دانشگاه فردوسی مشهد
دانشکده مهندسی
گروه مهندسی مکانیک

عنوان پایان‌نامه:

بررسی تحلیلی تأثیر معادلات حالت و خواص ترموفیزیکال به همراه معادلات جوانه‌زایی بر جریان دوفازی مافوق صوت

مؤلف:

نیما یاسائی

ارائه شده جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی

استاد راهنما:

دکتر سید محمدرضا مه‌پیکر

شهریور ۱۳۹۰

بسم الله الرحمن الرحيم

تقدیم به:

بنده‌ی پرهیزکار خدا، منجی بزرگ، امام مهدی (عجل الله تعالی فرجه الشریف)

آنکس که روزی معنای واقعیِ آزادی، عدالت و محبت را به همه‌ی انسان‌ها هدیه خواهد کرد.

سپاسگزاری

سپاس فراوان از مادر عزیزم که برای آسایش من سختی‌های بسیاری را تحمل نمود.

سپاس بسیار از مادربزرگ مهربانم که از همه‌ی وجودش برای وجودم مایه گذاشت.

همچنین تشکر ویژه از راهنمایی‌های ارزنده‌ی استاد ارجمندم، آقای دکتر مه‌پیکر که در طی مدت انجام این پایان‌نامه از هیچ کمکی دریغ نفرمودند.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: مطالعه چگالش در جریان بخار

۱-۱) تاریخچه ۱

۱-۲) چگالش در جریان یک‌بعدی ۴

۱-۲-۱) انبساط بخار در شیپوره‌های همگرا - واگرا ۵

۱-۲-۲) رفتار جریان‌های دوفازیِ یک‌بعدی ۶

۱-۲-۳) شرایط خفگی در جریان چگالشی ۸

۱-۳) مشکلات مربوط به حضور فاز مایع در جریان بخار ۱۰

فصل دوم: بررسی تئوری جوانه‌زایی و انواع اصلاحات انجام شده روی آن

۲-۱) مقدمه ۱۵

۲-۲) جنبه‌های ترمودینامیکی جوانه‌زایی ۱۶

۲-۳) جنبه‌های سینماتیکی جوانه‌زایی ۲۰

۲-۳-۱) معادله کلی جوانه‌زایی وابسته به زمان ۲۰

۲-۳-۲) محاسبه نرخ جوانه‌زایی حالت یکنواخت ۲۳

۲-۴) تصحیحات معادله جوانه‌زایی کلاسیک ۲۵

۲-۴-۱) تصحیح کورتنی ۲۶

۲-۴-۲) تصحیح کانترویتز ۲۶

۲-۴-۳) تصحیح اثرات غیر ایزوترمال بودن جوانه‌زایی ۲۷
۲-۴-۴) تصحیح بارچدورف ۲۸
۲-۴-۵) تابع تجربی ۲۹
۲-۵) اثرات تنش سطحی، ضریب چگالش و تراکم‌پذیری مایع ۲۹
۲-۵-۱) تنش سطحی ۲۹
۲-۵-۲) ضریب چگالش ۳۰
۲-۵-۳) تراکم‌پذیری مایع ۳۱

فصل سوم: معادلات رشد، درگ و درجه‌حرارت قطره

۳-۱) مقدمه ۳۳
۳-۲) دسته‌بندی جریان به ناحیه‌های مختلف ۳۴
۳-۳) تحولات انتقال مولکولی آزاد ۳۵
۳-۴) تحولات انتقال پیوسته ۳۸
۳-۵) تحولات انتقال در لغزش و ناحیه گذر ۳۹
۳-۶) معادلات نیمه تجربی برای رشد قطره ۴۲
۳-۷) حل معادلات رشد قطره ۴۳

فصل چهارم: بررسی معادلات دینامیک گاز در جریان دوفاز

۴-۱) مقدمه ۴۷
۴-۲) معادلات دینامیک گاز جریان دوفازی ۴۸
۴-۲-۱) توسعه معادلات جریان ۴۸

