



دانشگاه فردوسی مشهد  
دانشکده مهندسی

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد  
رشته مهندسی مکانیک  
( تبدیل انرژی )

عنوان:

**تعیین پارامترهای مهم پدیده جوانه زایی در جریان چگالشی بخار  
آب با بکار گیری الگوریتم ژنتیک**

تهیه و تنظیم:

علیرضا محمدی

استاد راهنما:

دکتر محمد رضا مه پیکر

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

تابستان ۱۳۸۹

## فهرست مطالب

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
	<b>فصل اول : مطالعه چگالش در جریان بخار</b>
۱	۱-۱ تاریخچه
۴	۲-۱ چگالش در جریان یک بعدی
۵	۱-۲-۱ انبساط بخار در شیپوره‌های همگرا - واگرا
۸	۲-۲-۱ مشکلات مربوط به حضور فاز مایع در جریان بخار
۱۰	۳-۲-۱ رفتار جریان های دو فازی یک بعدی
	<b>فصل دوم : بررسی معادلات حاکم بر جریان دو فازی در داخل نازل همگرا - واگرا</b>
۱۲	۱-۲ مقدمه
۱۳	۲-۲ تئوری جوانه زایی
۱۳	۱-۲-۲ جنبه‌های ترمودینامیکی جوانه‌زایی
۱۹	۲-۲-۲ جنبه‌های سینماتیکی جوانه‌زایی
۲۰	۱-۲-۲-۲ معادله کلی جوانه‌زایی وابسته به زمان
۲۳	۲-۲-۲-۲ راه حل گذرا
۲۴	۳-۲-۲-۲ راه حل حالت یکنواخت

۲۵	۳-۲-۲ تصحیحات معادله جوانه‌زایی کلاسیک
۲۵	۱-۳-۲-۲ تصحیح کورتنی
۲۶	۲-۳-۲-۲ تصحیح کانترویترز
۳۰	۳-۲ معادلات رشد قطره
۳۲	۱-۳-۲ انتقال جرم
۳۳	۲-۳-۲ انتقال انرژی
۳۵	۴-۲ بررسی معادلات دینامیک گاز در جریان دو فازی
۳۵	۱-۴-۲ معادله بقای جرم
۳۶	۲-۴-۲ معادله حالت برای بخار
۳۶	۳-۴-۲ عدد ماخ فاز بخار
۳۷	۴-۴-۲ معادله مومنتوم
۳۷	۵-۴-۲ معادله انرژی
۳۸	۶-۴-۲ تنظیم معادلات جریان

## فصل سوم :

### بررسی تاثیر تنش سطحی ، نمای آیزنتروپیک و ضریب چگالش بر جریان دوفازی

۴۱	۱-۳ مقدمه
۴۲	۲-۳ تنش سطحی
۴۳	۱-۲-۳ تئوری بنسون و شاتل ورث
۴۴	۲-۲-۳ تئوری تولمان

۵۰	۳-۲-۳ تئوری آبراهام و پوند
۵۳	۴-۲-۳ تاثیر تنش سطحی بر جریان دو فازی
۵۷	۳-۳ ضریب چگالش
۶۰	۱-۳-۳ پیش بینی های تئوریک ضرایب تغییر فاز ( ضریب چگالش و تبخیر )
۶۱	۲-۳-۳ تحلیل اطلاعات آزمایشگاهی
۶۷	۳-۳-۳ وابستگی فشار و دما
۶۸	۴-۳-۳ تاثیر ضریب چگالش بر جریان دو فازی
۷۱	۴-۳ نمای آیزنتروپیک
۷۲	۱-۴-۳ معادله حالت کنان و کیز
۷۳	۲-۴-۳ معادله حالت کنان ، کیز هیل و مور
۷۶	۳-۴-۳ معادله حالت ویریالی ووکالویچ
۷۹	۴-۴-۳ معادله حالت برای بخار مافوق سرد
۸۵	۵-۴-۳ تاثیر نمای آیزنتروپیک بر جریان دو فازی
۸۸	۵-۳ نتیجه گیری

