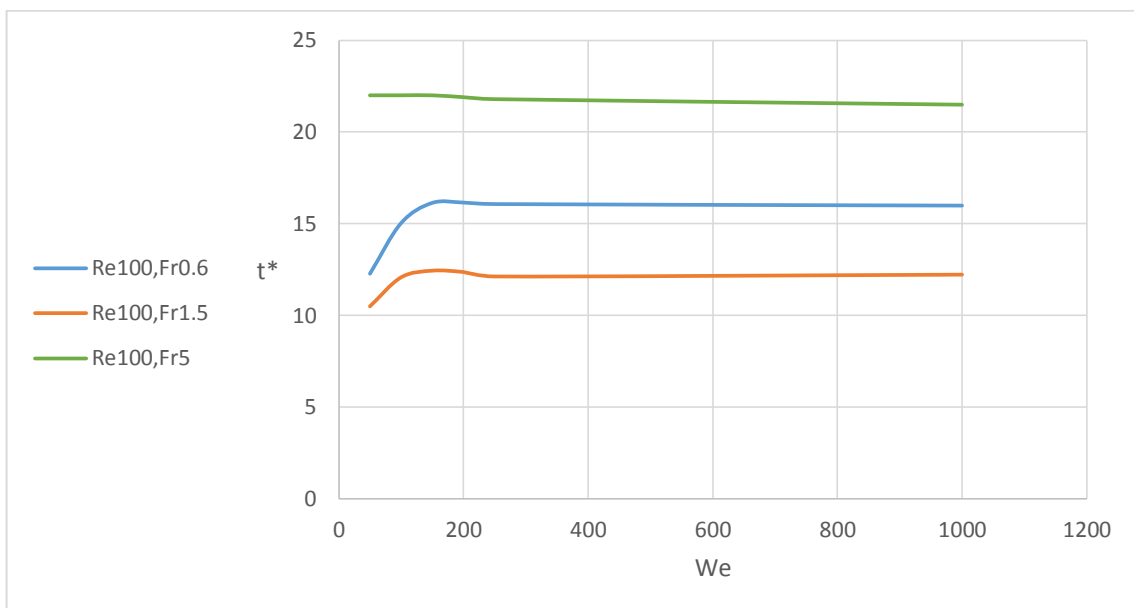
شکل ۵-۱۴ نحوه تغییر شکل قطره در حین سقوط و خطوط جریان در اعداد وبر مختلف و در شرایط Fr_5

در این قسمت، اثر تغییر عدد وبر بر زمان سقوط بی بعد قطره در قالب منحنی آورده شده

است.



شکل ۵-۱۵ تأثیر تغییر عدد وبر بر زمان سقوط بی بعد در اعداد رینولدز مختلف و فراد ۰/۶



شکل ۵-۱۶ تأثیر تغییر عدد وبر بر زمان سقوط بی بعد در اعداد فراد مختلف و رینولدز ۱۰۰

با توجه به شکل‌های ۵-۱۵ و ۵-۱۶ برای وبرهای بیشتر از ۲۰۰، زمان سقوط قطره تقریباً مستقل از عدد وبر خواهد بود. این در حالی است که برای رینولدزهای خیلی کم و یا فرادهای خیلی زیاد نیز در کل بازه تغییر وبر، زمان سقوط مستقل از عدد وبر است. چرا که در این ۲ حالت ویسکوزیته و شتاب گرانش هستند که بر روی رژیم جریان و در پی آن زمان سقوط تأثیر غالب را می‌گذارند و نیز در این حالت‌ها کشیدگی قطره آنقدر کم است که نقش کشش سطحی برای گسیخته شدن قطره بسیار کم رنگ می‌گردد.

دلیل افزایش زمان سقوط قطره با افزایش عدد وبر (البته در اعداد وبر کمتر از ۲۰۰) را نیز اینگونه می‌توان بیان نمود که با افزایش وبر و در نتیجه کاهش کشش سطحی، به دلیل بیشتر کشیدن شدن قطره و گسیخته نشدن آن، نیروی درگ بیشتر شده و سقوط را طولانی تر می‌نماید.

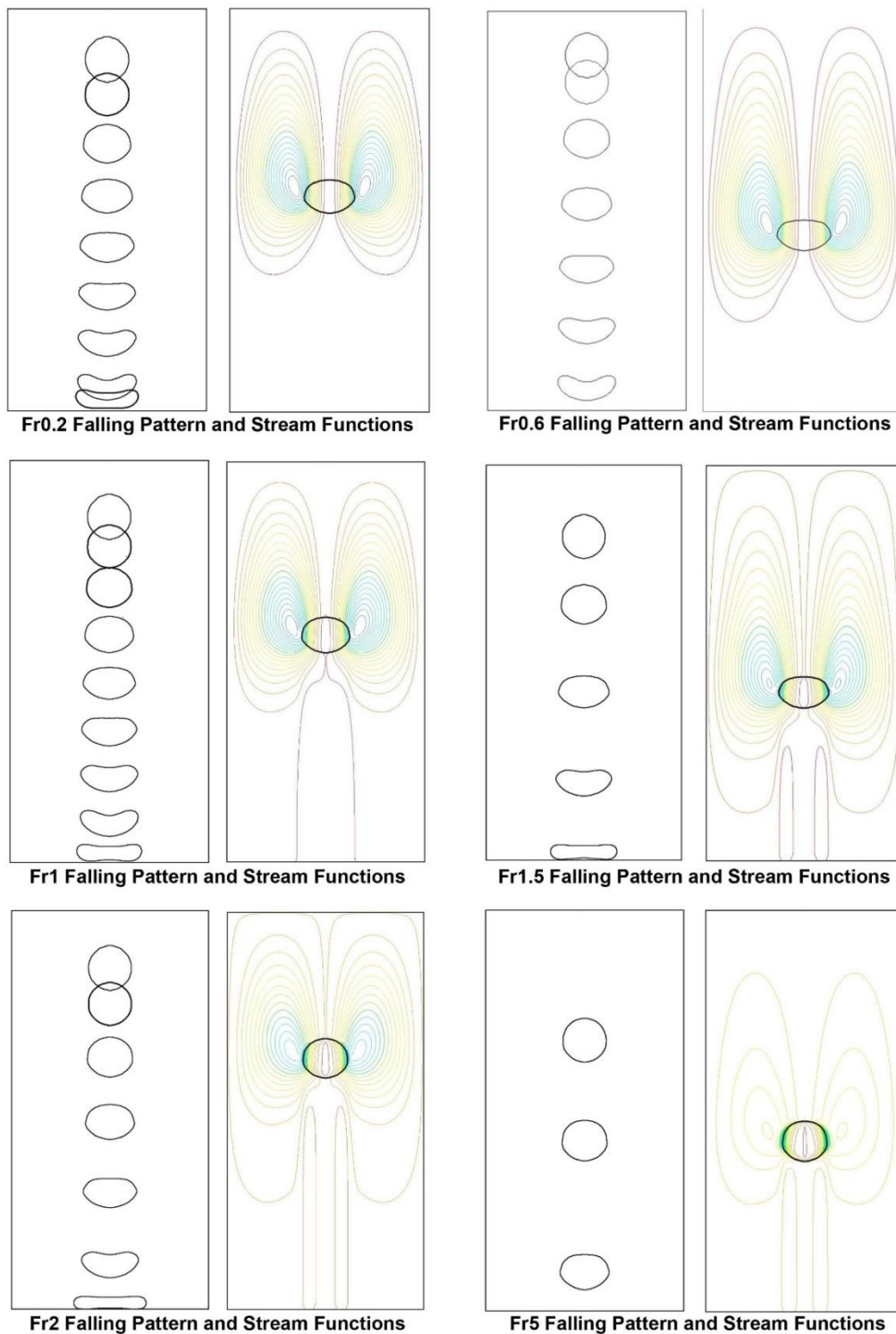
۳. اثر تغییرات عدد فراد:

در این قسمت، قطره در شرایطی با اعداد فراد 0.2 ، 0.6 ، 1 ، 1.5 ، 2 و 5 سقوط می‌نماید. این شرایط برای سه حالت مختلف عدد رینولدز (35 ، 85 و 100) و سه حالت مختلف عدد وبر (50 ، 200 و 1000) بررسی شده است. شکل‌های ۵-۱۷ تا ۵-۲۲ نحوه تغییر شکل قطره در حین سقوط و خطوط جریان در اعداد فراد مختلف را نشان می‌دهند. که در شکل‌های ۵-۱۷ تا ۵-۱۹ اعداد رینولدز 35 ، 85 و 100 بوده و در هر سه حالت عدد وبر برابر با 50 می‌باشد. همچنین در شکل‌های ۵-۲۰ تا ۵-۲۲ اعداد وبر 50 ، 200 و 1000 بوده و در هر سه حالت عدد رینولدز برابر با 100 می‌باشد.

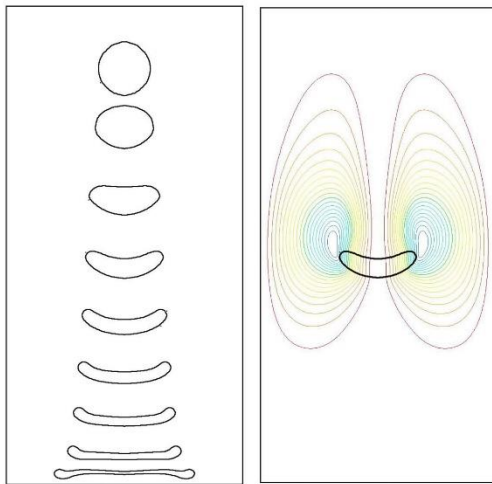
همانطور که از شکل‌ها مشخص می‌باشد، علیرغم اینکه افزایش عدد فراد و یا به عبارتی کاهش شتاب گرانش، تأثیر واضحی بر کشیدگی قطره در حین سقوط ندارد، اما شکل خطوط جریان را به طور کلی تغییر می‌دهد. چنانکه در فراد 0.2 و حتی 0.6 خطوط جریان تراکم نسبتاً زیادی در سرتاسر کانال دارند اما در فرادهای بالاتر این تراکم در محیط کانال کاهش پیدا کرده و به اطراف قطره منتقل می‌شود.

بنابراین مشخص است که با کاهش شتاب گرانش، تأثیر حرکت قطره بر لایه‌های سیال مجاور

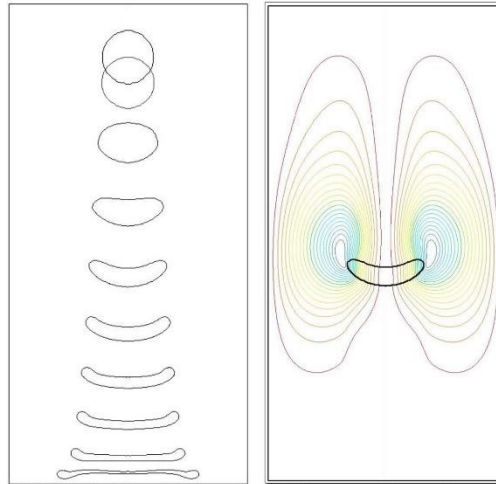
خود در کانال ناچیز می‌گردد.