۴-۲-۲) تنظیم معادلات جریان ۵۲

۴-۲-۳) انتگرال‌گیری معادلات جریان ۵۳

۴-۳) محاسبه نرخ تشکیل مایع ۵۴

۴-۴) ترکیب عبارات جریان مایع با معادلات اصلی جریان ۵۷

۴-۵) انتگرال‌گیری معادلات جریان در نقطه صوتی ۵۸

۴-۶) موقعیت نقطه صوتی در تئوری یک‌بعدی ۵۹

۴-۷) محاسبه نرخ انبساط جریان ۶۱

۴-۸) ساده کردن معادلات جریان دوفازی برای حالت تک‌فاز ۶۲

۴-۹) محاسبه دبی جرمیِ عبورکننده از شیپوره ۶۳

۴-۱۰) عملکرد شیپوره‌های همگرا - واگرا در جریان تک‌فاز ۶۴

فصل پنجم: بررسی تأثیر معادلات حالت و خواص ترموفیزیکال به همراه معادلات جوانه‌زایی بر جریان دوفازیِ مافوق صوت با تمرکز بر روابط جداول بخار ASME سال ۲۰۰۶ (بخش اصلی پایان‌نامه)

۵-۱) مقدمه ۷۰

۵-۲) فرمول‌های خواص ترمودینامیکی ۷۲

۵-۲-۱) خواص ترمودینامیکی بخار فوق گرم ۷۳

۵-۲-۲) خواص ترمودینامیکی بخار فوق سرد ۷۵

۵-۲-۳) معادله‌ی خط اشباع بخار – مایع ۷۶

۵-۳) فرمول‌های خواص انتقالی ۷۸

۵-۳-۱) کشش سطحی ۷۸

۵-۳-۲) ویسکوزیته ۷۸

۵-۳-۳) ضریب هدایت گرمایی ۸۰

۵-۴) نحوه‌ی اِعمال روابط بر اساس جداول بخار ASME در حل جریان دوفازیِ مافوق صوت ۸۲
۵-۴-۱) اِعمال معادلات حالت ۸۲
۵-۴-۲) اِعمال معادلات مربوط به خواص ترمودینامیکی ۸۶
۵-۴-۳) اِعمال معادلات مربوط به خواص انتقالی ۸۶
۵-۵) نتایج ۸۶

فصل ششم: بررسی نتایج تغییر پارامترهای اصلی (فشار، دما، اصطکاک و ...) در جریان دوفاز
۶-۱) مقدمه ۱۱۸
۶-۲) مقایسه جریان آیزنتروپیک بخار خشک با جریان دوفازی بخار - مایع در حالت بدون اصطکاک و همراه با اصطکاک ۱۲۰
۶-۳) اثر فشار سکون ورودی ۱۲۵
۶-۴) اثر دمای سکون ورودی ۱۲۶
۶-۵) اثر ضریب اصطکاک جداره ۱۲۶
۶-۶) تأثیر ضریب چگالش ۱۲۷
۶-۷) تأثیر زاویه واگرایی شیپوره ۱۲۸

