

## تدوین نقشه رژیم چگالش برای پدیده چگالش تماس مستقیم جت بخار در جریان آب در لوله عمودی

سامان زارع<sup>۱</sup>، محمد پسندیده فرد<sup>۲\*</sup>، محمدحسین جمال خو<sup>۳</sup>، محسن قاضی خانی<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استاد گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد

۳- دانشجوی کارشناسی مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد

۴- استاد گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد

### خلاصه

چگالش تماس مستقیم به طور گستره در کاربردهای صنعتی که نیازمند انتقال حرارت و جرم با بازده بالاتر هستند، مورد استفاده قرار می گیرد. آزمایش ها و تحلیل های عددی متعددی در خصوص این پدیده در آب ساکن استخر انجام شده است؛ با این حال، چگالش تماس مستقیم بخار در جریان آب هنوز به طور کامل بررسی نشده است. در این پژوهش، آزمایش هایی جهت بررسی چگالش تماس مستقیم بخار در جریان آب درون لوله عمودی مربعی شکل انجام شده است. در این مطالعه، شکل توده بخار، که از مشخصه های اصلی چگالش می باشد، بررسی و چهار شکل مختلف توده (نیم کره ای، مخروطی، استوانه ای و واگرا) در این پژوهش آزمایشگاهی مشاهده شده است. توزیع این شکل ها به وسیله یک نمودار سه بعدی رژیم چگالش که تابع سه پارامتر شار جرمی بخار، دمای آب و رینولدز جریان آب است نیز ارائه شده است.

**کلمات کلیدی:** نقشه رژیم چگالش، چگالش تماس مستقیم، تغییر فاز، بررسی آزمایشگاهی، تزریق بخار

### ۱. مقدمه

چگالش تماس مستقیم جت بخار تزریق شده در آب مادون سرد یک روش موثر برای انتقال سریع و بدون واسطه حرارت به آب می باشد. به دلیل بازده بالای آن در انتقال حرارت و جرم و نیز هندسه ساده تجهیزات، این پدیده دارای کاربردهای فراوانی در صنعت از قبیل سیستم های حفاظت رآکتورهای هسته ای، سیستم های پیشرانش زیرآبی و گرم کن های تماس مستقیم آب تغذیه دیگ های بخار نیروگاهی می باشد و به همین دلیل، اهمیت بالایی در سال های اخیر یافته است. به طور کلی، در فرآیند چگالش تماس مستقیم جت بخار در آب، بخار با سرعت بالا در آب تخلیه می شود و پس از تشکیل یک توده خالص بخار و در تماس با آب، مستقیماً در محل سطح میان دو فاز چگالیده می شود. در اغلب

\* آدرس ایمیل: mpfard@stu.um.ac.ir

کاربردهای این پدیده، رفتار سطح میان دو فاز، شکل جت بخار، طول توده و نوسانات فشار و دما از اهمیت بالایی در طراحی مهندسی برخوردار است.

به دلیل پیچیدگی الگوهای جریان، تحلیل تئوری پدیده چگالش تماس مستقیم، امری بسیار پیچیده است. از این رو، اکثر پژوهشگران از بررسی‌های آزمایشگاهی و عددی برای تعیین و پیش بینی رفتار و شکل توده استفاده می‌کنند. پژوهش‌های قبلی یافته‌اند که مشخصات توده جت بخار بستگی به شرایط کاری و هندسی سیستم دارد [۱-۱۲]. این بررسی‌ها در راستای مشخص کردن پارامترهای موثر و کمی‌سازی تأثیر آنها بر سه حوزه تمرکز داشته است: ۱- محاسبه شکل و طول توده بخار، ۲- تخمین ضریب انتقال حرارت متوسط چگالش تماس مستقیم، ۳- تدوین نقشه رژیم چگالش.

کرنی و همکاران [۱] نخستین افرادی بودند که با بررسی بخار تزریق شده در استخر آب، رابطه‌ای تجربی برای طول توده بخار را تابعی از شار جرمی بخار، دمای آب و مدول متوسط انتقال ارائه کردند. سایر پژوهشگران نیز رابطه آنها را بر اساس داده‌های تجربی خود اصلاح کردند. چان و لی [۲] جت رو به پایین بخار درون یک استخر آب را در شارهای جرمی پایین بخار مورد بررسی قرار دادند و سه الگوی جریان (نوسانی، خفگی و حبایی) را مشاهده کردند. آنها همچنین نمودار رژیم چگالش بر حسب شار جرمی بخار و دمای استخر رسم کردند. چون و همکاران [۳] نیز شارهای جرمی بالای بخار را در طی تزریق بخار در استخر آب بررسی و دو شکل مخروطی و بیضوی را در طی آزمایش‌های خود مشاهده کردند.

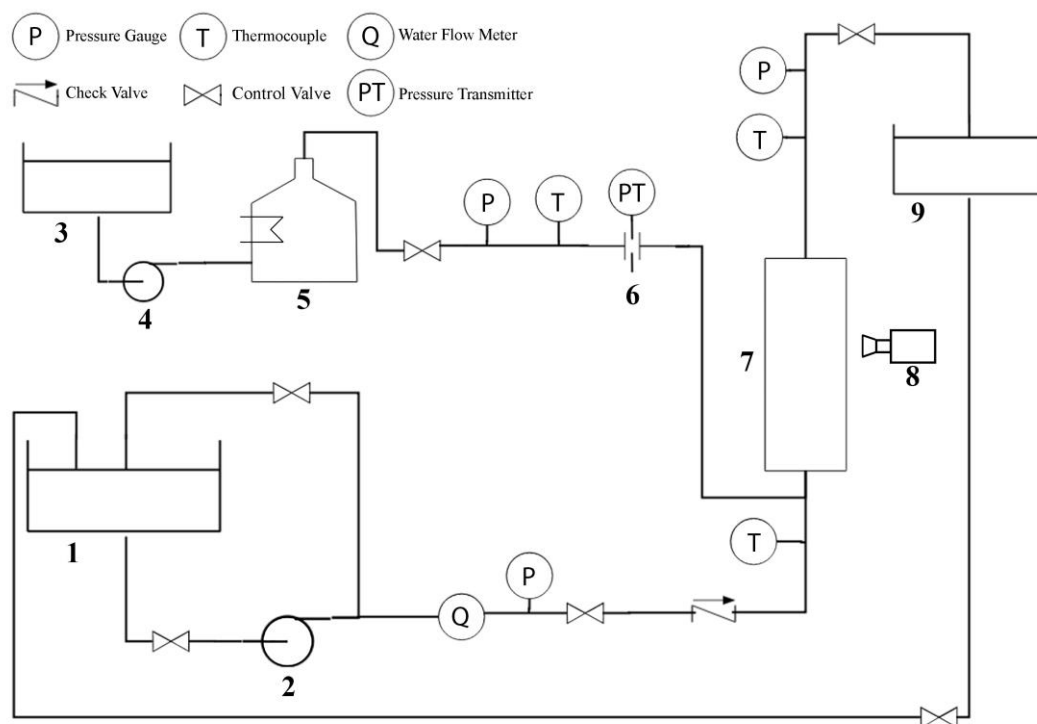
ویت و همکاران [۴، ۵] ضمن مشاهده چهار شکل کروی، مخروطی، بیضوی و واگرا در هنگام تزریق جت بخار در استخر آب، با افزودن تأثیر قطر خروجی نازل بخار، یک نمودار سه بعدی رژیم چگالش بر اساس داده‌های آزمایشگاهی خود ارائه کردند. آنها همچنین یافتند که طول توده بخار در جریان آب حدود ۶۰ درصد کمتر از طول توده بخار در استخر آب می‌باشد. وو و همکاران [۶-۸] با بررسی چگالش جت مافوق صوت بخار در آب ساکن، یافتند که شکل توده بخار در هنگامی که به صورت مافوق صوت در آب تزریق می‌شود متفاوت از حالت مادون صوت بوده و بسته به شرایط جریان، حالت انقباضی یا انبساطی و یا ترکیبی از آنها را به خود می‌گیرد و شش شکل مختلف را تشکیل می‌دهد. داهیکار و همکاران [۹] نیز با استفاده از روش‌های آشکارسازی PLIF و PIV به بررسی الگوهای جریان در فرآیند چگالش تماس مستقیم بخار در استخر آب پرداختند.