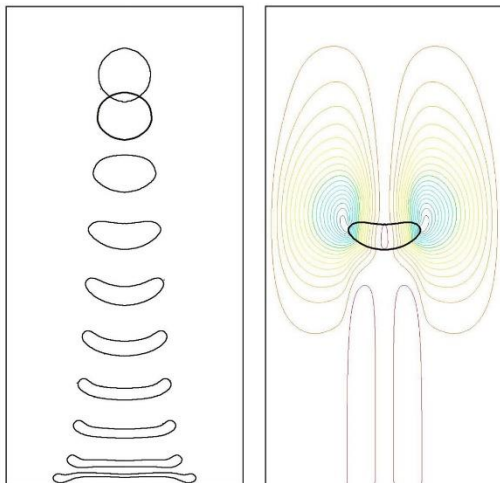
شکل ۵-۱۷ نحوه تغییر شکل قطره در حین سقوط و خطوط جریان در اعداد فراد مختلف و در شرایط Re_{35}



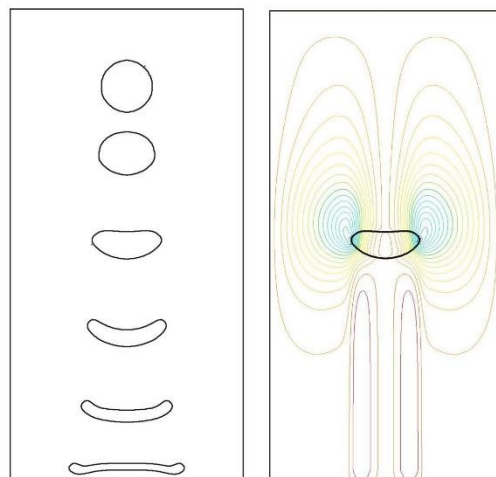
Fr0.2 Falling Pattern and Stream Functions



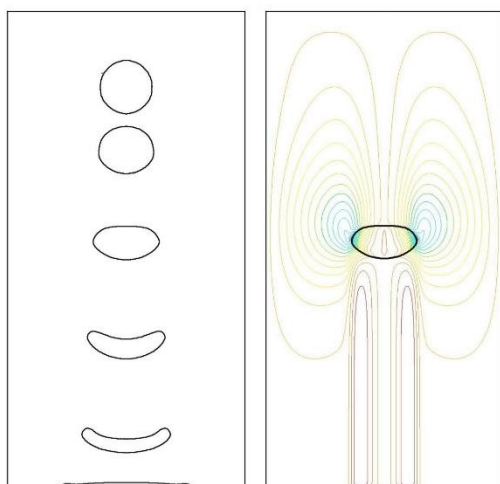
Fr0.6 Falling Pattern and Stream Functions



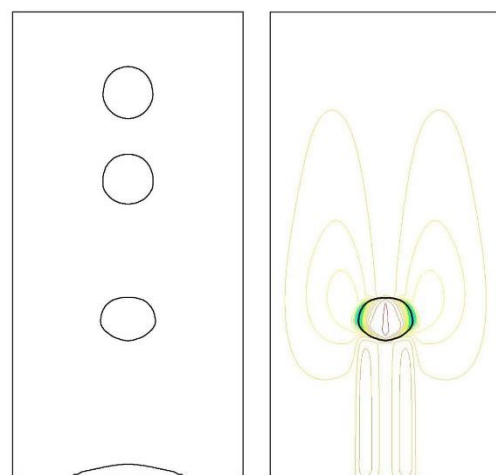
Fr1 Falling Pattern and Stream Functions



Fr1.5 Falling Pattern and Stream Functions

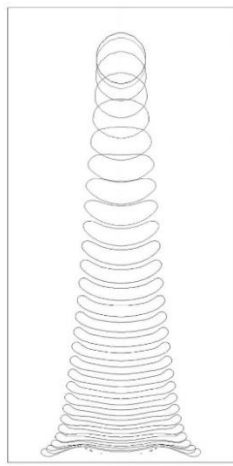


Fr2 Falling Pattern and Stream Functions

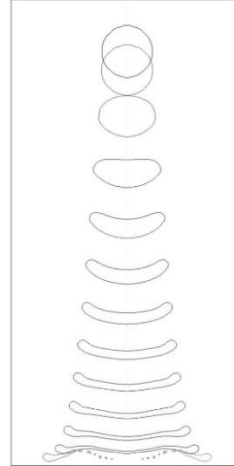
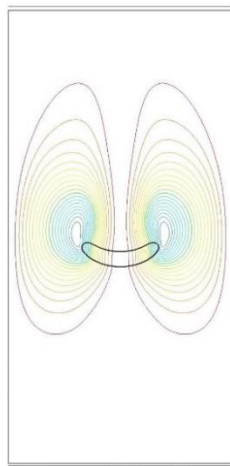


Fr5 Falling Pattern and Stream Functions

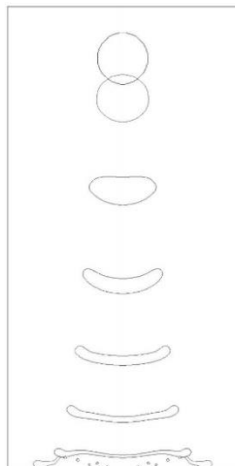
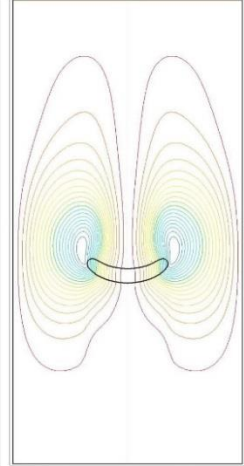
شکل ۵-۱۸ نحوه تغییر شکل قطره در حین سقوط و خطوط جریان در اعداد فراد مختلف و در شرایط Re85



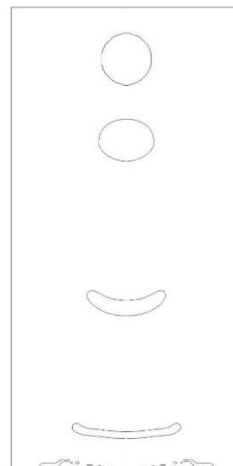
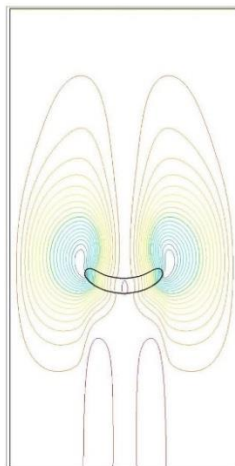
Fr0.2 Falling Pattern and Stream Functions



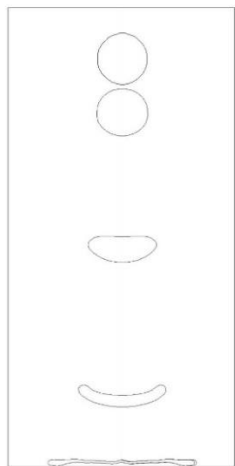
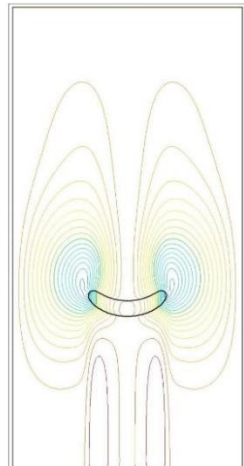
Fr0.6 Falling Pattern and Stream Functions



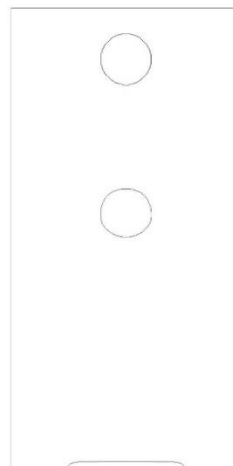
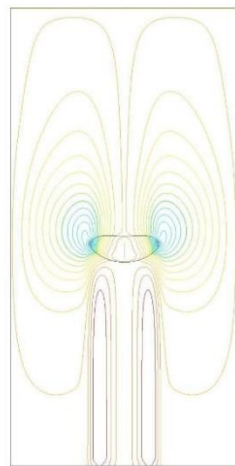
Fr1 Falling Pattern and Stream Functions



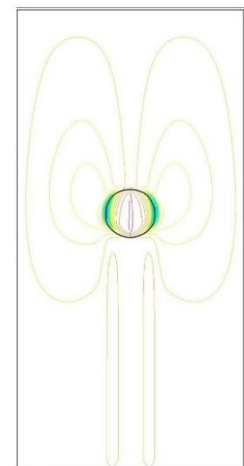
Fr1.5 Falling Pattern and Stream Functions



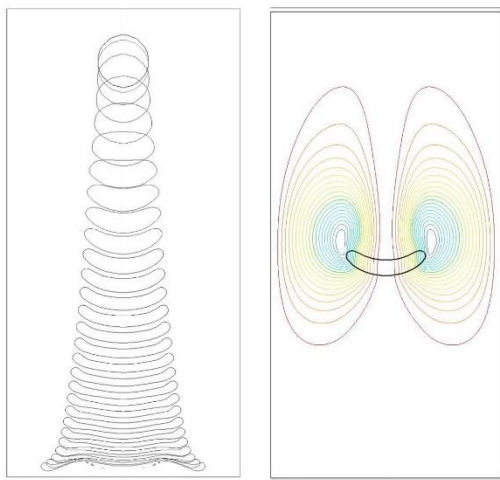
Fr2 Falling Pattern and Stream Functions



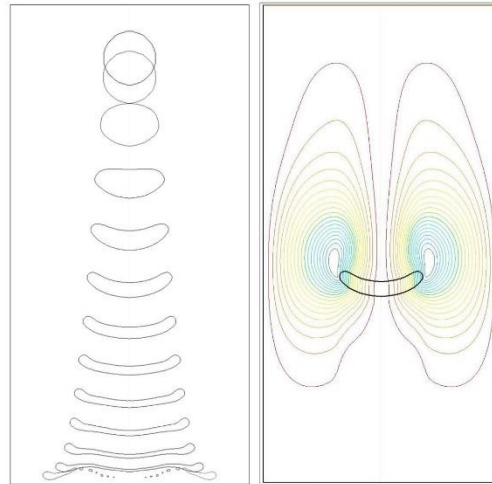
Fr5 Falling Pattern and Stream Functions