فصل هفتم: نتیجه‌گیری
۷-۱) خلاصه بحث ۱۶۲
۷-۲) نتیجه‌گیری ۱۶۴

مراجع ۱۶۸

ضمائم

ضمیمه A: مطالعه خواص مایع و بخار آب در حالت واقعی

A-۱) مقدمه ۱۷۳

A-۲) معادله حالت برای بخار ۱۷۴

A-۳) خواص ترمودینامیکی بخار فوق گرم ۱۷۷

A-۳-۱) ظرفیت حرارتی در حجم ثابت ۱۷۷

A-۳-۲) ظرفیت حرارتی در فشار ثابت ۱۷۸

A-۳-۳) نمای آیزنتروپیک ۱۷۸

A-۳-۴) انتالپی و انرژی داخلی مخصوص ۱۷۹

A-۳-۵) انتروپی مخصوص ۱۷۹

A-۴) خواص اشباع ۱۸۰

A-۴-۱) مکان هندسی خط اشباع ۱۸۰

A-۴-۲) انتالپی تبخیر ۱۸۰

A-۴-۳) فشار و درجه‌حرارت اشباع ۱۸۱

A-۵) خواص مایع ۱۸۱

A-۵-۱) حجم مخصوص مایع اشباع ۱۸۱

A-۵-۲) انتالپی و انتروپی مخصوص ۱۸۲

A-۵-۳) تنش سطحی ۱۸۲

A-۶) خواص انتقال (تبدیل) ۱۸۲

A-۶-۱) ویسکوزیته دینامیکی ۱۸۲

A-۶-۲) ضریب هدایت حرارتی ۱۸۳

A-۷) خواص بخار فوق سرد ۱۸۴

ضمیمه B: برنامه کامپیوتری

B-۱) معرفی علائم و نشانه‌های بکار رفته ۱۸۵

B-۲) برنامه اصلی ۱۹۰

B-۳) سابروتین‌ها ۱۹۲

ضمیمه C: معادلات دینامیک گاز برای جریان تک فازِ همراه با اصطکاک ۲۰۱

ضمیمه D: شیپوره‌های A و B با گلوگاه تیز و پهن و شیپوره‌ی Moore ۲۰۹

علائم اختصاری

الف – علائم اختصاری انگلیسی

تعریف	علامت
سطح مقطع عرضی جریان	A
مساحت یک دسته مولکول شامل g مولکول (g-mers)	A_g
سطح مقطع واقعی گلوگاه شیپوره	A_{ta}
سطح مقطع تئوری گلوگاه شیپوره	A_{th}
ضرایب ویریال معادله حالت	B_1, B_2, B_3
سرعت صوت	C
تعداد قطرات بر واحد حجم در مقطع i	C_i
ظرفیت حرارتی مخصوص مایع	C_L
سرعت صوت بر اساس شرایط سکون	C_0
ظرفیت حرارتی مخصوص بخار در فشار ثابت	C_p
ظرفیت حرارتی مخصوص بخار در حجم ثابت	C_v
قطر هیدرولیکی کانال	D_e
ضریب اصطکاک	f
تمرکز g-mers	f_g
تغییر در انرژی آزاد گیبس هنگام تشکیل یک قطره	ΔG
تابع گیبس	g
تعداد مولکول‌ها در یک قطره مایع	g
انتالپی مخصوص	h
نرخ جوانه‌زایی بر واحد حجم	J
ضریب بولتزمن	K
عدد ندسن	K_n

انتالپی مخصوص تبخیر $(h_G - h_L)$	L
جرم یک مولکول	M
عدد ماخ	M
جرم یک قطره به شعاع r	m_r
تعداد قطرات بر واحد جرم بخار	N
تعداد قطرات بر واحد حجم بخار	n_0
تمرکز g-mers در حالت تعادلی بر واحد حجم	n_g
فشار بخار یا فشار ایستای بخار	P
فشار بخار در سطح قطره	P_D
نرخ انبساط کلی جریان (Rate of expansion) $[(1/P)(dP/dt)]$	PDOT
فشار داخلی یک قطره مایع به شعاع r	P_L
عدد پرانتل	P_r
فشار اشباع بخار در درجه حرارت T	$P_s(T)$
ضریب چگالش	q_c
ضریب تبخیر	q_e
ثابت مخصوص بخار	R
شعاع قطره	r
نسبت فوق اشباع (Ratio of Supersaturation) $[P/P_s(T_G)]$	S
انتروپی مخصوص	s
عدد اشمیت	S_c
درجه حرارت	T
درجه حرارت اشباع بخار در فشار P	$T_s(P)$
درجه فوق سردی بخار (Degree of supercooling) $[T_s(P)-T_G]$	ΔT
زمان برحسب ثانیه	t
مدت زمانی که بخار فاصله Δx را می‌پیماید	Δt