ژو و همکاران [۱۰] جزو معدود پژوهشگرانی بودند که به بررسی آزمایشگاهی پدیده چگالش تماس مستقیم جت پایدار بخار در جریان آب پرداختند. آنها ضمن بررسی تأثیر عدد رینولدز جریان آب، پنج شکل کروی، مخروطی، بیضوی، استوانه‌ای و واگرا را در هنگام تزریق جت پایدار بخار در جریان آب مشاهده کردند.

با این وجود، پژوهش‌های اندکی بر روی چگالش تماس مستقیم جت بخار در جریان آب صورت پذیرفته است و اطلاعات اندکی در این زمینه موجود است. از این رو، پژوهش آزمایشگاهی حاضر، به بررسی یک خصوصیت چگالش جت بخار در جریان آب در یک لوله مکعبی عمودی، که شامل شکل توده بخار می‌شود، می‌پردازد. همچنین تأثیر پارامترهای مختلف جریان، شامل جریان جرمی بخار، دمای آب و عدد رینولدز جریان آب، بر روی این خصوصیت پدیده چگالش مستقیم جت بخار در جریان آب مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد و در پایان، توزیع شکل‌های توده بخار بر حسب پارامترهای مختلف جریان در نمودار سه بعدی رژیم چگالش ارائه می‌گردد.

## ۲. دستگاه و روش آزمایش

عمده‌ترین بخشهای دستگاه چگالش بخار درون جریان آب در لوله عمودی را سه قسمت خط تامین بخار آب، خط تامین آب و محفظه آزمایش تشکیل می‌دهد که این قسمت‌ها در شکل ۱ قابل مشاهده است.



شکل ۱- نمودار شماتیک دستگاه آزمایش؛ (۱) مخزن آب، (۲) پمپ آب، (۳) مخزن تغذیه دیگ بخار، (۴) پمپ تغذیه دیگ بخار، (۵) دیگ بخار، (۶) اوریفیس، (۷) محفظه آزمایش، (۸) دوربین سرعت بالا، (۹) مخزن خروجی.

مهم‌ترین بخش قسمت تامین بخار، دیگ بخاری است که بخار اشباع را به صورت پیوسته برای انجام آزمایش تامین می‌نماید. فشار بیشینه تولیدی توسط این دیگ بخار برابر با ۵ bar و بیشترین حد دبی بخار برای این دیگ بخار ۹۰ kg/hr است. در مسیر انتقال بخار به قسمت محفظه آزمایش یک فلنج به همراه اوریفیس تعبیه شده است که از این طریق می‌توان بوسیله دو خروجی از طرفین اوریفیس که به یک ترنسمیتر اختلاف فشار با دقت ۰,۰۰۱ kPa متصل شده‌اند، دبی جریان بخار را اندازه‌گیری کرد. خط انتقال بخار به محفظه آزمایش نیز توسط شیرهایی برای قطع و وصل جریان بخار در مواقع لزوم مجهز شده است و در پایان، این خط به نازل تزریق بخار درون آب در حال جریان منتهی می‌گردد. بخش تامین آب این دستگاه از یک پمپ سانتریفیوژ با توان ۱ kW تشکیل شده است که آب تغذیه آزمایش را از مخزنی با حجم ۰,۵ متر مکعب و از طریق خط لوله‌ای به محفظه آزمایش پمپ می‌کند. در مسیر این خط لوله، یک روماتر که بازه ۱-۱۰ متر مکعب در ساعت را با دقت ۴ درصد اندازه‌گیری می‌کند، برای اندازه‌گیری دبی جریان آب و همچنین چندین شیر دروازه‌ای به همراه یک شیر یک طرفه تعبیه شده است و در پایان، این خط لوله به محفظه آزمایش ختم می‌شود. مخزن تامین آب نیز به یک گرمکن به منظور کنترل دمای آب تغذیه مجهز شده و این مخزن نیز به وسیله یک خط لوله و یک مسیر برگشت به پمپ دستگاه متصل است.

محفظه آزمایش نیز از یک لوله عمودی با فریم‌های فولادی و مقطع مربعی به اندازه داخلی ۸ و ارتفاع ۵۰ سانتی متر تشکیل شده است که از چهار طرف دارای پنجره‌های شیشه‌ای برای مشاهده پدیده و عکس برداری است. نازل خروجی بخار نیز که در این قسمت از دستگاه قرار دارد از جنس فولاد با قطر داخلی ۷,۱ میلی متر بوده و برای عکس‌برداری از دوربینی سرعت بالا با مدل GRAS-03K2C-C ساخت شرکت Point Grey استفاده شده است که برای عکس‌برداری از پدیده، بر روی سرعت ۱۰۰ فریم بر ثانیه تنظیم شده است.



جهت انجام آزمایش‌ها، ابتدا به وسیله گرمکن، آب درون منبع به دمای مورد نظر رسانده شده و سپس آب تغذیه به وسیله پمپ به محفظه آزمایش انتقال داده می‌شود. پس از آن، با باز کردن شیر خروجی دیگ بخار، آب و هوای داخل لوله ها خالی شده و سپس بخار به صورت اشباع به داخل محفظه، تزریق می‌گردد و در همین حین نیز به وسیله دوربین از پدیده عکس گرفته می‌شود. شرایط آزمایش در پژوهش حاضر در جدول ۱ ارائه شده است.