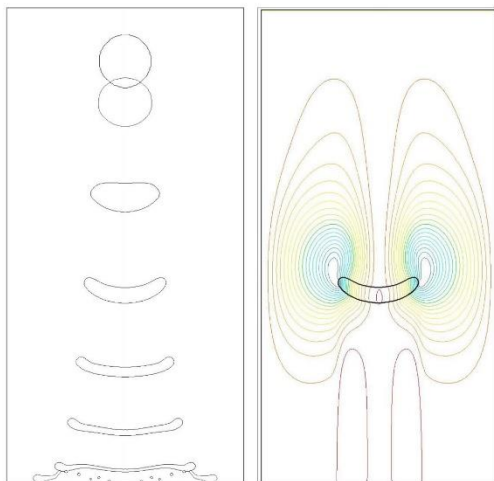
شکل ۵-۱۹ نحوه تغییر شکل قطره در حین سقوط و خطوط جریان در اعداد فراد مختلف و در شرایط $Re=100$



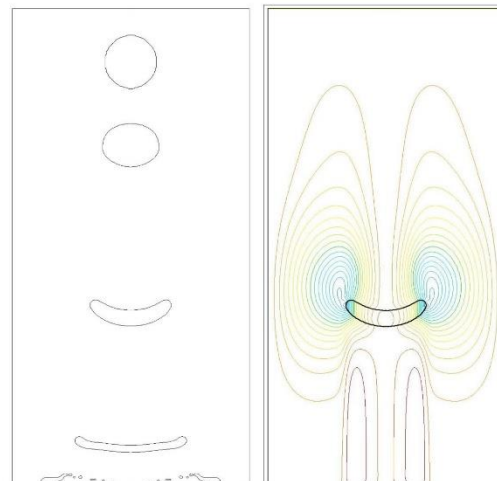
Fr0.2 Falling Pattern and Stream Functions



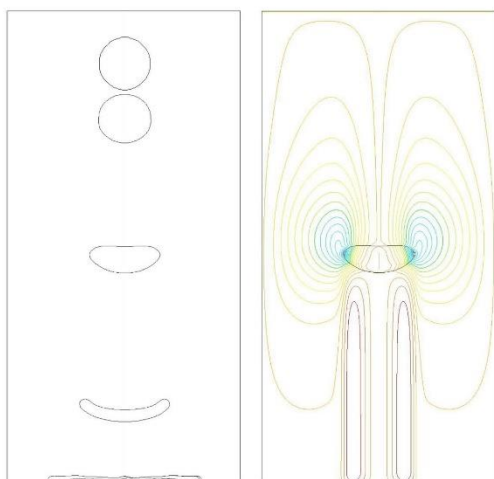
Fr0.6 Falling Pattern and Stream Functions



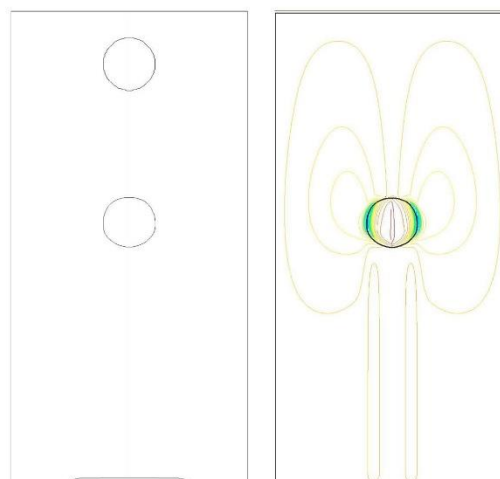
Fr1 Falling Pattern and Stream Functions



Fr1.5 Falling Pattern and Stream Functions

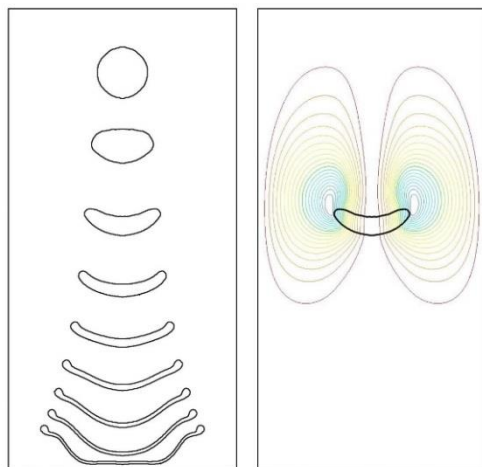


Fr2 Falling Pattern and Stream Functions

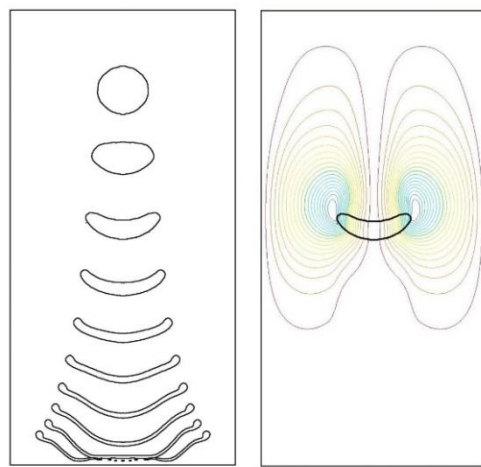


Fr5 Falling Pattern and Stream Functions

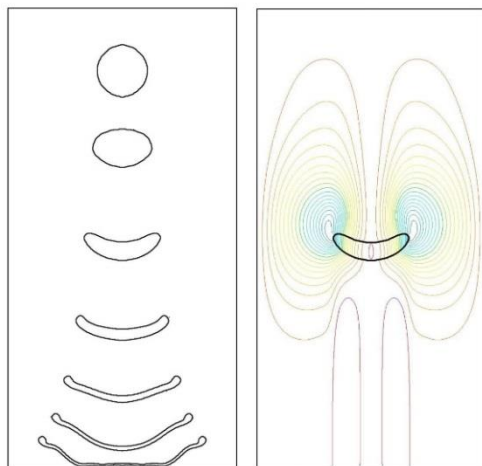
شکل ۵-۲۰ نحوه تغییر شکل قطره در حین سقوط و خطوط جریان در اعداد فراد مختلف و در شرایط We_{50}



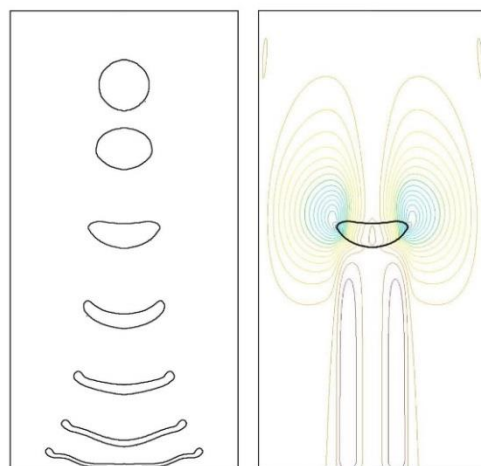
Fr0.2 Falling Pattern and Stream Functions



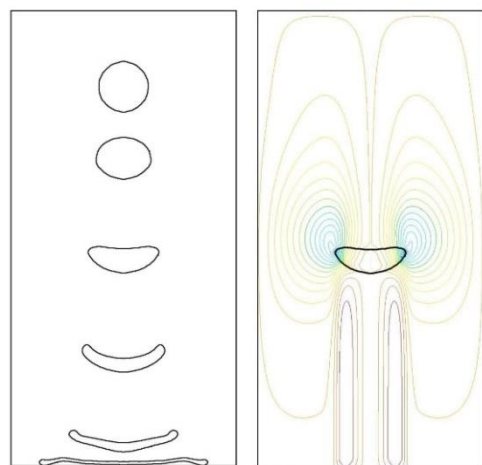
Fr0.6 Falling Pattern and Stream Functions



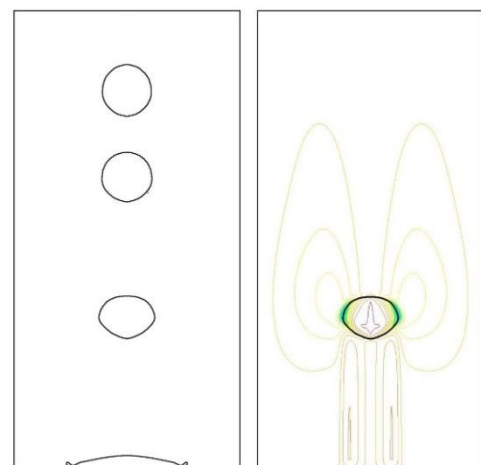
Fr1 Falling Pattern and Stream Functions



Fr1.5 Falling Pattern and Stream Functions

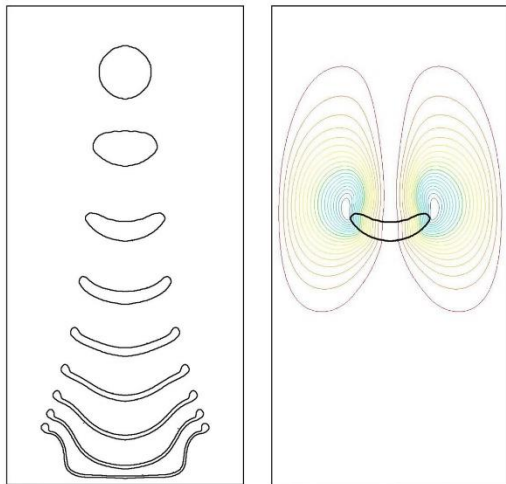


Fr2 Falling Pattern and Stream Functions

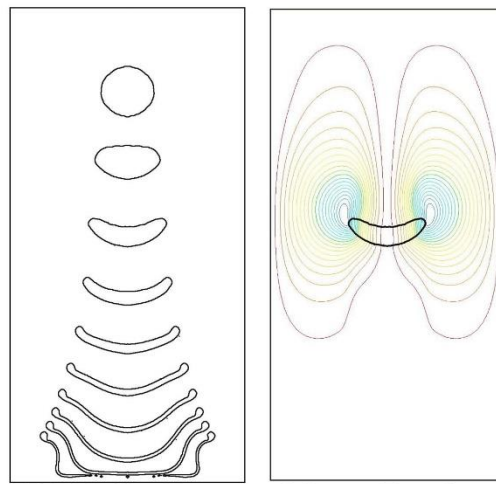


Fr5 Falling Pattern and Stream Functions

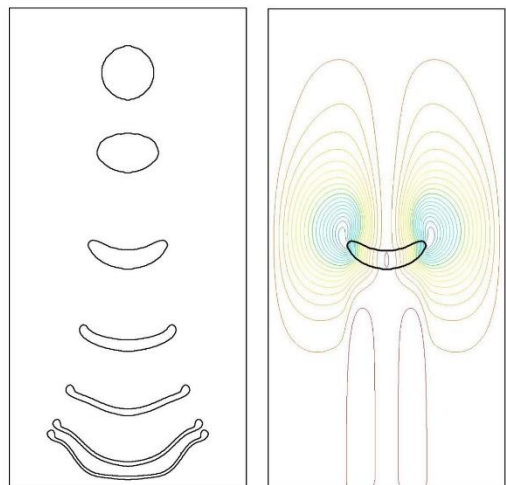
شکل ۵-۲۱ نحوه تغییر شکل قطره در حین سقوط و خطوط جریان در اعداد فراد مختلف و در شرایط $We=200$