#### فصل چهارم : الگوریتم ژنتیک و بهینه سازی چند هدفه

۹۱	۱-۴ مقدمه
۹۲	۲-۴ بهینه یابی
۹۳	۳-۴ الگوریتم های تکاملی
۹۴	۴-۴ الگوریتم ژنتیک

۹۴	۱-۴-۴ مقدمه ای بر الگوریتم ژنتیک
۹۵	۲-۴-۴ اصول الگوریتم ژنتیک
۹۸	۳-۴-۴ ساختار الگوریتم ژنتیک
۱۰۱	۴-۴-۴ عملگرهای الگوریتم ژنتیک
۱۰۱	۱-۴-۴-۴ انتخاب
۱۰۴	۲-۴-۴-۴ پیوند
۱۰۸	۳-۴-۴-۴ جهش
۱۱۰	۵-۴-۴ معیار همگرایی و شرط توقف الگوریتم ژنتیک
۱۱۰	۵-۴ بهینه سازی چند هدفه
۱۱۱	۱-۵-۴ مفاهیم بهینه یابی چند هدفه
۱۱۲	۱-۱-۵-۴ بردار هدف ایده آل
۱۱۲	۲-۱-۵-۴ برتری پرتو
۱۱۳	۳-۱-۵-۴ بهینگی پرتو
۱۱۳	۴-۱-۵-۴ مجموعه پرتو
۱۱۳	۵-۱-۵-۴ پرتو فرانت
۱۱۴	۲-۵-۴ روش مرتب سازی بر اساس معیار برتری
۱۱۶	۳-۵-۴ روش NSGA II
۱۱۶	۱-۳-۵-۴ رتبه بندی غلبه نشده
۱۱۶	۲-۳-۵-۴ فاصله ازدحام
۱۱۸	۳-۳-۵-۴ عملگر مقایسه تراکم
۱۱۹	۴-۵-۴ الگوریتم کلی برنامه در بهینه سازی چند هدفه

## فصل پنجم :

### بهینه کردن تنش سطحی ، نمای آیزنروتروپیک و ضریب چگالش با الگوریتم ژنتیک

۱۲۰	۱-۵ مقدمه
۱۲۱	۲-۵ روش بهینه سازی با الگوریتم ژنتیک
۱۲۱	۱-۲-۵ انتخاب متغیرهای بهینه سازی
۱۲۳	۲-۲-۵ انتخاب روش بهینه سازی
۱۲۳	۳-۲-۵ بهینه سازی با روش NSGA II
۱۲۳	۴-۲-۵ ایجاد جمعیت اولیه
۱۲۴	۳-۵ نتایج به دست آمده از الگوریتم ژنتیک
۱۲۵	۱-۳-۵ بهینه سازی پارامترها در صورت استفاده از معادله کلاسیک جوانه زایی به همراه دو تصحیح کورتنی و کانترویتر و بدون استفاده از تصحیح بنسون - شاتل ورث
۱۲۵	۱-۱-۳-۵ نازل C
۱۴۲	۲-۱-۳-۵ نازل B