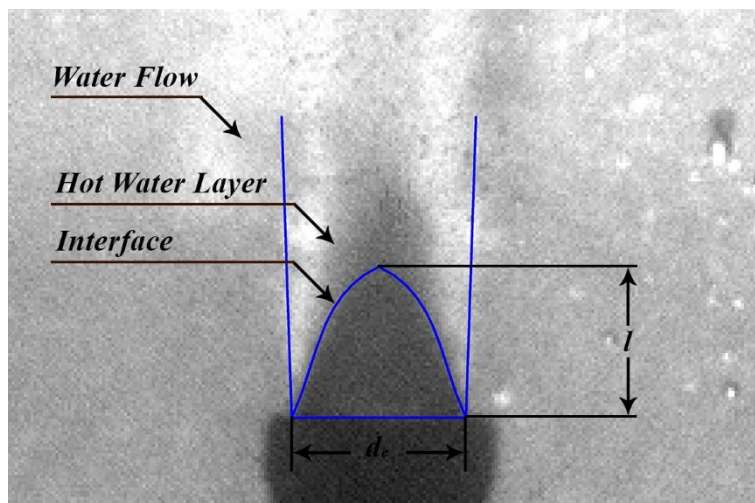
جدول ۱- شرایط آزمایش

پارامتر	بازه
فشار ورودی بخار	0.05 - 0.4 Mpa
دمای بخار ورودی	108 - 146 °C
شار جرمی بخار	200 - 540 kg/m <sup>2</sup> .s
دبی جریان آب	1 - 7 m <sup>3</sup> /hr
دمای آب	20 - 50 °C
قطر داخلی نازل	7.1 mm

### ۳. نواحی و رژیم های مختلف پدیده چگالش تماس مستقیم

#### - نواحی مختلف پدیده چگالش تماس مستقیم

صرف نظر از این که پدیده چگالش تماس مستقیم در آب چگونه و با چه شکل توده بخاری اتفاق می‌افتد، تزریق بخار درون آب دارای چهار ناحیه متمایز است که در شکل ۲ نشان داده شده است. اولین ناحیه که در خروجی نازل تشکیل می‌گردد، بخار خالص است که به توده بخار معروف است. سطح خارجی توده بخار نیز که چگالش بخار از آنجا آغاز می‌گردد، سطح مشترک فازها نام دارد. در این ناحیه، بخار تزریق شده به آب گرمای خود را به آب انتقال می‌دهد و باعث ایجاد ناحیه سوم می‌گردد. ناحیه سوم که به ناحیه دوفازی شناخته می‌شود، مخلوطی از حباب‌های بخار و آب گرم است که این آب گرم محصول چگالش در ناحیه دوم است. در پایان نیز ناحیه چهارم، که جریان آب می‌باشد را می‌توان مشاهده کرد.



شکل ۲- نواحی مختلف در پدیده چگالش تماس مستقیم جت بخار در جریان آب

توده بخار اولین ناحیه‌ای است که بلافاصله پس از خروجی نازل تشکیل می‌شود و با تقریب بالایی می‌توان آن را بخار خالص در نظر گرفت. این ناحیه، بسته به شرایط جریان، شکل‌های مختلفی به خود می‌گیرد. با توجه به آزمایش‌های انجام شده، شکل‌ها متفاوتی مشاهده می‌شود. این شکل‌ها می‌توانند یا به صورت یک شکل هندسی قابل تشخیص از قبیل نیم کره‌ای، مخروطی، استوانه‌ای و واگرا و یا این که به صورت یک حباب یا به صورت یک توده کوچک با سطح نوسانی در خروجی نازل باشند.

سطح مشترک بین فازها دومین ناحیه در این پدیده است که سطح خارجی توده بخار را در بر می‌گیرد. این ناحیه به عنوان مرزی بین توده بخار و آب گرم اطراف آن است و پدیده چگالش که شامل انتقال حرارت و انتقال جرم است، در این مرز اتفاق می‌افتد. گستردگی این ناحیه به میزان بخار تزریق شده به آب وابسته است و از طرفی این ناحیه را نمی‌توان به صورت قطعی تشخیص داد. این ناحیه به گردابه‌های ایجاد شده و دمای آب اطراف توده بخار بستگی دارد. با تشخیص این مرز می‌توان طول توده بخار را اندازه‌گیری کرد که این امر با استفاده از دوربین سرعت بالا امکان پذیر می‌باشد.

اندازه سطح مشترک فازها هم به نرخ چگالش وابسته بوده و هم بر این نرخ تاثیر گذار است. اگر سطح مشترک فازها کوچک باشد انتقال جرم و حرارت نیز کم است و چگالش با سرعت پایینی رخ می‌دهد. اما اگر توده بخار بزرگ باشد، اندازه سطح مشترک فازها نیز بزرگ بوده و نرخ چگالش افزایش می‌ابد. چگالش سریع از طریق سطح مشترک فازها باعث ناپایداری توده بخار و در نتیجه فروپاشی حبابها می‌شود که به دلیل کافی نبودن میزان بخار نسبت به نرخ چگالش می‌باشد.

ناحیه سوم که در مجاورت سطح مشترک فازها قرار دارد ناحیه دوفازی است که در آن آب گرم و حباب‌های بخار که در نزدیکی دمای اشباع قرار دارند و دارای حرکت توربولانسی است، قرار دارد. این حرکت توربولانسی که از چگالش بخار ناشی می‌گردد تاثیر بسزایی بر شکل‌گیری سطح مشترک فازها و چگالش آن از این طریق دارد.

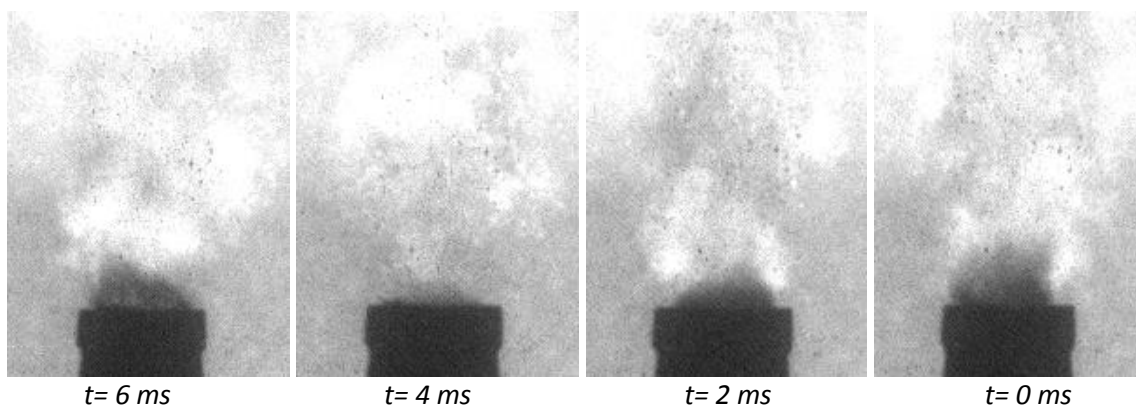
در ناحیه چهارم شامل آب در حال جریان یا ساکن که توده بخار و ناحیه آب گرم را دربر گرفته است، می‌باشد. سرعت آب در این ناحیه به صورت مستقیم بر حرکت اغتشاشی ناحیه آب گرم و در نتیجه بر شکل توده بخار و ضریب انتقال حرارت موثر است. این ناحیه بسته به شرایط جریان می‌تواند یک فاز و یا دوفاز متشکل از آب و حبابهای چگالش نیافته بخار باشد. مشاهدات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که این ناحیه به صورت مستقیم تحت تاثیر تشکیل و فروپاشی توده بخار که منتج شده از فشار نوسانی در آب است می‌باشد.