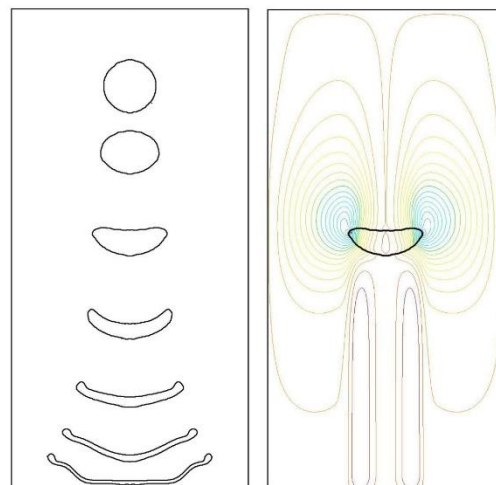
Fr0.2 Falling Pattern and Stream Functions



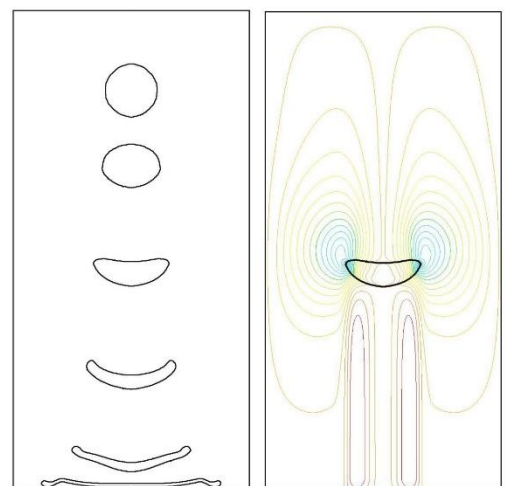
Fr0.6 Falling Pattern and Stream Functions



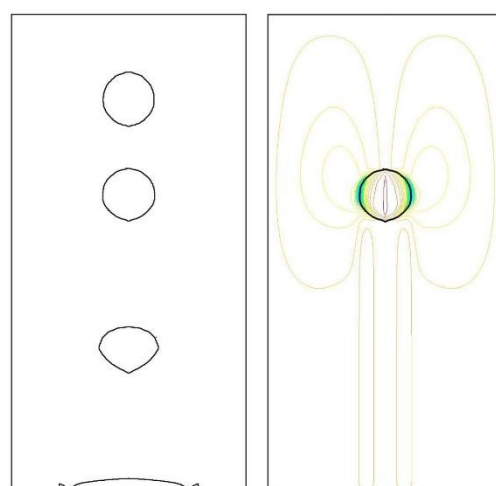
Fr1 Falling Pattern and Stream Functions



Fr1.5 Falling Pattern and Stream Functions



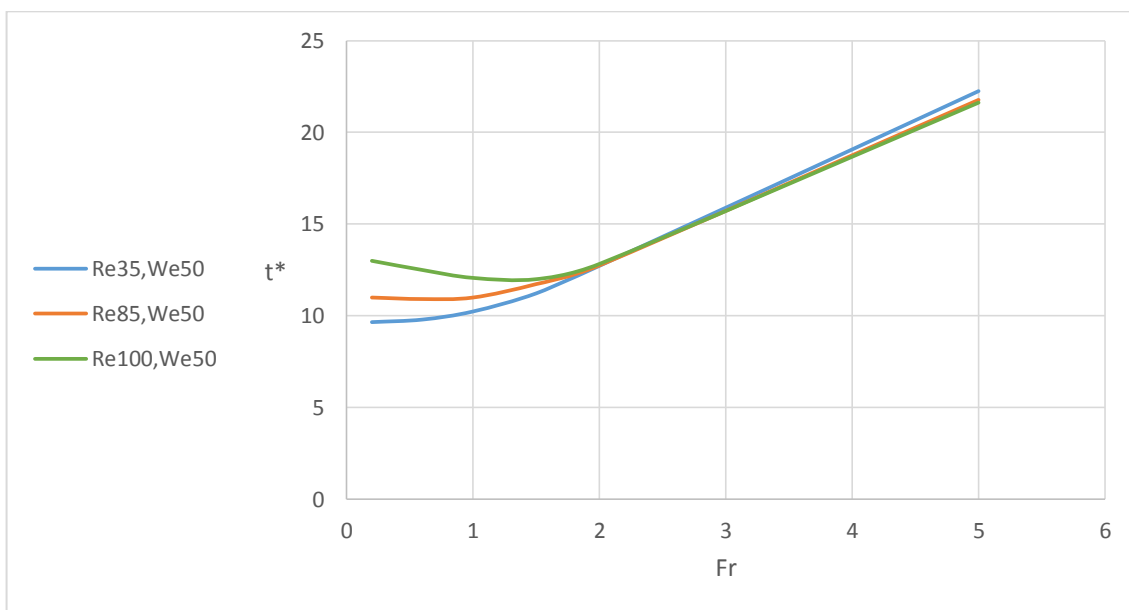
Fr2 Falling Pattern and Stream Functions



Fr5 Falling Pattern and Stream Functions

شکل ۵-۲۲ نحوه تغییر شکل قطره در حین سقوط و خطوط جریان در اعداد فراد مختلف و در شرایط We1000

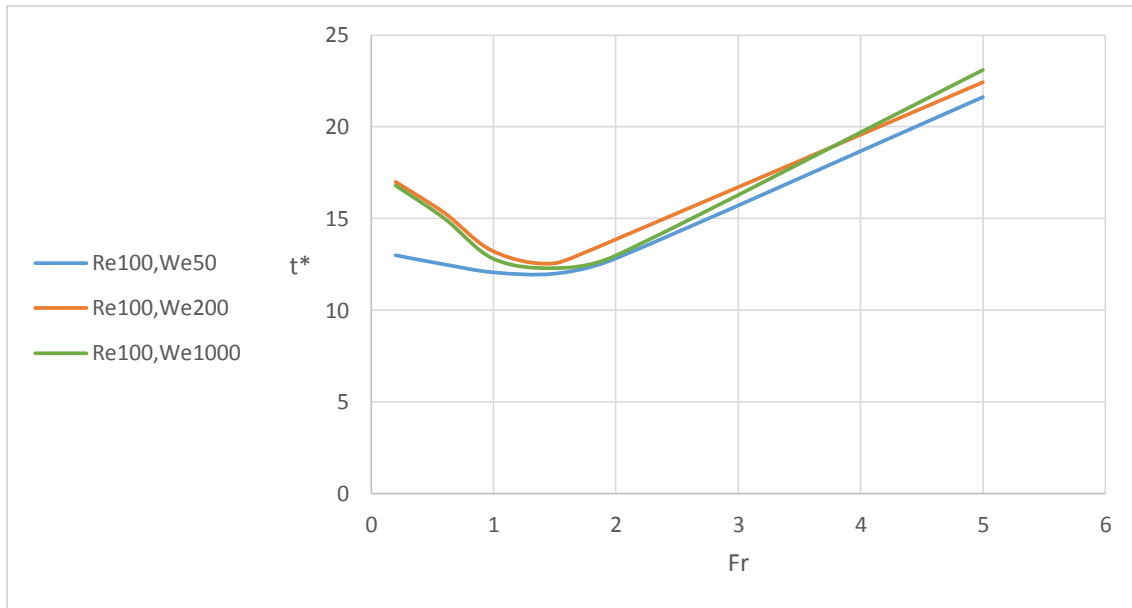
در این قسمت، اثر تغییر عدد فراد بر زمان سقوط بی بعد قطره در قالب منحنی آورده شده است.



شکل ۵-۲۳ تأثیر تغییر عدد فراد بر زمان سقوط بی بعد در اعداد رینولدز مختلف و وبر ۵۰

همانطور که از شکل‌های ۵-۲۳ و ۵-۲۴ مشخص است، فراد $1/5$ تقریباً مرزی برای تغییر جزئی رفتار سقوط قطره می‌باشد؛ چرا که در فرادهای بیشتر از $1/5$ زمان سقوط قطره مستقل از رینولدز و وبر می‌گردد. به عبارت دیگر اگر فراد جریان بیش از حدود $1/5$ باشد، تنها عاملی که می‌تواند زمان بی بعد سقوط را تغییر دهد، همان عدد فراد می‌باشد.

همچنین در این بازه (فرادهای بیش از $1/5$) با افزایش عدد فراد و یا به عبارتی کاهش شتاب گرانش، زمان سقوط افزایش پیدا کرده است که امری بدیهی می‌باشد. اما در فرادهای کمتر از $1/5$ به دلیل پررنگ تر شدن نقش اعداد رینولدز و وبر، این رفتار متفاوت می‌باشد.



شکل ۵-۲۴ تأثیر تغییر عدد فراد بر زمان سقوط بی بعد در اعداد وبر مختلف و رینولدز ۱۰۰

۶. فصل ششم: نتایج بررسی سقوط قطره در سیال نیوتنی با حضور

انتقال حرارت

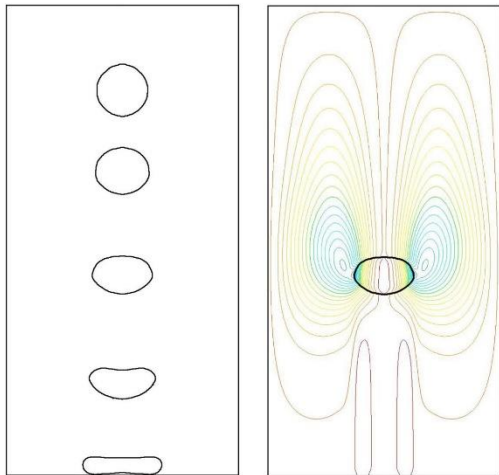
در فصل گذشته اثر تغییر اعداد بی بعد منتخب بر روی رژیم جریان سقوط قطره و همچنین زمان بی بعد سقوط به تفصیل بررسی گردید. در فصل پیش رو هدف، بررسی تأثیر اختلاف دما بین قطره و سیال محیطی در شرایط بدون تغییر فاز می‌باشد. به همین دلیل در این فصل یک اختلاف دمای ۱۰۰ درجه کلون بین قطره و سیال محیطی در نظر گرفته شده است و به منظور دخیل نمودن اثرات انتقال حرارت جابجایی آزاد، دمای قطره بیشتر از دمای سیال محیطی تنظیم گردیده است؛ چرا که بتوان در حین سقوط قطره، یک جریان سیال رو به بالا در بیرون قطره نیز به دلیل انتقال حرارت جابجایی آزاد مشاهده نمود.

بنا بر مطالب بیان شده در بخش دوم از فصل چهارم در رابطه با انتخاب مناسب گروه‌های بی‌بعد، در این فصل ۲ عدد بی بعد Ra , Pe نیز به گروه بی بعد قبلی اضافه می‌گردند. با توجه به اینکه اثر تغییرات سه عدد بی بعد Re , We , Fr در فصل قبل تشریح گردید، لذا از تکرار آن در فصل حاضر و با حضور انتقال حرارت اجتناب گردیده و بررسی تأثیر وجود اثرات انتقال حرارت و همچنین تأثیر تغییر عدد رایلی در این بخش پر رنگ‌تر شده است.