## فصل ششم :نتیجه گیری

۱۷۲	۱-۶ خلاصه بحث
۱۷۳	۲-۶ نتیجه گیری
۱۷۷	۳-۶ پیشنهادات

پیوست ها

پیوست الف : ابعاد نازل ها و داده های تجربی مربوط به آنها

۱۸۹ الف- ۱- مشخصات نازل B

۱۹۰ الف- ۲- مشخصات نازل C

۱۹۱ الف- ۳- مقادیر تجربی نازل C

۱۹۲ الف- ۴- مقادیر تجربی نازل B

## چکیده

در نیروگاه های فسیلی در انتهای توربین های بخار LP و در نیروگاه های هسته ای از همان ابتدا در اثر انبساط بخار، دمای بخار کاهش یافته و در نتیجه بخار مافوق گرم خط اشباع را قطع کرده و وارد منطقه دو فازی می شود. به علت سرعت بالای جریان، بخار کماکان تک فاز می باشد که به این بخار، بخار مافوق سرد گفته می شود. این حالت تا خط ویلسون ادامه دارد ولی با این شرایط بخار قادر به ادامه مسیر نیست و سیال شروع به جوانه زایی می کند و بخار مافوق سرد گرمای نهان خود را از دست می دهد و قطرات مایع بسیار کوچک شکل می گیرد. جوانه زایی ارائه شده در این تحقیق، جوانه زایی همگن می باشد. در این نوع جوانه زایی چگالش ( تقطیر ) بدون وجود هیچ گونه ناخالصی و بدون داشتن هیچ گونه سطحی صورت می پذیرد. در جریان مافوق صوت اضافه شدن این حرارت به جریان باعث کاهش سرعت و افزایش فشار سیال می شود، بنابراین با یک افزایش فشار ناگهانی مواجهیم که شوک میعان نامیده می شود. این شوک منجر به مشکلاتی از قبیل خوردگی پره ها، افزایش انتروپی سیال و نهایتاً کاهش راندمان توربین می شود. بنابراین بررسی جریان دوفازی در توربین های بخار بسیار حائز اهمیت می باشد. جهت تحلیل بهتر و دقیق تر جریان دوفازی شناخت فاکتورهای موثر بر آن ضروری است. در این بین تنش سطحی، نمای آیزنتروپیک و ضریب چگالش پارامترهای بسیار مهمی در پدیده جوانه زایی و در نتیجه در جریان دوفازی می باشند که علیرغم تحقیقات فراوان هنوز مقادیر آنها قطعی نیست. در این رساله پس از انتخاب بهترین معادلات دوفازی، تاثیر این سه پارامتر بر پدیده چگالش بررسی شده و با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک مشخص می شود که تنش سطحی بالاترین تاثیر را روی جوانه زایی و چگالش دارد و تاثیر دو پارامتر دیگر محدود است. همچنین با استفاده از الگوریتم ژنتیک برای محاسبه تنش سطحی رابطه ای پیشنهاد می شود که می تواند به عنوان یک فرمول جدید مورد استفاده محققین جریان چگالشی بخار قرار گیرد و در صورت استفاده از آن نتایج تحلیلی و داده های آزمایشگاهی در هماهنگی بسیار خوبی با یکدیگر قرار می گیرند.



## Abstract

The fluid temperature in LP turbines decreases due to the steam expansion. Therefore, the superheat vapour crosses the saturation line and enters the two-phase region. Due to the high velocity of the steam flow, it is still single-phase and it is called supercooled vapour. This situation continues to reach to Wilson point, where the supercooled steam cannot continue and the fluid starts nucleating. The supercooled vapour loses its latent heat and liquid droplets with small diameters are formed. The nucleation model presented in this research is a homogeneous nucleation. In this kind of nucleation, condensation occurs without any impurity or surfaces. In the supersonic region, if the flow is heated, its velocity decreases and its pressure increases. Therefore, there is a pressure rise that is called condensation shock. The presence of condensation shock leads to problems of blade erosion, increase of the flow entropy and a loss in turbine efficiency. Therefore the study of two-phase flow is undeniably an important issue.

In order to obtain a better analysis of the two-phase flow, it is essential to understand the influence factors in this regard. Upon this research surface tension, isentropic exponent and condensation coefficient are very important parameters whose exact amount is still a debated issue.

In this thesis, Genetic Algorithm is used to study the effect of these three parameters. According to this research, the most important parameter in nucleation zone is the surface tension of the droplets. In this regard a relationship for surface tension is recommended that leads to a good agreement between theoretical results and experimental data.

## علائم اختصاری

### (A) مبحث جریان دو فازی

#### الف - علائم اختصاری انگلیسی

##### علامت

##### تعریف

A	سطح مقطع عرضی جریان
$A_g$	مساحت یک دسته مولکول شامل g مولکول (g-mers)
$B_1, B_2, B_3$	ضرایب ویريال معادله حالت
C	سرعت صوت
$C_i$	تعداد قطرات بر واحد حجم در مقطع A
$C_L$	ظرفیت حرارتی مخصوص مایع
$C_p$	ظرفیت حرارتی مخصوص بخار در فشار ثابت
$C_v$	ظرفیت حرارتی مخصوص بخار در حجم ثابت
$D_e$	قطر هیدرولیکی کانال
f	ضریب اصطکاک
$f_g$	تمرکز g-mers
$\Delta G$	تغییر در انرژی آزاد گیبس هنگام تشکیل یک قطره
g	تعداد مولکولها در یک قطره مایع
h	آنتالپی مخصوص
J	نرخ جوانه‌زایی بر واحد حجم
K	ثابت بولتزمن
$K_n$	عدد ندسن