#### - رژیم‌های جریان چگالش تماس مستقیم

رفتار دینامیکی و هندسی شکل توده بخار خود به سه رژیم اصلی تقسیم بندی می‌شود: (۱) رژیم خفگی، (۲) جت پایدار، (۳) رژیم نوسانی.

##### ۱. رژیم خفگی

این رژیم معمولا در دماهای آب کم و دبی‌های پایین بخار، هنگامی که رینولدز آب بالا است، اتفاق می‌افتد. از ویژگی‌های این رژیم می‌توان به این موضوع اشاره کرد که توده بخار به شدت به نازل خروجی نزدیک بوده و تقریبا مسطح است. همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، در این نوع رژیم معمولا توده بخار به صورت پیوسته به بیرون از نازل و داخل آن در حال حرکت است و علت آن این است که نرخ بخار تزریق شده به آب از نرخ چگالش کمتر بوده و لذا آب اطراف به درون نازل تزریق وارد می‌گردد.



شکل ۳- نمایش رژیم خفگی در بازه ۶ ms در دمای ۲۰°C، در جریان آب با رینولدز ۲۳۸۶۷ و دبی جرمی بخار ۲۴۰ kg/m<sup>2</sup>s

۲. جت پایدار:

برای نرخ های بالاتر جریان ورودی بخار، ناحیه توده بخار، شکل و طول هندسی تقریباً ثابتی را به خود می گیرد. این نوع از چگالش جت پایدار نامیده می شود، که شکل و اندازه آن بستگی به شرایط کاری جریان دارد. به طور کلی، توده بخار چهار شکل اصلی به خود می گیرد که شامل شکل های نیم کره ای، مخروطی، استوانه ای و واگرا می باشد.

۳. رژیم نوسانی:

معمولاً در دماهای پایین آب تغذیه و دبی های پایین بخار تزریقی به محفظه اختلاط، جت بخار دارای سطح مشترک فازها مشخص و پایداری است. ولی در دماهای بالای آب این سطح به صورت نوسانی و ناپایدار شکل می گیرد. در این شرایط مرز بین توده بخار و ناحیه آب گرم دیگر پایدار نبوده و دارای حرکت نوسانی رفت و برگشتی می باشد. این پدیده که در آن توده بخار دارای طول پایداری نبوده و حرکت رفت و برگشتی دارد، به رژیم نوسانی معروف است.

۴. نتایج و بحث

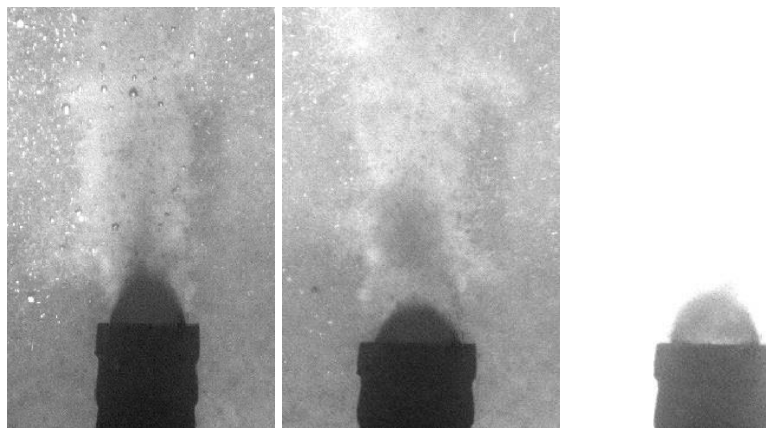
– طول توده

هنگامی که بخار به داخل جریان آب درون لوله تزریق می شود، با توجه به دبی بخار و رینولدز آب در حال جریان و همچنین دمای آب ورودی به محفظه اختلاط، شکل توده بخار و طول آن متفاوت است. در این پژوهش چهار نوع شکل توده بخار که عبارت است از کروی، مخروطی، استوانه ای و واگرا مشاهده شد.

(۱) توده نیم کره ای: این توده، همانطور که در شکل ۴ مشاهده می شود، دارای شکل هندسی نیم کره ای است، به این معنی که طول بی بعد آن از ۱ کمتر و در حدود ۰,۵ می باشد. به عبارت بهتر، طول توده از قطر خروجی نازل کوچکتر است. این شکل توده در دبی بخار و دمای پایین و در رینولدز های نسبتاً بالا شکل می گیرد و علت آن را می توان انتقال حرارت بالا در این شرایط دانست. برای مثال در دمای آب ۲۰ درجه سانتی گراد و فشار بخار ۰,۶ بار در رینولدزهای ۱۳۸۳۶ تا ۱۷۲۹۵ این شکل توده مشاهده شد که در این شرایط طول بی بعد برای رینولدز ۱۳۸۳۶ برابر ۰,۶۵ و برای رینولدز ۱۷۲۹۵ برابر ۰,۵ بوده است.



با افزایش دمای آب به علت کاهش انتقال حرارت، طول بی بعد توده بخار افزایش می‌یابد که این خود باعث می‌شود حالت کروی در تمامی دماهای آب مشاهده نگردد.