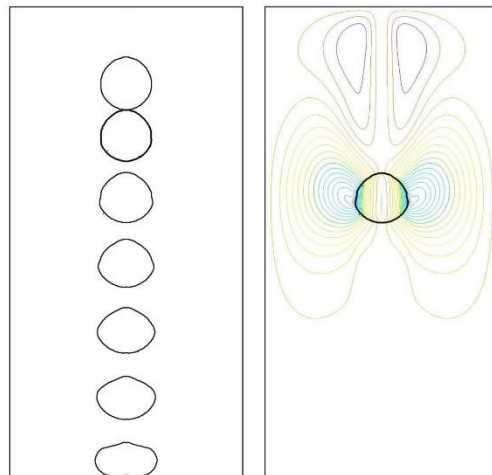
۱. بررسی تأثیر وجود انتقال حرارت بر رژیم جریان:

در این قسمت با بررسی رژیم جریان در سه رینولدز ۳۵، ۶۵ و ۱۰۰ و هر کدام در وبرهای ۵۰ و ۲۰۰ و نیز فرادهای ۰/۶ و ۱/۵ و مقایسه آنها در دو حالت وجود اختلاف دما و عدم وجود اختلاف دما، نتایج جالب توجهی بدست آمد.

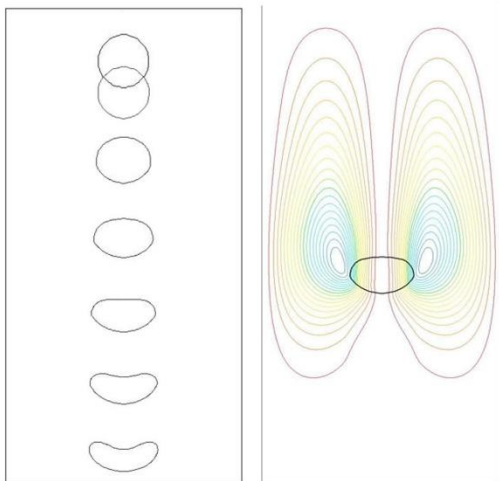
با توجه به شکل‌های ۱-۶ تا ۳-۶ مشخص می‌گردد که وجود اختلاف دما بین قطره و سیال محیطی، باعث پهن‌تر شدن قطره در حین سقوط می‌گردد. همچنین بررسی خطوط جریان، حاکی از به وجود آمدن یک جفت گردابه در پشت قطره داغ در اعداد رینولدز پایین و کاهش کشیدگی خطوط جریان در طول کانال در رینولدزهای بالاتر می‌باشد. که علت این پدیده‌ها همگی وجود یک جریان سیال رو به بالا در اطراف قطره به دلیل اثرات جابجایی آزاد می‌باشد.



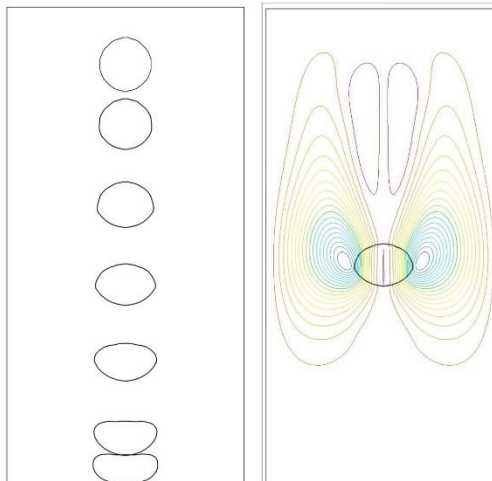
We50, Fr1.5 Falling Pattern (Non-Thermal)



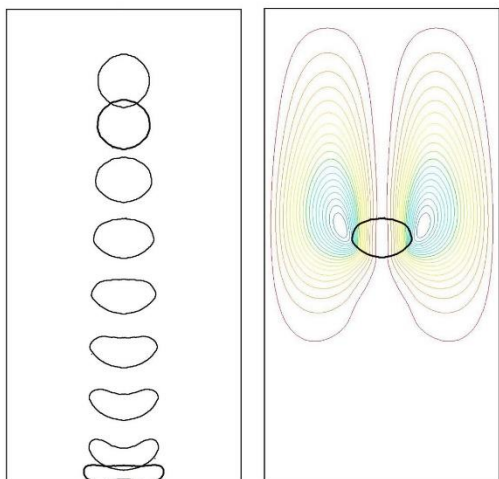
We50, Fr1.5 Falling Pattern (Thermal)



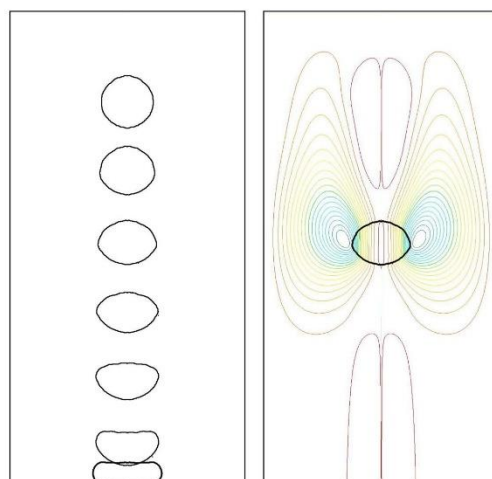
We50, Fr0.6 Falling Pattern (Non-Thermal)



We50, Fr0.6 Falling Pattern (Thermal)

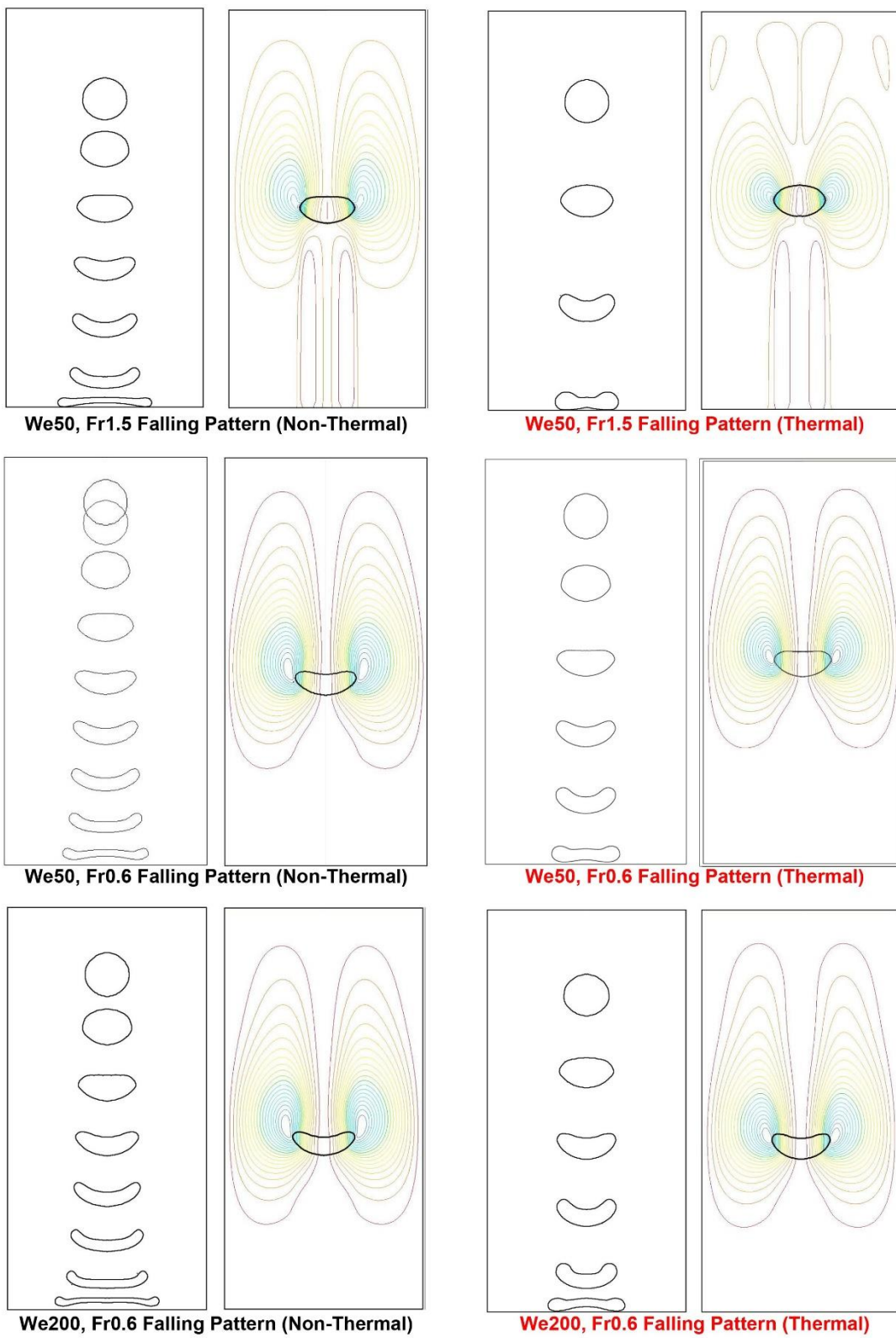


We200, Fr0.6 Falling Pattern (Non-Thermal)

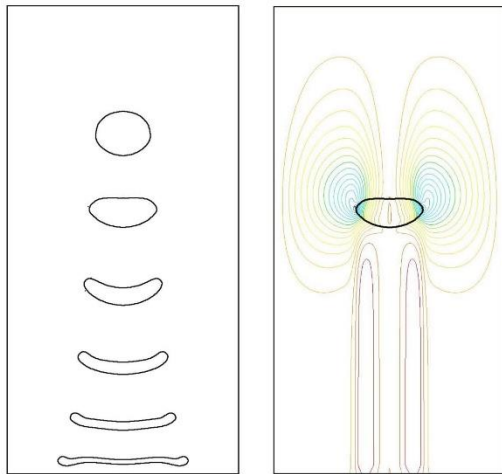


We200, Fr0.6 Falling Pattern (Thermal)

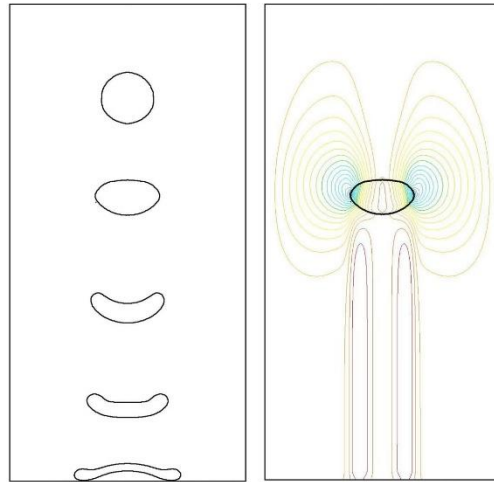
شکل ۶-۱ مقایسه دو حالت وجود اختلاف دما و عدم وجود آن در رینولدز ۳۵ ($Ra\ 434000, Pe\ 4157$)