گام زمانی برای محاسبات رشد قطره در یک المان	δt
سرعت در جهت محور کانال	u
حجم مخصوص	v
مختصات در جهت محور کانال	x
ضرایب معادله حالت واقعی	X,Y
طول المان انتخابی در جهت محور کانال	Δx
کسر رطوبت یا نسبت دبی جرمی مایع به دبی جرمی کل	y
مربع عدد ماخ	Z
فاکتور زلدویچ	Z_e
نسبت شعاع قطره به شعاع بحرانی آن	Z_r

ب – علائم اختصاری یونانی

نرخ تبخیر از g-mers	α_g
ضریب انتقال حرارت از سطح قطره به شعاع r	α_r
نرخ برخورد مولکول‌های بخار بر واحد سطح مایع	β
نمای آیزنتروپیک (نسبت ظرفیت‌های حرارتی مخصوص)	γ
تابع گیبس بدون بعد	γ
ترم بدون بعدِ گاز ایده‌آل	γ^0
ترم بدون بعدِ باقیمانده	γ^r
کسر خشکی یا نسبت دبی جرمی بخار به دبی جرمی کل	ζ
متوسط مسیر آزاد مولکولی بخار (پویش آزاد)	$\bar{\imath}$
ضریب هدایت حرارتی بخار	λ
ویسکوزیته دینامیکی	μ
عدد پی	π
دانسیته	ρ

دانسیته متقابل با فشار اشباع در درجه حرارت T_L روی یک سطح منحنی به شعاع r	$\rho_s(T_L,r)$
تنش (کشش) سطحی آب	σ
زمان فاز گذرای جوانه‌زایی	τ
فاکتور تصحیح اثرات غیر ایزوترمال بودن جوانه‌زایی	φ
سرعت بالک	ω

ج – زیرنویس‌ها

بحرانی بخار	c
خروجی از المان	e
فاز بخار	G
یک دسته شامل g مولکول (g-mers)	g
وجه میانی ناحیه مولکولی آزاد و جریان پیوسته	i
ورودی به المان	i
فاز مایع	L
سکون	0
قطره به شعاع r	r
اشباع	s
در زمان t	t
در زمان $t+\Delta t$	$t+\Delta t$
بحرانی	*
برای سطح بدون انحنا یا صفحه تخت	∞

د – بالانویس‌ها

مقدار متوسط یک متغیر	–

چکیده

یکی از مهمترین کاربردهای جریان دوفازی، جریان در پره‌های توربین بخار می‌باشد. بخار فوق گرم پس از عبور از پره‌های توربین، در طبقات کم‌فشار به حالت دوفازی درآمده و قطرات مایع در آن ظاهر می‌گردد. حضور فاز مایع باعث تلفات مختلف شامل تلفات مکانیکی، ترمودینامیکی و آیرودینامیکی می‌شود و لذا راندمان توربین را کاهش می‌دهد.

جریان در توربین‌های بخار معمولاً با یک نازل همگرا- واگرا شبیه‌سازی می‌شود. بخار خشک وارد قسمت همگرا شده و در قسمت همگرا همچنان خشک باقی می‌ماند. در قسمت واگرا مافوق صوت می‌شود و در اثر انبساط به حالت اشباع می‌رسد، ولی به دلیل سرعت بالای جریان فرصت مایع شدن پیدا نمی‌کند و بدین ترتیب بخار فوق سرد ایجاد می‌گردد. بخار فوق سرد در نقطه‌ی ویلسون شروع به جوانه‌زایی کرده قطرات مایع ظاهر می‌شود. گرمای نهانِ حاصل از تقطیرِ بخار ابتدا به قطره می‌رسد و سپس به بخار برگشت می‌نماید و همین موضوع باعث ایجاد شوک میعان و افزایش انتروپی می‌گردد. موقعیت شوک میعان به عوامل مختلف شامل شرایط ورودی جریان (فشار، دما و ...)، ضریب اصطکاک، ضریب چگالش، هندسه شیپوره، معادله حالت مورد استفاده و معادله جوانه‌زایی بستگی دارد.