شکل ۴- شکل نیم کره‌ای توده بخار در دمای  $20^{\circ}\text{C}$ ، در جریان آب با رینولدز  $13836$  و دبی جرمی بخار  $200 \text{ kg/m}^2\text{s}$

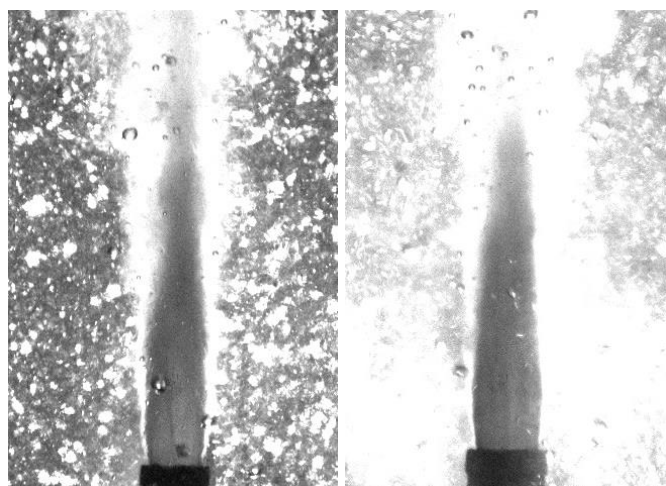
توده مخروطی: این توده، که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، دارای شکل هندسی شبیه به مخروط است. به عبارت بهتر در این شکل توده اگر سطح خروجی نازل به عنوان قاعده یک مخروط در نظر گرفته شود، توده بخار پس از آن قطرش رفته رفته کاهش یافته تا در پایان از دوطرف تنها به یک نقطه برسد. این شکل توده رایج‌ترین شکل توده مشاهده شده در این پژوهش آزمایشگاهی بود؛ به قسمی که در اکثر فشارهای آزمایش می‌توان این شکل را مشاهده کرد. انباشتگی بیشتر این پدیده در فشارهای متوسط و شارهای جریان جرمی بخار متوسط بود. هرچند در این فشارها و شارها در رینولدزهای بالا توده‌های کروی، خفگی و حبابی و در رینولدزهای خیلی پایین توده‌ای استوانه‌ای نیز مشاهده گردید.

در این حالت نیز در شار جرمی و رینولدز ثابت، با افزایش دمای آب ورودی به محفظه اختلاط طول بی بعد توده بخار افزایش می‌یابد؛ به نوعی که برای مثال، اگر در شار جرمی و رینولدز مشخصی برای آب  $20$  درجه سانتی گراد توده مخروطی مشاهده شود، برای دمای  $40$  یا  $50$  درجه حالت استوانه‌ای یا واگرا قابل مشاهده می‌باشد و علت آن نیز می‌تواند کاهش انتقال حرارت و در نتیجه نفوذ بیشتر توده بخار درون آب باشد.



شکل ۵- شکل مخروطی توده بخار در دمای  $20^{\circ}\text{C}$ ، در جریان آب با رینولدز ۱۳۸۳۶ و دبی جرمی بخار  $430 \text{ kg/m}^2\text{s}$

۳) توده استوانه‌ای: همان طور که از اسم این شکل توده پیدا است و در شکل ۶ مشاهده می‌شود، توده به شکل استوانه نزدیک است و به عبارت بهتر در دهانه خروجی نازل توده بخار در ابتدا بشکل استوانه ای در آب نفوذ می‌کند و تنها در نزدیکی انتهای آن، دو سمت این توده به یکدیگر میل می‌کنند. این شکل توده اکثرا در رینولدزهای پایین و همچنین شارهای جرمی بخار بالا اتفاق می‌افتد. علت این پدیده می‌تواند این باشد که در شارهای جرمی بالا توده آب اطراف توده بخار گرم می‌شود و لذا انتقال حرارت کاهش می‌یابد و در نتیجه نفوذ توده بخار در آب بیشتر می‌شود.

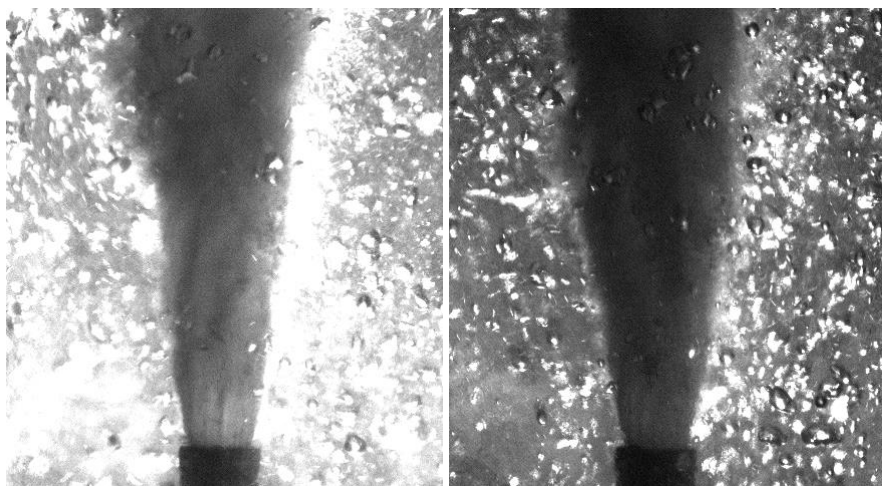


شکل ۶- شکل استوانه‌ای توده بخار در دمای  $20^{\circ}\text{C}$ ، در جریان آب با رینولدز ۳۴۵۹ و دبی جرمی بخار  $430 \text{ kg/m}^2\text{s}$

۴) توده واگرا: در این نوع شکل توده، مطابق شکل ۷، دیگر شکل خاصی مشاهده نمی‌شود و پخش‌شوندگی توده بخار درون جریان از خصوصیات اصلی آن است. این الگو اکثرا در شارهای بالای بخار و رینولدزهای پایین