L	آنتالپی مخصوص تبخیر ( $h_G - h_L$ )
M	جرم یک مولکول
M	عدد ماخ
$m_r$	جرم یک قطره به شعاع $r$
N	تعداد قطرات بر واحد جرم بخار
$n_1$	تعداد مونومرها بر واحد حجم بخار
$n_g$	تمرکز g-mers بر واحد حجم
P	فشار بخار یا فشار ایستای بخار
$P_S(T)$	فشار اشباع بخار در درجه حرارت T
$q_c$	ضریب چگالش
$q_e$	ضریب تبخیر
R	ثابت مخصوص بخار
r	شعاع قطره
S	نسبت فوق اشباع $\left[ \frac{P}{P_S(T_G)} \right]$ Ratio of Supersaturation
$S_c$	عدد اشمیت
T	درجه حرارت
$T_S(P)$	درجه حرارت اشباع بخار در فشار P
$\Delta T$	درجه فوق سردی یا فوق اشباع بخار $[T_S(P) - T_G]$ Degree of supercooling
t	زمان بر حسب ثانیه
u	سرعت در جهت محور کانال
v	حجم مخصوص
x	مختصات در جهت محور کانال
X, Y	ضرایب معادله واقعی حالت
$\Delta x$	طول المان انتخابی در جهت محور کانال

Z

مربع عدد ماخ

## ب - علائم اختصاری یونانی

$\alpha_r$

ضریب انتقال حرارت از سطح قطره به شعاع r

$\beta$

نرخ برخورد مولکولهای بخار بر واحد سطح مایع

$\gamma$

نمای ایزنتروپیک (نسبت ظرفیتهای حرارتی مخصوص)

$\zeta$

کسر خشکی یا نسبت دبی جرمی بخار به دبی جرمی کل

$\bar{l}$

متوسط مسیر آزاد مولکولی بخار (پویش آزاد)

$\lambda$

ضریب هدایت حرارتی بخار

$\mu$

ویسکوزیته دینامیکی

$\pi$

عدد پی

$\rho$

دانسیته

$\rho_s(T_L, r)$

دانسیته متقابل با فشار اشباع در درجه حرارت  $T_L$  روی یک سطح منحنی به شعاع r

$\sigma$

تنش (کشش) سطحی آب

$\tau$

زمان فاز گذرای جوانه‌زایی

$\phi$

فاکتور تصحیح اثرات ایزوترمال جوانه‌زایی

## ج - زیر نویسها

c

بحرانی بخار

G

فاز بخار

g

یک دسته شامل g مولکول (g-mers)

L

فاز مایع

0

سکون

r	قطره به شعاع r
s	اشباع
t	در زمان t
*	بحرانی
$\infty$	برای سطح بدون انحنا یا صفحه تخت

#### د - بالانویسها

-	مقدار متوسط یک متغیر
---	----------------------

### (B) مبحث الگوریتم ژنتیک ( فصل چهارم )

#### الف - علائم اختصاری انگلیسی

<u>علامت</u>	<u>تعریف</u>
C	فرزندان ( نسل جدید )
$d_{ij}$	پارامتر رابطه اشتراک
$F(x)$	بردار هدف
$f^0(x)$	بردار هدف ایده آل
$f_i$	برازندگی
$l_{distance}$	فاصله جمعیتی
$J_k^l$	حد بالای k امین تابع هدف
$J_k^u$	حد پایین k امین تابع هدف
$n_{obj}$	تعداد توابع هدف
$n_s$	اندازه جمعیت
P	والدین

$P_c$	احتمال پیوند
$P_i$	احتمال انتخاب
$P_m$	احتمال جهش
PF	پرتو فرانت
$P_k^l$	حد پایین والد برای متغیر $k$ امین متغیر
$P_k^u$	حد بالای والد برای متغیر $k$ امین متغیر
$r$	عددی تصادفی بین صفر و یک
$u$	عددی تصادفی بین صفر و یک
$x$	بردار طراحی
$x^{-0(i)}$	بردار طراحی ایده آل