در پایان‌نامه حاضر از معادله حالت جدید برای بخار آب (بخار فوق گرم و فوق سرد بطور مجزا) و همچنین از معادلات جدید برای خواص ترموفیزیکال آب و بخار (معادلات بر اساس جدول بخار ASME سال ۲۰۰۶) در حل جریان استفاده شد و نتایج حاصل از آن با نتایج قبلی (معادلات مرسوم ویریالی) مقایسه گردید. مشاهده شد در فشار و دمای سکونِ ورودی کمتر از ۱,۵ بار و ۴۰۰ کلوین، معادلات بر اساس جدول بخار ASME سال ۲۰۰۶ و در غیر این شرایط، معادلات ویریالی برای شبیه‌سازیِ جریان دوفازی مناسب‌تر هستند. همچنین به منظور بررسیِ تأثیر معادله جوانه‌زایی بر جریان دوفازی، دو معادله-ی جوانه‌زاییِ مختلف (استاندارد و تابع تجربی وُلک) با هم مقایسه شد و معلوم گردید معادله جوانه‌زاییِ استاندارد همراه با تصحیحات لازم، انطباق بهتری با واقعیت دارد.

Abstract

One of the most important functions of two-phase flow is flow in blades of vapor turbine. After passing of superheated vapor through turbine blades, at low-pressure stages, vapor changes into two-phase state and liquid droplets appear. The appearance of liquid phase cause different losses including mechanical, thermodynamic and aerodynamic losses and then, turbine efficiency decreases.

Flow in vapor turbines is usually simulated with a convergent-divergent nozzle. Dry vapor enters converging section and remains dry in this section. In diverging section, vapor becomes supersonic and expands to saturation state but, it can't be liquid because of highness of flow velocity and then, supercooled vapor is produced. The supercooled vapor starts to nucleate at Wilson point, so liquid droplets appear. The latent heat due to vapor condensation first is added to the droplets and next, is rejected to the vapor. This matter cause a condensation shock and entropy increase in the flow. The shock position depends on various parameters such as inlet conditions, friction factor, condensation coefficient, nozzle geometry and state and nucleation equations.

In this thesis, new equations of state (for both superheated and supercooled vapor separately) and also new equations for thermophysical properties of water (based on ASME steam tables-2006) are used in solving the flow and relevant results are compared with previous results (based on virial eqs.). It is cleared that at inlet stagnation pressure and temperature below 1.5 bars and 400 K, ASME eqs. are better for simulating two-phase flow. Also in order to investigate the effect of nucleation equation on two-phase flow, two different nucleation equations (standard and Wolk eqs.) are campared with each other and it is determined that the standard nucleation equation with appropriate corrections has better adjustment with reality.

فصل اول

مطالعه چگالش در جریان بخار

۱-۱) تاریخچه

مطالعات درباره جریان دوفازی از سال ۱۸۷۱ آغاز شد. اولین بار نظریه به وجود آمدن حالت فوق‌اشباع[۱] در انبساط بخار توسط تامسون[۲] مطرح شد. چهار سال بعد یعنی در سال ۱۸۷۵ کلوین[۳] رابطه بین فشار بخار متعادل روی یک سطح منحنی و شعاع آن را بدست آورد و مفاهیم اساسی سیستم‌های متعادل ترمودینامیکی توسط گیبس[۴] و هلم هولتز[۵] توسعه پیدا کرد. در ۱۸۸۰ آتکن[۶] مشاهده کرد که در هوای اشباع شده با بخار آب، ذرات خارجی و غبار موجود در جریان به عنوان هسته چگالش[۷] عمل می‌کند. در سال ۱۸۸۶ ون هلم هولتز تأثیر ذرات یونیزه شده را روی انبساط بخار آبی که از یک شکاف باریک به داخل هوا تخلیه می‌شد بیان کرد. برای اولین بار ویلسون[۸] در سال ۱۸۹۷ یک مطالعه مفصل روی پدیده چگالش انجام داد [۱]. بر اساس مشاهدات او در هوای اشباع شده با بخار آب بدون وجود هسته و ذرات خارجی می‌توانست چگالش و تشکیل قطرات آب صورت گیرد. او نسبت فشار بخار P به