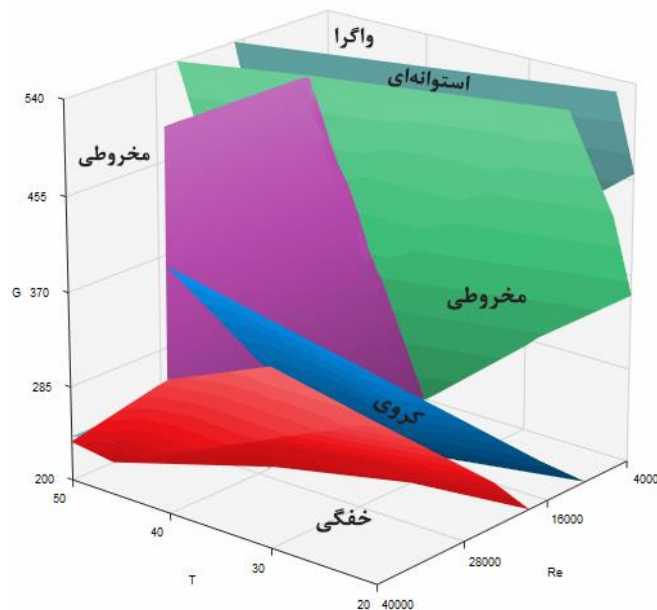
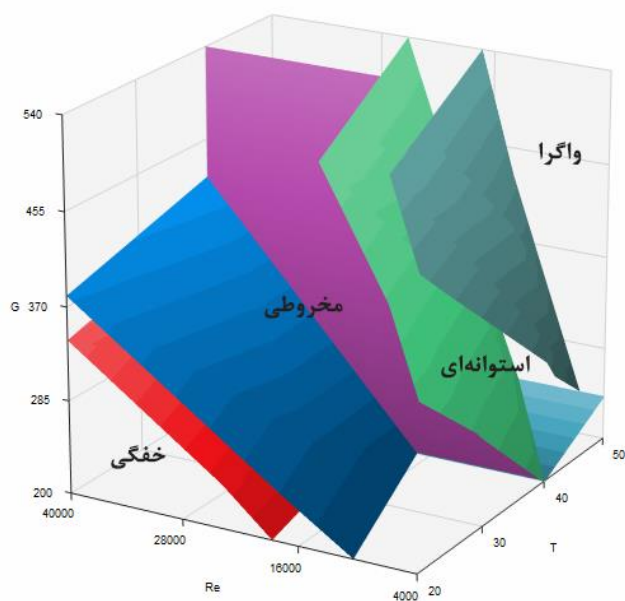
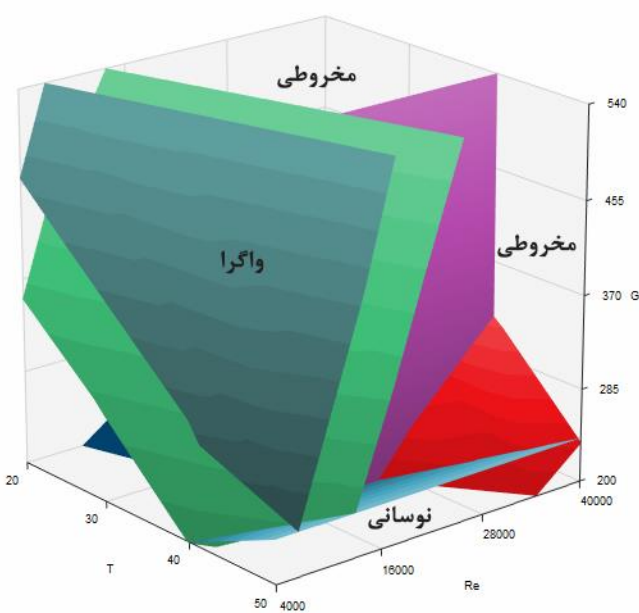
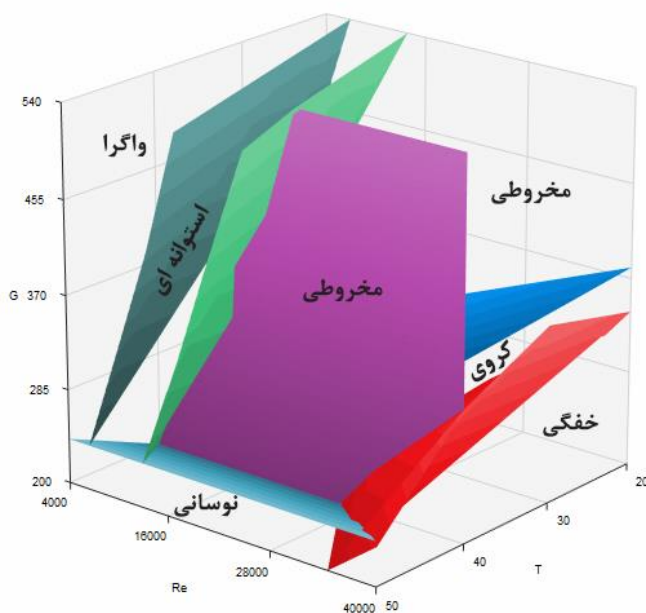


مشاهده می‌شود و علت اصلی آن نیز کمتر بودن نرخ چگالش نسبت به نرخ ورودی بخار و کاهش شدید انتقال حرارت است که در ابتدا باعث افزایش شدید طول و کاهش بیشتر آن سبب واگرایی جریان می‌گردد. افزایش دمای آب ورودی نیز یکی از شرایط مهم تشکیل این شکل توده می‌باشد؛ به صورتی که با افزایش این دما در رینولدزهای بالاتری هم این پدیده مشاهده می‌گردد.



شکل ۷- شکل واگرای توده بخار در دمای  $50^{\circ}\text{C}$ ، در جریان آب با رینولدز  $10377$  و دبی جرمی بخار  $\text{kg/m}^2\text{s}$   $540$

همان طور که بیان شد، شکل توده بخار در اکثر پژوهش‌های گذشته تابعی از دبی جرمی بخار و دمای آب در نظر گرفته می‌شد. البته این باور به این علت بود که بخار عمدتاً در آب ساکن درون استخر تزریق می‌شد و لذا غیر از این دو متغیر، پارامتر دیگری موجود نبود. هنگامی که بخار به جریان آب تزریق می‌شود، عامل دیگری نیز در تشکیل توده بخار و شکل توده تاثیر گذار است. این عامل سرعت جریان آب است که با عدد رینولدز بیان می‌شود. با توجه به آزمایش‌ها این مساله دریافت می‌شود که در شرایط دبی بخار و دمای آب یکسان و رینولدزهای متفاوت شکل توده بخار نیز متفاوت است. برای مثال در دمای آب  $20^{\circ}\text{C}$  و شار جرمی بخار  $\text{kg/m}^2\text{s}$   $540$  و جریان آب با رینولدز  $17295$  توده مخروطی قابل مشاهده است. این درحالی است که در همین شرایط دمایی آب و شار جرمی بخار اما در رینولدزهای  $10377$  و  $3459$  به ترتیب توده‌های استوانه‌ای و واگرا مشاهده می‌شود. به همین علت، برای پیش‌بینی شکل توده بخار در جریان آب نیاز است نموداری پیشنهاد گردد که این سه عامل را به یکدیگر مرتبط کند. برای این منظور نموداری سه بعدی که دارای سه محور شار جرمی بخار، دمای آب و رینولدز جریان آب می‌باشد ارائه می‌شود که در شکل ۸ نشان داده شده است. این نمودار نحوه پراکندگی رژیم‌های چگالش مختلف را تحت شرایط آزمایش نشان می‌دهد. همچنین به وسیله این نمودار می‌توان مرز بین رژیم‌های مشاهده شده در آزمایش‌های مختلف را در شرایط مختلف جریان شاهد بود. برای مثال، در دمای آب  $30^{\circ}\text{C}$  و شار جرمی بخار  $\text{kg/m}^2\text{s}$   $300$ ، هنگامی که عدد رینولدز جریان آب از  $3500$  به سمت رینولدزهای بیشتر میل می‌کند، در ابتدا رژیم استوانه‌ای تا رینولدز  $4750$  مشاهده می‌شود. با افزایش رینولدز در همین شرایط از رینولدز  $4750$  تا  $28000$  رژیم مخروطی و پس از آن تا  $32000$  رژیم نیم کره‌ای را مشاهده می‌کنیم. پس از این رینولدز نیز رژیم خفگی رخ می‌دهد.