### ب - علائم اختصاری یونانی

$\Omega$	ناحیه ای در $R^n$ به طوری که قیود طراحی را ارضا کند
$\beta_k$	پارامتر پیوند SBX
$\delta_k$	پارامتر جهش چند جمله ای
$\sigma_{Shared}$	بزرگترین فاصله اشتراکی دو نقطه
$\eta_c$	شاخص توزیع پیوند
$\eta_m$	شاخص توزیع جهش

## 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<sup>۱</sup> در انبساط بخار توسط تامسون<sup>۲</sup> مطرح شد. چهار سال بعد یعنی در سال ۱۸۷۵ کلوین<sup>۳</sup> رابطه بین فشار بخار متعادل روی یک سطح منحنی و شعاع آن را بدست آورد و مفاهیم اساسی سیستمهای متعادل ترمودینامیکی توسط گیبس<sup>۴</sup> و هلم هولتز<sup>۵</sup> توسعه پیدا کرد. در ۱۸۸۰ آتکن<sup>۶</sup> مشاهده کرد که در هوای اشباع شده با بخار آب ذرات خارجی و غبار موجود در جریان به عنوان هسته

---

<sup>1</sup> - Supersaturation.

<sup>2</sup> - Thompson.

<sup>3</sup> - Kelvin.

<sup>4</sup> - Gibbs.

<sup>5</sup> - Helmholtz.

<sup>6</sup> - Aitken.

چگالش<sup>۱</sup> عمل می‌کند. در سال ۱۸۸۶ 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<sup>۲</sup> 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 می‌تواند چگالش و تشکیل قطرات آب صورت بگیرد. او نسبت فشار بخار P به فشار اشباع متقابل با درجه حرارت محلی بخار  $P_s(T_G)$  را به عنوان انحراف سیال از حالت تعادلی آن معرفی نموده و آنرا نسبت فوق اشباع S<sup>۳</sup> نامید. یعنی:

$$S = \frac{P}{P_s(T_G)} \quad (1-1)$$

سپس توسط هرتز<sup>۴</sup> و ندسن<sup>۵</sup> توصیف ریاضی چگالش روی یک قطره و یا تبخیر از آن فرموله شد. در سال ۱۹۱۳، هندرسون<sup>۶</sup> 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 [۲] و بدنبال آن استودولا<sup>۷</sup> با ذکر تجربیات بندمن<sup>۸</sup> بیان کرد که تخلیه ابتدایی بخار اشباع شده خشک مشابه حالت انبساط کاملاً خشک است [۳]. کالندر<sup>۹</sup> با استفاده از رابطه کلوین - هلم هولتز اندازه قطره را تعیین و در مورد اثرات فوق اشباع توضیحات مفصل تری ارائه داد. در سال ۱۹۱۸ خط ویلسون<sup>۱۰</sup> توسط مارتین<sup>۱۱</sup> بر روی دیاگرام مولیر رسم شد و انتهای محدوده فوق اشباع محاسبه گردید.

سالها بعد پدیده چگالش در شیپوره‌های همگرا - واگرا توسط یلوت<sup>۱۲</sup> (۱۹۳۴)، رتالیاتا<sup>۱۳</sup>

(۱۹۳۶)، یلوت و هالند<sup>۱۴</sup> (۱۹۳۷) توسعه یافت. این محققان پیشنهاد کردند که ناحیه ویلسون جایگزین

<sup>1</sup> - Condensation

<sup>2</sup> - Wilson

<sup>3</sup> - Ratio of supersaturation.

<sup>4</sup> - Hertz.

<sup>5</sup> - Knudsen.

<sup>6</sup> - Henderson.

<sup>7</sup> - Stodola.

<sup>8</sup> - Bendemann.

<sup>9</sup> - Callender.

<sup>10</sup> - Wilson line

<sup>11</sup> - Martin.

<sup>12</sup> - Yellot

<sup>13</sup> - Retta liata

<sup>14</sup> - Holland



خط ویلسون شود. آنها معتقد بودند که انتهای محدوده فوق اشباع به شکل نازل و شرایط تجربی بستگی دارد. سپس در ۱۹۳۸ بنی<sup>۱</sup> و وودس<sup>۲</sup> و همچنین بنی و گرین<sup>۳</sup> (۱۹۴۳) توزیع فشار محوری در جریان دوفازی بخار - مایع را در طول یک شیپوره همگرا - واگرا اندازه‌گیری کردند.