---

1. Supersaturation.
2. Thompson.
3. Kelvin.
4. Gibbs.
5. Helmholtz.
6. Aitken.
7. Condensation.
8. Wilson.

فشار اشباع متقابل با درجه حرارت محلی بخار $P_s(T_G)$ را به عنوان انحراف سیال از حالت تعادلی آن معرفی نموده و آن را نسبت فوق اشباع[۱] S نامید. یعنی:

$$S = \frac{P}{P_s(T_G)} \qquad (۱-۱)$$

سپس توسط هرتز[۲] و ندسن[۳] توصیف ریاضی چگالش روی یک قطره و یا تبخیر از آن فرموله شد. در سال ۱۹۱۳، هندرسون[۴] [۲] گزارش داد که هنگام تخلیه بخار در نازل‌ها، انبساط در ناحیه مرطوب دیاگرام مولیر ۵٪ بیشتر از چیزی است که توسط محاسبات تعادلی انتظار می‌رفت و بدنبال آن استودولا[۵] با ذکر تجربیات بندمن[۶] بیان کرد که تخلیه ابتدایی بخار اشباع شده خشک مشابه حالت انبساط کاملاً خشک است [۳]. کالندر[۷] با استفاده از رابطه کلوین - هلم هولتز اندازه قطره را تعیین و در مورد اثرات فوق اشباع توضیحات مفصل‌تری ارائه داد. درسال ۱۹۱۸ خط ویلسون[۸] توسط مارتین[۹] بر روی دیاگرام مولیر رسم شد و انتهای محدوده فوق اشباع محاسبه گردید.

سال‌ها بعد پدیده چگالش در شیپوره‌های همگرا - واگرا توسط یلوت[۱۰] (۱۹۳۴)، رتالیاتا[۱۱] (۱۹۳۶)، یلوت و هالند[۱۲] (۱۹۳۷) توسعه یافت. این محققان پیشنهاد کردند که ناحیه ویلسون جایگزین خط ویلسون شود. آنها معتقد بودند که انتهای محدوده فوق اشباع به شکل نازل و شرایط تجربی بستگی دارد. سپس در ۱۹۳۸ بی‌نی[۱۳] و وودس[۱۴] و همچنین بی‌نی و گرین[۱۵] (۱۹۴۳) توزیع فشار محوری در جریان دوفازی بخار - مایع را در طول یک شیپوره همگرا - واگرا اندازه‌گیری کردند.

---

1. Ratio of supersaturation.
2. Hertz.
3. Knudsen.
4. Henderson.
5. Stodola.
6. Bendemann.
7. Callender.
8. Wilson line.
9. Martin.
10. Yellot.
11. Retta liata.
12. Holland.
13. Binnie.
14. Woods.
15. Green.

در سال ۱۹۴۲ برای اولین بار تئوری جوانه‌زایی با معادلات دینامیک گاز توسط اسواتیچ[۱] ترکیب شد. او روش را برای چند نوع جریان چگالش آب داخل نازل‌ها، هم با بخار خالص و هم با هوای اتمسفریک بکار برد و اظهار داشت که توافق خوبی با مشاهدات تجربی حاصل شده است.