شکل ۸- نمودار سه بعدی رژیم چگالش جت بخار در جریان آب در لوله عمودی

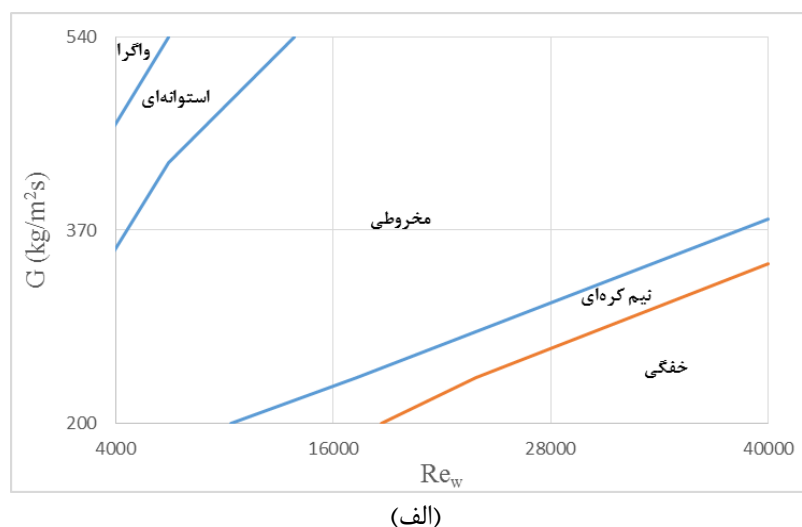
در این پژوهش آزمایشگاهی شش رژیم مختلف توده بخار مشاهده شد. همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، رژیم خفگی در جریان آب با رینولدزهای بالا ( $18679 < Re < 40000$ ) و شارهای گرمی جریان بخار پایین (کمتر از  $340 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ) رخ می‌دهد. همچنین رژیم نیم‌کره‌ای در ناحیه‌ای بین رژیم خفگی و مخروطی و در دماهای  $T < 40^\circ\text{C}$  رخ می‌دهد. در شارهای گرمی بخار کمتر از  $380 \text{ kg/m}^2\text{s}$  و رینولدزهای نسبتاً بالا ( $10377 < Re < 40000$ ) رژیم مخروطی، اصلی‌ترین بخش نمودار رژیم چگالش را تشکیل می‌دهد؛ به طوری که بخش عمده‌ای از این پدیده را در بازه بزرگی از شرایط آزمایش شامل می‌شود. پس از آن رژیم استوانه‌ای می‌باشد که در تمامی دماهای آزمایش و رینولدزهای متوسط ( $3500 < Re < 25156$ ) و شارهای گرمی جریان  $240 \text{ kg/m}^2\text{s} < G < 540 \text{ kg/m}^2\text{s}$  پدید

می آید. شکل توده واگرا نیز در جریان آب با رینولدزهای تقریباً پایین ( $3500 < Re < 17295$ ) و شارهای جرمی بخار بالا پدیدار می شود. در پایان نیز رژیم نوسانی می باشد که در دماهای بالا یعنی  $40^{\circ}C < T < 50^{\circ}C$  و در تمامی رینولدزها  $3500 < Re < 40000$  و شارهای جرمی پایین  $200 \text{ kg/m}^2\text{s} < G < 240 \text{ kg/m}^2\text{s}$  با توجه به نمودار سه بعدی رژیم چگالش مشاهده گشت.

در شکل ۹ مقاطع دما ثابت نمودار رژیم چگالش در دماهای ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درجه سلسیوس نشان داده شده اند. با توجه به این شکل ها می توان متوجه شد که در دمای  $20^{\circ}C$  و  $30^{\circ}C$  پنج شکل توده خفگی، نیم کره ای، استوانه ای و واگرا مشاهده می شوند. این در حالی است که از دمای  $40^{\circ}C$  به بعد توده نیم کره ای جای خود را به توده نوسانی می دهد. همچنین افزایش دمای آب باعث می شود که در شارهای جریان بخار یکسان، هر پدیده در رینولدزهای بالاتری رخ دهد. علت این مساله می تواند این باشد که با افزایش دمای آب به علت کاهش اختلاف دما، نرخ چگالش کاهش می یابد اما در یک دبی یکسان، چون حرارت ورودی ثابت است، باید با افزایش عدد رینولدز جریان آب این کاهش را جبران کرد و در نتیجه هر پدیده در رینولدزهای بیشتری اتفاق می افتد. برای مثال در دماهای  $20^{\circ}C$  و  $30^{\circ}C$  و در شار جرمی جریان  $200 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ، پدیده خفگی به ترتیب در رینولدزهای ۱۸۶۷۹ و ۲۰۷۵۴ رخ می دهند.

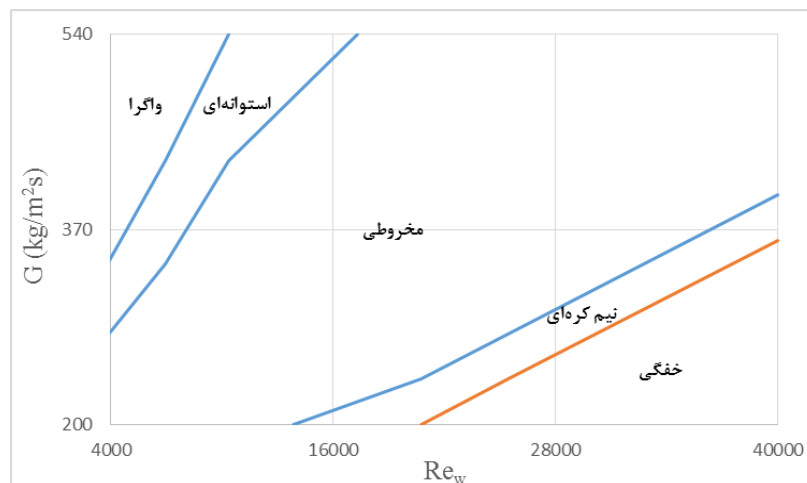
پدیده نوسانی نیز با توجه به نمودار سه بعدی رژیم چگالش از دمای  $40^{\circ}C$  به بعد شروع شده و به صورت یک صفحه شیب دار می باشد. همانطور که در نمودار دمای  $50^{\circ}C$  مشخص می شود، این پدیده در شارهای جرمی زیر  $\text{kg/m}^2\text{s}$  ۲۴۰ رخ داده و پیش بینی می شود با افزایش دما این ناحیه به طور خطی افزایش یابد.

در استفاده های صنعتی به علت این که زمان و تجهیزات بسیار مهم می باشد، استفاده از این نمودارهای پیش بینی به شدت مورد نیاز می باشد. علت این مساله این است که اگر شرایط ایجاد شده در دستگاه صنعتی مناسب نباشد، امکان صدمه زدن به دستگاه شدت می گیرد. همچنین در انجام پروژه های صنعتی عامل زمان بسیار ضروری است، لذا نمی توان آزمایش های گسترده ای برای به دست آوردن شرایط مناسب را انجام داد. لذا با استفاده از این نمودار سه بعدی رژیم چگالش به راحتی می توان شکل توده بخار و رفتار آن را بدون نیاز به آزمایش های تجربی پیش بینی کرد.