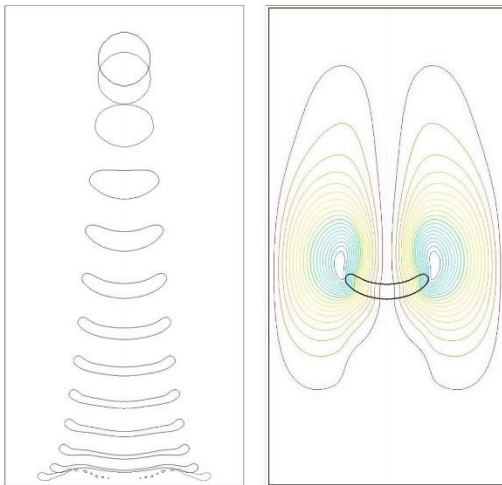
شکل ۶-۲ مقایسه دو حالت وجود اختلاف دما و عدم وجود آن در رینولدز ۶۵ ($Ra\ 434000$, $Pe\ 4157$)



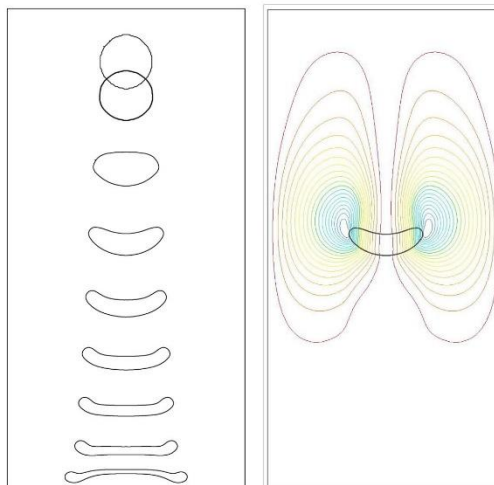
We50, Fr1.5 Falling Pattern (Non-Thermal)



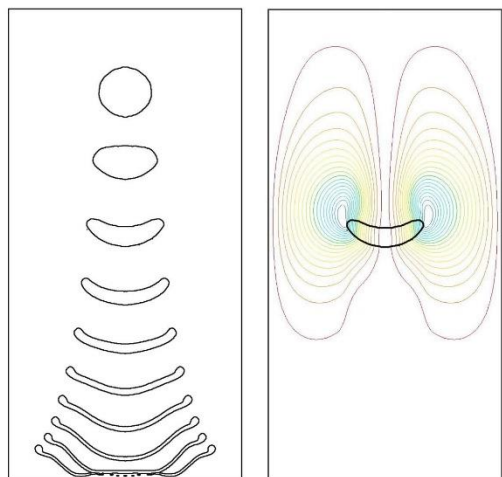
We50, Fr1.5 Falling Pattern (Thermal)



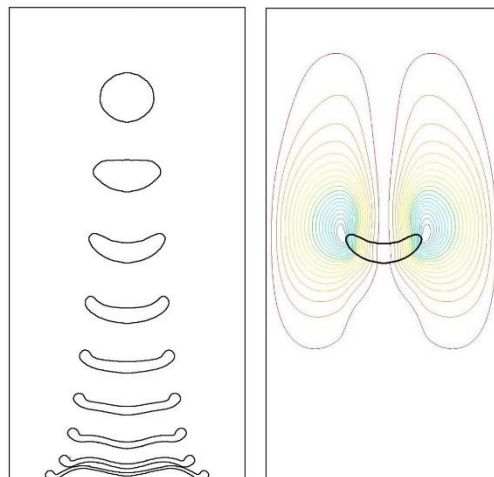
We50, Fr0.6 Falling Pattern (Non-Thermal)



We50, Fr0.6 Falling Pattern (Thermal)



We200, Fr0.6 Falling Pattern (Non-Thermal)

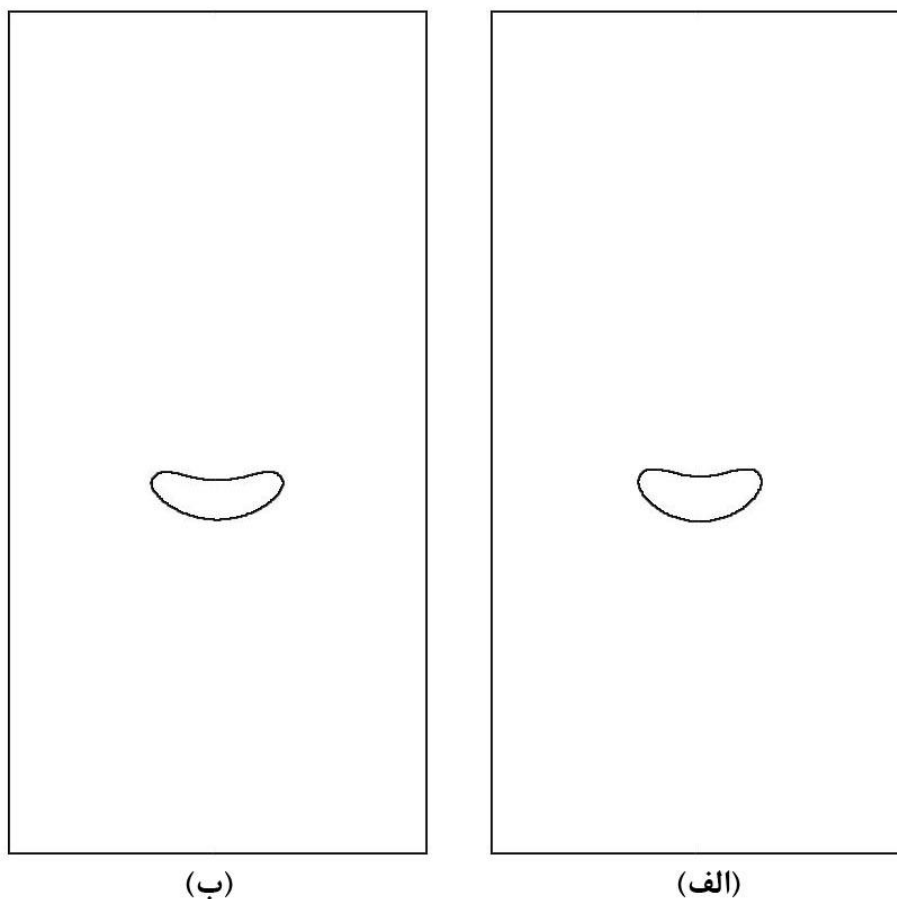


We200, Fr0.6 Falling Pattern (Thermal)

شکل ۶-۳ مقایسه دو حالت وجود اختلاف دما و عدم وجود آن در رینولدز ۱۰۰ (Ra 434000, Pe 4157)

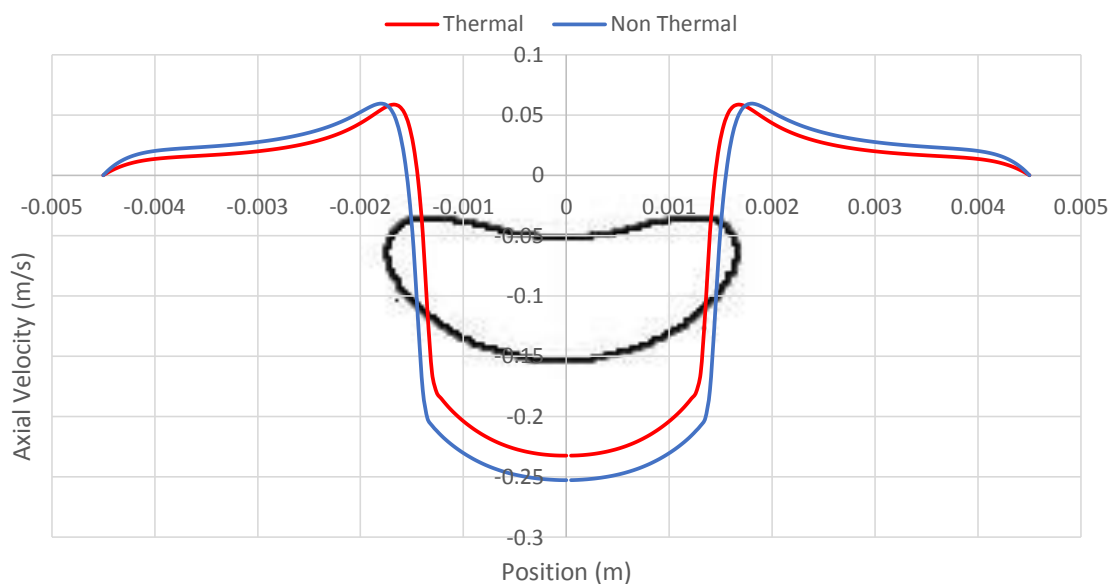
به منظور اثبات وجود یک جریان اضافی به دلیل وجود اثرات انتقال حرارت جابجایی آزاد در پیرامون قطره در حال سقوط، پروفیل سرعت محوری (مؤلفه سرعت در راستای سقوط) برای دو حالت حرارتی و بدون حرارت در یک مقطع از کانال رسم گردیده است.

این حالت برای جریانی با اعداد بی بعد $Re\ 85$, $We\ 50$, $Fr\ 1.5$ و همچنین $Ra\ 434000$, $Pe\ 4157$ و در زمانی که قطره در حال عبور از مرکز کانال می‌باشد بررسی گردیده است. شکل قطره در این لحظه و در دو حالت حرارتی و بدون حرارت در زیر آورده شده است.



شکل ۴-۶ مقایسه دو حالت سقوط قطره در شرایط $Re\ 85$, $We\ 50$, $Fr\ 1.5$, $Ra\ 434000$, $Pe\ 4157$

الف: با وجود اختلاف دما بین قطره و سیال محیطی و ب: بدون وجود اختلاف دما



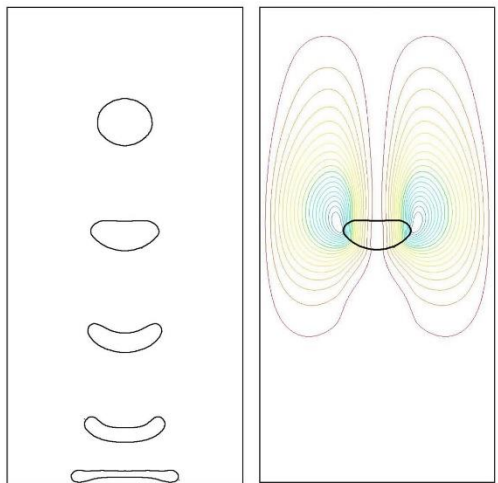
شکل ۶-۵ پروفیل سرعت محوری در مقطع عبوری از مرکز قطره با شرایط شکل ۶-۴

همانطور که در شکل ۶-۵ مشاهده می‌گردد، اختلاف اندازه سرعت محوری در پیرامون قطره در حال سقوط بین دو حالت حرارتی و بدون حرارت کاملاً مشهود است که بیانگر وجود جریان اضافی در لایه‌های اطراف قطره به دلیل انتقال حرارت جابجایی آزاد می‌باشد.