همزمان با پیشرفت بیشتر توربین‌های بخار و استفاده وسیع‌تر از آنها، پدیده چگالش و حضور فاز مایع در طبقات کم فشار توربین بصورت یکی از مشکلات اساسی درآمد. این پدیده مزاحم باعث خوردگی و فرسایش پره‌های توربین می‌شد، اما پس از جنگ جهانی دوم با معرفی سیکل دوباره گرم‌کن[۲] این مشکلات بطور موقت کمتر شدند. با توسعه طبقات بیشتر در توربین و ساختار تصاعدی واحدهای بزرگتر و همچنین افزایش سرعت پره، یک تجدید نظر جالب در مشکلات ناشی از حضور رطوبت به وجود آمد. جرماسی[۳] [۴] (۱۹۶۲)، پورینگ[۴] [۵] (۱۹۶۵)، هیل[۵] [۶] (۱۹۶۶)، پوزیرسکی[۶] [۷] (۱۹۶۹)، وگنر[۷] (۱۹۶۹) ، کمپبل[۸] و باختر[۹] [۸] [۹] (۱۹۷۰)، بارچدورف[۱۰] [۱۰] (۱۹۷۰) ، یوسیف[۱۱] و کمپبل [۱۱] (۱۹۷۲)، باختر، تابمن[۱۲]، رایلی[۱۳] و یانگ[۱۴] [۱۲] (۱۹۷۵)، موزز[۱۵] و اِستین[۱۶] [۱۳] (۱۹۷۸) و غیره از جمله محققانی هستند که میدان جریان را مورد بررسی و مطالعه قرار دادند.

تحقیقات بیشتر در ارتباط با تونل باد مافوق صوت توسط محققان دیگر از قبیل هِد[۱۷]، پروبستین[۱۸] و رادبون و اِستِور[۱۹] [۱۴] انجام شد. همچنین بررسی‌های دقیق‌تری برای اندازه‌گیری اندازه قطرات بوجود

---

1. Oswatitsch.
2. Reheat cycle.
3. Gyarmathy.
4. Pouring.
5. Hill.
6. Puzyrewski.
7. Wegener.
8. Compbell.
9. Bakhtar.
10. Barschdroff.
11. Yousif.
12. Tabman.
13. Ryley.
14. Young.
15. Moses.
16. Stein.
17. Head.
18. Probstein.
19. Rathbun & Stever.

آمده در اثر چگالش انجام گرفت، محققان مختلفی از جمله جرماسی و میر[۱] (۱۹۶۵) ، کرول[۲] (۱۹۷۱) ، دیچ[۳] [۱۵]، به مقایسه حل‌های تئوری با نتایج تجربی پرداختند.

با ظهور راکتور هسته‌ای خنک شونده با آب[۴]، مشکلات مربوط به حضور مایع در بخار فشار بالا حالت جدی‌تری به خود گرفت. پدیده چگالش تحت این شرایط توسط جرماسی (۱۹۷۳)، باختر و همکاران[۵] (۱۹۷۵-۱۹۷۹)، فیلیپو[۶] (۱۹۸۰) و اسکایلینگس[۷] [۱۶] (۱۹۸۹) مورد بررسی قرار گرفت.

۱-۲) چگالش در جریان یک‌بعدی

با وجود اینکه پدیده چگالش در جریان بخار هنوز بطور کامل فهمیده نشده بود، خط ویلسون و ناحیه بعد از آن برای توصیف شرایط حدی تحول، فرموله شد. همچنین در جریان پیشرفت تئوری جوانه‌زایی[۸] ابتدا رفتار تحلیلی جریان‌های چگالشی[۹] توسط اسواتیچ [۱۷] (۱۹۴۲) بیان گردید.

عبور جریان از میان پره‌های توربین در حالت واقعی بصورت سه بعدی است و بنابراین بررسی دقیق پدیده چگالش و اثرات بخارِ تر داخل توربین‌ها نیاز به بسط معادلات در میدان‌های دو و سه‌بعدی دارد. از آنجایی که تحلیل چنین جریان‌هایی بسیار مشکل و پیچیده بوده و بدون ساده‌سازی امکان‌پذیر نمی‌باشد، لذا عموماً فرآیند چگالش داخل توربین از طریق مشاهده عملکرد جریان تراکم‌پذیر یک‌بعدی در شیپوره‌های همگرا - واگرا مورد مطالعه و بررسی قرار می‌گیرد. در بخش‌های زیر به تشریح چنین جریان-هایی پرداخته می‌شود.

---

1. Meyer.
2. Krol.
3. Deich.
4. Water Cooled Nuclear Reactor.
5. Bakhtar et al.
6. Filipov.
7. Skillings.
8. Nucleation Theory.
9. Condensing flows.