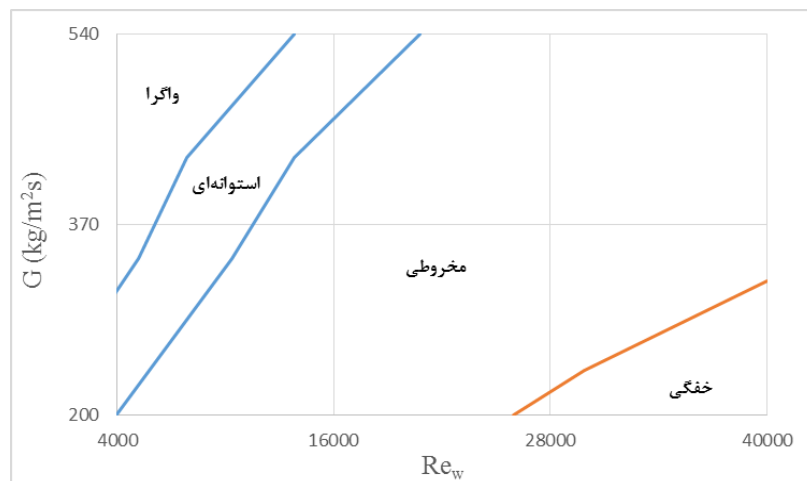


(الف)

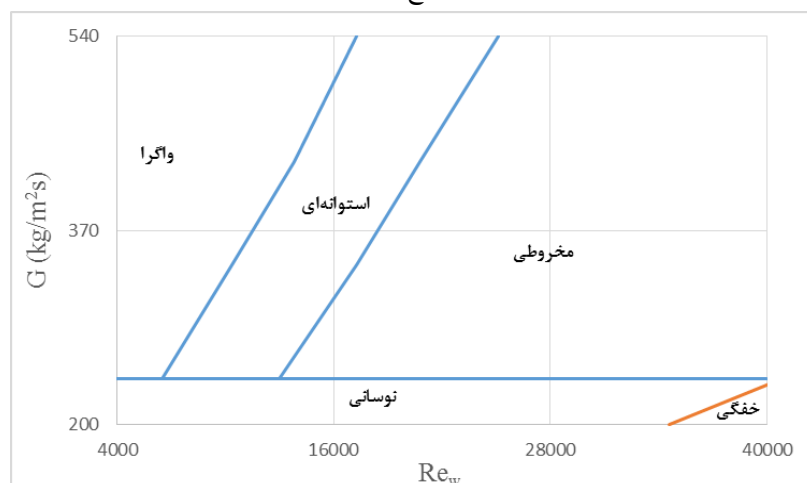




(ب)



(ج)



(د)

شکل ۹ - مقاطع دما ثابت نقشه سه بعدی رژیم چگالش (الف) دمای ۲۰°C، (ب) دمای ۳۰°C، (ج) دمای ۴۰°C، (د) دمای ۵۰°C

#### ۵. نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، آزمایش‌های بسیاری برای به دست آوردن نتایج قابل اعتماد برای پدیده چگالش تماس مستقیم بخار در جریان آب درون لوله عمودی با مقطع مربعی و با استفاده از دوربین سرعت بالا انجام گردید که در طی آن، سه رژیم مختلف، شامل رژیم خفگی، جت پایدار و رژیم نوسانی مشاهده شد. همچنین مشخص شد که توزیع آنها تابع سه عامل شار جرمی بخار، دمای آب و رینولدز جریان است که این توزیع به صورت نمودار سه بعدی رژیم چگالش که محدوده وسیعی از شرایط جریان در تزریق کننده بخار را در بر می‌گیرد مشخص گردید. جت پایدار که بیشترین گستره این رژیم‌ها را در بر می‌گیرد از چهار حالت مختلف نیم کره‌ای، مخروطی، استوانه‌ای و واگرا تشکیل شده است. پدیده خفگی نیز معمولاً در دماهای آب کم و دبی‌های پایین بخار، هنگامی که رینولدز آب بالا است، اتفاق می‌افتد. از طرفی دیگر، رژیم نوسانی در دماهای بالاتر آب تغذیه و در دبی‌های پایین بخار تزریقی مشاهده شد که در آن مرز بین توده بخار و ناحیه آب گرم چندان مشخص نبود. از نمودار سه بعدی ترسیم شده به عنوان نقشه رژیم چگالش می‌توان جهت استفاده در طراحی تجهیزات مرتبط با این پدیده استفاده کرد. همچنین پیشنهاد می‌گردد داده‌های آزمایشگاهی بیشتری جهت توسعه نقشه رژیم چگالش تماس مستقیم جت بخار در جریان آب برای بازه‌های وسیع‌تر پارامترهای موثر در این پدیده جمع‌آوری گردد.

#### ۶. مراجع

1. Kerney, P., G. Faeth, and D. Olson, *Penetration characteristics of a submerged steam jet*. AICHE Journal, 1972. **18**(3): p. 548-553.
2. Chan, C. and C. Lee, *A regime map for direct contact condensation*. International Journal of Multiphase Flow, 1982. **8**(1): p. 11-20.
3. Chun, M.-H., Y.-S. Kim, and J.-W. Park, *An investigation of direct condensation of steam jet in subcooled water*. International Communications in Heat and Mass Transfer, 1996. **23**(7): p. 947-958.
4. de With, A.P., R. Calay, and G. de With, *Three-dimensional condensation regime diagram for direct contact condensation of steam injected into water*. International journal of heat and mass transfer, 2007. **50**(9): p. 1762-1770.
5. de With, A., *Steam plume length diagram for direct contact condensation of steam injected into water*. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2009. **30**(5): p. 971-982.
6. Wu, X.-Z., et al., *Experimental study on the condensation of supersonic steam jet submerged in quiescent subcooled water: steam plume shape and heat transfer*. International Journal of Multiphase Flow, 2007. **33**(12): p. 1296-1307.
7. Wu, X.-Z., et al., *Experimental study on sonic steam jet condensation in quiescent subcooled water*. Chemical Engineering Science, 2009. **64**(23): p. 5002-5012.
8. Wu, X.-Z., et al., *Experimental investigation of over-expanded supersonic steam jet submerged in quiescent water*. Experimental Thermal and Fluid Science, 2010. **34**(1): p. 10-19.
9. Dahikar, S.K., M.J. Sathe, and J.B. Joshi, *Investigation of flow and temperature patterns in direct contact condensation using PIV, PLIF and CFD*. Chemical Engineering Science, 2010. **65**(16): p. 4606-4620.
10. Xu, Q., et al., *Experimental study on direct contact condensation of stable steam jet in water flow in a vertical pipe*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013. **66**: p. 808-817.