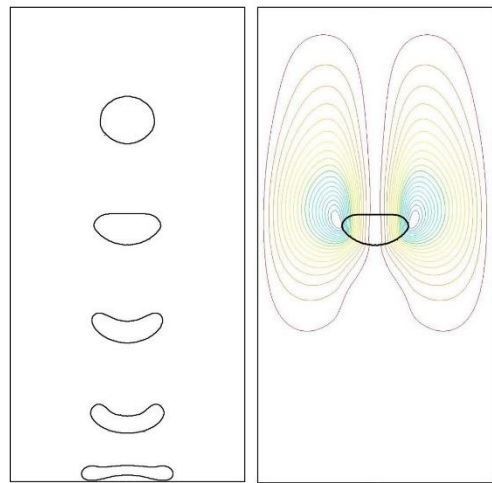
۲. اثر تغییرات عدد رایلی:

در این قسمت تأثیر تغییر عدد رایلی که به نوعی نشانگر قدرت انتقال حرارت جابجایی آزاد می‌باشد بر شکل رژیم سقوط و خطوط جریان، بررسی گردیده است.

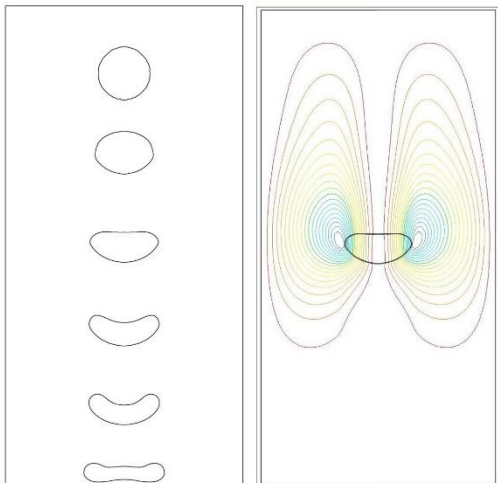
همانطور که در شکل‌های ۶-۱ تا ۶-۳ نیز مشاهده گردید، وجود اثرات انتقال حرارت باعث پهن‌تر شدن قطره در حین سقوط می‌گردد. این حالت دقیقاً با افزایش عدد رایلی بیشتر می‌گردد. (شکل ۶-۶) همچنین افزایش عدد رایلی باعث کاهش کشیدگی خطوط جریان در طول کانال و ایجاد گردابه در پشت قطره می‌گردد که دلیل این امر در قسمت قبلی توضیح داده شد.



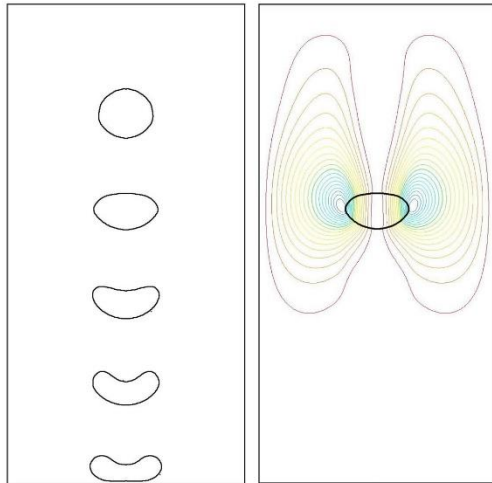
Ra 110,000 Falling Pattern & Stream Functions



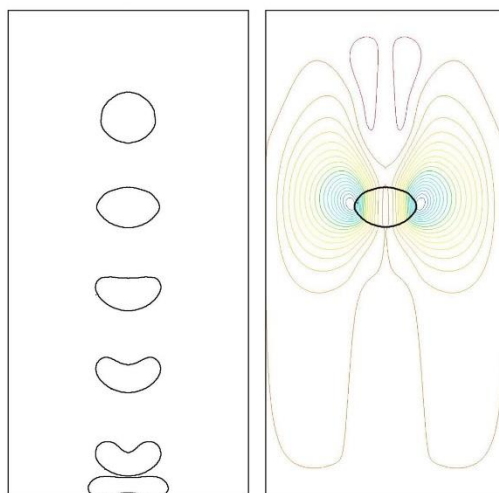
Ra 270,000 Falling Pattern & Stream Functions



Ra 430,000 Falling Pattern & Stream Functions



Ra 750,000 Falling Pattern & Stream Functions

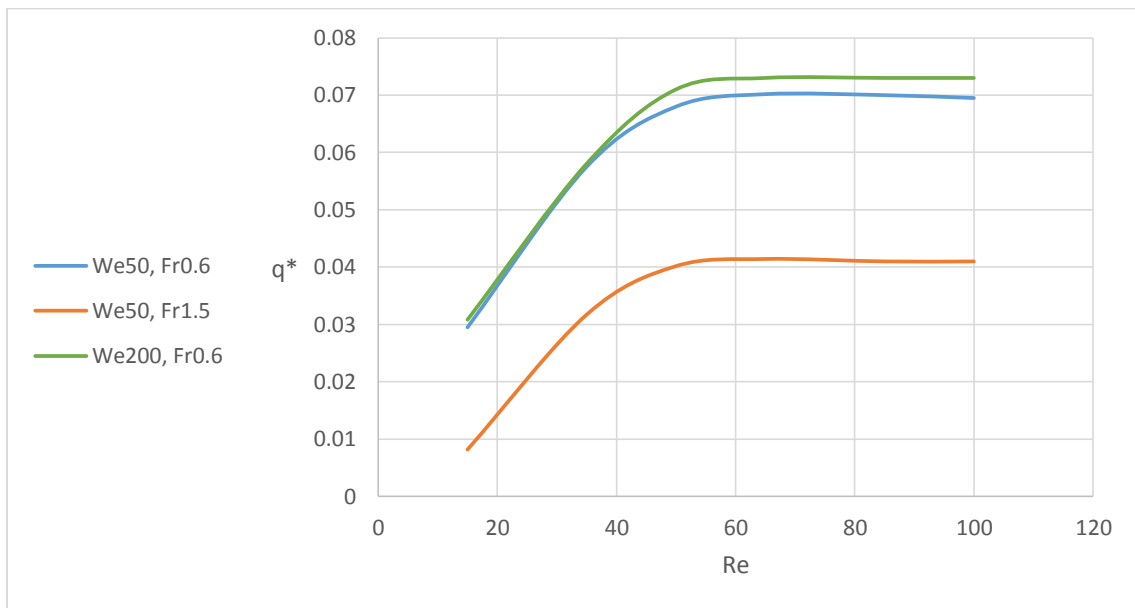


Ra 1,100,000 Falling Pattern & Stream Functions

شکل ۶-۶ نحوه تغییر شکل قطره در حین سقوط و خطوط جریان در شرایط $Re\ 65, We\ 50, Fr\ 0.6, Pe\ 4157$

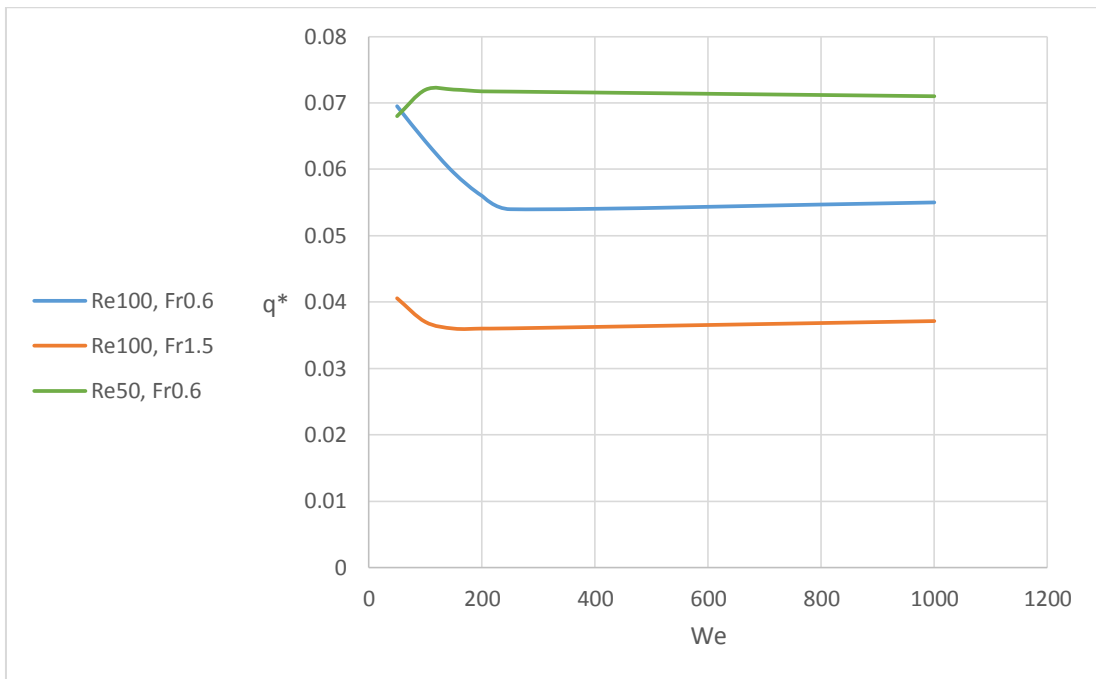
۳. بررسی تأثیر عوامل مختلف بر نرخ انتقال حرارت:

پس از انجام مقایسه شرایط حرارتی و بدون حرارت و همچنین بررسی اثر عدد رایلی، محاسبه و بررسی نرخ انتقال حرارت بین قطره و سیال صورت گرفت. لذا مقدار انتقال حرارت بدون بعد که طبق رابطه ۴-۲۸ تعریف گردیده است، در برابر اعداد بی بعد مختلف بررسی و منحنی تغییرات آن رسم گردید.



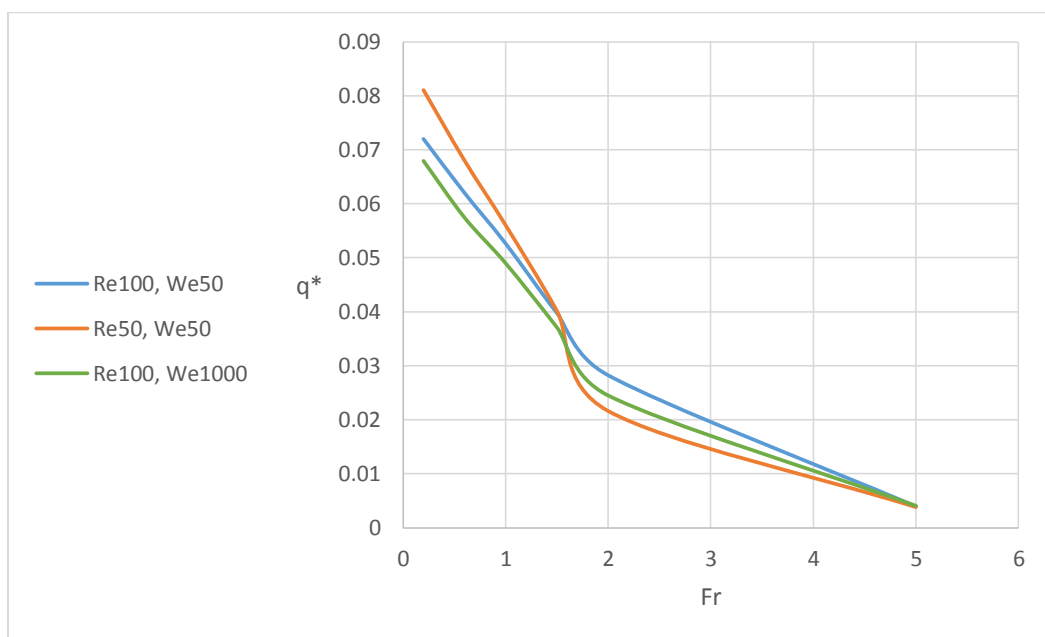
شکل ۶-۷ تأثیر تغییر عدد رینولدز بر نرخ انتقال حرارت بی بعد در اعداد وبر و فراد مختلف

بررسی شکل ۶-۷ نشان می دهد همانطور که رینولدز ۵۰ مرزی برای تغییر جزئی رفتار قطره در حال سقوط در فصل قبل بود، در این فصل نیز رفتار دوگانه ای در رینولدزهای بالاتر و پایین تر از ۵۰ دیده می شود. این شکل نشان می دهد نرخ انتقال حرارت بدون بعد در رژیم هایی با عدد رینولدز بیش از ۵۰ مستقل از رینولدز می باشد، در حالیکه برای رینولدزهای کمتر، افزایش عدد رینولدز با افزایش نرخ انتقال حرارت بی بعد همراه بوده است. دلیل این امر افزایش سطح تماس قطره و سیال محیطی در اثر کشیده شدن قطره با افزایش عدد رینولدز است. اما دلیل مستقل بودن نرخ انتقال حرارت در رینولدزهای بالاتر این است که با افزایش بیشتر عدد رینولدز، کشیدگی قطره در رینولدزهای مختلف تقریباً یک اندازه می باشد.



شکل ۶-۸ تأثیر تغییر عدد وبر بر نرخ انتقال حرارت بی بعد در اعداد رینولدز و فراد مختلف

بررسی شکل ۶-۸ نشان دهنده استقلال تقریبی نرخ انتقال حرارت از عدد وبر است. مگر در اعداد وبر کمتر از ۲۰۰. چرا که افزایش عدد وبر و یا به عبارتی کاهش نیروی کشش سطحی بین قطره و سیال محیطی، دخالت زیادی در مکانیزمهای انتقال حرارت ندارد.



شکل ۶-۹ تأثیر تغییر عدد فراد بر نرخ انتقال حرارت بی بعد در اعداد رینولدز و وبر مختلف

علیرغم اینکه بررسی شکل‌های ۶-۷ و ۶-۸ مستقل بودن نرخ انتقال حرارت بی بعد به اعداد رینولدز و وبر (البته در بازه‌های محدودی) را نشان می‌داد، شکل ۹-۶ حاکی از وابستگی شدید عدد فراد به نرخ انتقال حرارت بی بعد دارد. طوری که در همه شرایط، افزایش عدد فراد و یا به عبارتی کاهش نیروی گرانش، کاهش نرخ انتقال حرارت را در پی خواهد داشت.

دلیل این امر متراکم شدن خطوط جریان حول قطره با افزایش عدد فراد می‌باشد که موجب کاهش نرخ انتقال حرارت می‌گردد.

۷. فصل هفتم: مراجع

- [1] J. Eggers, Nonlinear dynamics and breakup of free-surface flows, *Rev. Modern Phys.* 69 (3) (1997) 865–929.
- [2] Dong Liu, Peng Zhang, Chung K. Law, Yincheng Guo, Collision dynamics and mixing of unequal-size droplets, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 57 (2013) 421–428
- [3] Kai Sun, Ming Jia, Tianyou Wang, Numerical investigation of head-on droplet collision with lattice Boltzmann method, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 58 (2013) 260–275
- [4] H.A. Stone, Dynamics of droplet deformation and breakup in viscous fluids, *Ann. Rev. Fluid Mech.* 26 (1994) 65–102.
- [5] L.G. Leal, Particle motion in a viscous fluid, *Ann. Rev. Fluid Mech.* 12 (1980) 435–476.
- [6] M. Pasandideh-Fard, S. Chandra, J. Mostaghimi, A three-dimensional model of droplet impact and solidification, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 45 (2002) 2229–2242
- [7] V. Mehdi-Nejad, J. Mostaghimi, S. Chandra, Air bubble entrapment under an impacting droplet, *Phys. Fluids* 15, 173 (2003)
- [8] Shiraz D. Aziz, Sanjeev Chandra, Impact, recoil and splashing of molten metal droplets, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 43 (2000) 2841–2857
- [9] M. Bussmann, J. Mostaghimi, S. Chandra, On a three-dimensional volume tracking model of droplet impact, *Phys. Fluids* 11, 1406 (1999)
- [10] J. Feng, H.H. Hu, D.D. Joseph, Direct simulation of initial value problems for the motion of solid bodies in a Newtonian fluid. Part 1: Sedimentation, *J. Fluid Mech.* 261 (1994) 95–134.

- [۱۱] S. Mortazavi, G. Tryggvason, A numerical study of the motion of droplets in Poiseuille flow. Part 1: Lateral migration of one droplet, *J. Fluid Mech.* 411 (2000) 325–350.
- [۱۲] M. Francois, W. Shyy, Computations of drop dynamics with the immersed boundary method. Part 1: Numerical algorithm and buoyancy-induced effect, *Numer. Heat Transfer B* 44 (2) (2003) 101–118.
- [۱۳] M. Francois, W. Shyy, Computations of drop dynamics with the immersed boundary method. Part 1: Numerical algorithm and buoyancy-induced effect, *Numer. Heat Transfer B* 44 (2) (2003) 119–143.
- [۱۴] C.S. Peskin, Numerical analysis of blood flow in the heart, *J. Comput. Phys.* 25 (3) (1977) 220–252.
- [۱۵] S.O. Unverdi, G. Tryggvason, A front tracking method for viscous, incompressible, multifluid flows, *J. Comput. Phys.* 100 (1) (1992) 25–37.
- [۱۶] F. Mashayek, N. Ashgriz, W.J. Minkowycz, B. Shotorban, Coalescence collision of liquid drops, *Int. J. Heat Mass Transfer* 46 (1) (2003) 77–89.
- [۱۷] M. Bussmann, S. Chandra, J. Mostaghimi, Modeling the splash of a droplet impacting a solid surface, *Phys. Fluids* 12, 3121 (2000)
- [۱۸] Deepak Jain, Niels G. Deen, J.A.M. Kuipers, Sergiy Antonyuk, Stefan Heinrich, Direct numerical simulation of particle impact on thin liquid films using a combined volume of fluid and immersed boundary method, *Chemical Engineering Science* 69 (2012) 530–540
- [۱۹] Taehun Lee, Lin Liu, Lattice Boltzmann simulations of micron-scale drop impact on dry surfaces, *Journal of Computational Physics* 229 (2010) 8045–8063
- [۲۰] Mohammad Taghilou, Mohammad Hassan Rahimian, Investigation of two-phase flow in porous media using lattice Boltzmann method, *Computers and Mathematics with Applications*

- [۲۱] Shengqiang Shen, Feifei Bi, Yali Guo, Simulation of droplets impact on curved surfaces with lattice Boltzmann method, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 55 (2012) 6938–6943
- [۲۲] E. Bertakis, S. Groß, J. Grande, O. Fortmeier, A. Reusken, A. Pfennig, Validated simulation of droplet sedimentation with finite-element and level-set methods, *Chemical Engineering Science* 65 (2010) 2037–2051
- [۲۳] Noh W.F., Woodward P, SLIC (Simple Line Interface Calculation), 5th International Conference of Fluid Dynamics, *Lecture Notes in Physics*. 59: 330–340 (1976).
- [۲۴] Hirt C.W., Nichols B.D, Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries, *Journal of Computational Physics*. 39 (1): 201–225 (1981).
- [۲۵] Torrey M., Cloutman L., A computer program for incompressible flows with free surfaces (unpublished), LANL Technical Report LA-10612-MS, (1985).
- [۲۶] Chen S., Raad D.B, The surface marker and micro-cell method, *International Journal For Numerical Methods in Fluids*. 25: 749–778 (1997).
- [۲۷] T. Sochi, Flow of Non-Newtonian Fluids in Porous Media, *Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics*, Vol. 48, 2437–2767 (2010)
- [۲۸] Skelland, A. H. P. *Non-Newtonian Flow and Heat Transfer*, Wiley: New York, 1967.
- [۲۹] Chhabra, R. P., Richardson, J. F. *Non-Newtonian Flow in the Process Industries*, Butterworth Heinemann Publishers: Oxford, 1999.
- [۳۰] Carreau, P. J., De Kee, D., Chhabra, R. P. *Rheology of Polymeric Systems*, Hanser Publishers: Germany, 1997.
- [۳۱] M. Pasandideh-Fard, S. Chandra, J. Mostaghimi, A three-dimensional model of droplet impact and solidification, *Int. J. Heat and Mass Transfer* 45 (2002) 2229–2242

Abstract

In present study, phenomena of falling a droplet into a channel filled with a fluid and in an axisymmetric domain is numerically investigated and important parameters such as: temperature difference between droplet and fluid, effect of dimensionless numbers such as: Reynolds number, Weber number, Froude number and Rayleigh number; were changed during solutions and result of them are given as figures, contours, tables and curves. With respect to two-phase flow in this study, in order to track of interface of two phases Volume of Fluid (VOF) method has used and this method's equation with other governing equations has solved with Fluent commercial code. Changes in affecting parameters of problem caused the falling phenomena to be in different regimes during falling and so that falling time, heat transfer rate, deformation from circular shape, separation and etc. in different cases was different. All of above items were compared with each other in different cases.

Keywords:

Droplet falling into a channel, Axisymmetric, heat transfer, numerical solution with Fluent, VOF method.



Shahrood University of Technology
Faculty of Mechanical Engineering
Mechanical Engineering- Energy Conversion

MSc. Thesis

**Two-Phase numerical analysis of falling drop in a
channel with heat transfer effects**

By:
AmirHossein Niroomand

Supervisor:
Dr. Mohsen Nazari

February 2017