در سال ۱۹۴۲ برای اولین بار تئوری جوانه‌زایی با معادلات دینامیک گاز توسط اسواتیچ<sup>۴</sup> ترکیب شد. او روش را برای چند نوع جریان چگالش آب داخل نازلها، هم با بخار خالص و هم با هوای اتمسفریک بکار برده 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 گرم کن<sup>۵</sup> 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 [۴] (۱۹۶۲)، پورینگ [۵] (۱۹۶۵)، هیل [۶] (۱۹۶۶)، پوزیرسکی [۷] (۱۹۶۹)، وگنر (۱۹۶۹)، کمپیل و باختر (۱۹۷۰) [۸-۹]، بارچدورف [۱۰] (۱۹۷۰)، یوسیف و کمپیل [۱۱] (۱۹۷۲)، باختر، تابمن، رایلی و یانگ [۱۲] (۱۹۷۵)، موزز و استین [۱۳] (۱۹۷۸) و غیره از جمله محققانی هستند که میدان جریان را مورد بررسی و مطالعه قرار داده‌اند.

تحقیقات بیشتر در ارتباط با تونل باد مافوق صوت توسط محققان دیگر از قبیل هد، پروبستین و رادبون و استور [۱۴] انجام شد. همچنین بررسی‌های دقیق‌تری برای اندازه‌گیری اندازه قطرات به وجود آمده در اثر چگالش انجام گرفته، محققان مختلفی از جمله جرماسی و میر (۱۹۶۵)، کرول (۱۹۷۱)، دیچ [۱۵]، به مقایسه حل‌های تئوری با نتایج تجربی پرداختند. با ظهور راکتور هسته‌ای خنک شونده با

<sup>1</sup> - Binnie

<sup>2</sup> - Woods

<sup>3</sup> - Green

<sup>4</sup> - Oswatitsch

<sup>5</sup> - Reheat cycle

آب<sup>۱</sup>، 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 (۱۹۷۵-۱۹۷۹)، فیلیپو<sup>۲</sup> (۱۹۸۰) و اسکایلینگس<sup>۳</sup> [۱۶] (۱۹۸۹) مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲-۱: چگالش در جریان یک بعدی

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<sup>۴</sup> ابتدا رفتار تحلیلی جریانهای چگالشی<sup>۵</sup> توسط اسواتیچ [۱۷] (۱۹۴۲) بیان گردید. در طی زمان تحقیقات درباره فوق اشباع و جوانه‌زایی در دو مسیر موازی دنبال شده است. مطالعات علمی محض از پیستون‌های انبساطی<sup>۶</sup> و اتاقک‌های ابر<sup>۷</sup> استفاده کرده‌اند در حالی که مهندسان از نازل‌های همگرا - واگرا استفاده نموده‌اند. فوق اشباع و نرخ جوانه‌زایی در پیستون‌های انبساطی و اتاقک ابر به هیچ وجه با نتایج به دست آمده در طی انبساط سریع بخار در نازل‌ها قابل مقایسه نمی‌باشد. همچنین در این ابزارها بخار در مجاورت مقادیر زیادی از یک گاز ساکن دیگر است و اندازه‌گیری‌ها به طور مستقیم به جوانه‌زایی در جریان بخار خالص قابل اعمال نمی‌باشد. بالاترین نرخ فوق سردی در داخل نازل حاصل شده و این وسیله بهترین مدل سازی آزمایشگاهی چگالش در توربین‌های بخار را فراهم آورده‌اند [۱۸].

عبور جریان از میان پره‌های توربین در حالت واقعی بصورت سه بعدی است و بنابراین بررسی دقیق پدیده چگالش و اثرات بخار تر داخل توربینها نیاز به بسط معادلات در میدانهای دو و سه بعدی دارد. از آنجایی که تحلیل چنین جریانهایی بسیار مشکل و پیچیده بوده و بدون ساده‌سازی امکان‌پذیر

---

<sup>۱</sup> . Water Cooled Nuclear reactor.

<sup>۲</sup> . Filipov.

<sup>۳</sup> . Skillings.

<sup>۴</sup> . Nucleation Theory.

<sup>۵</sup> . Condensing flows.

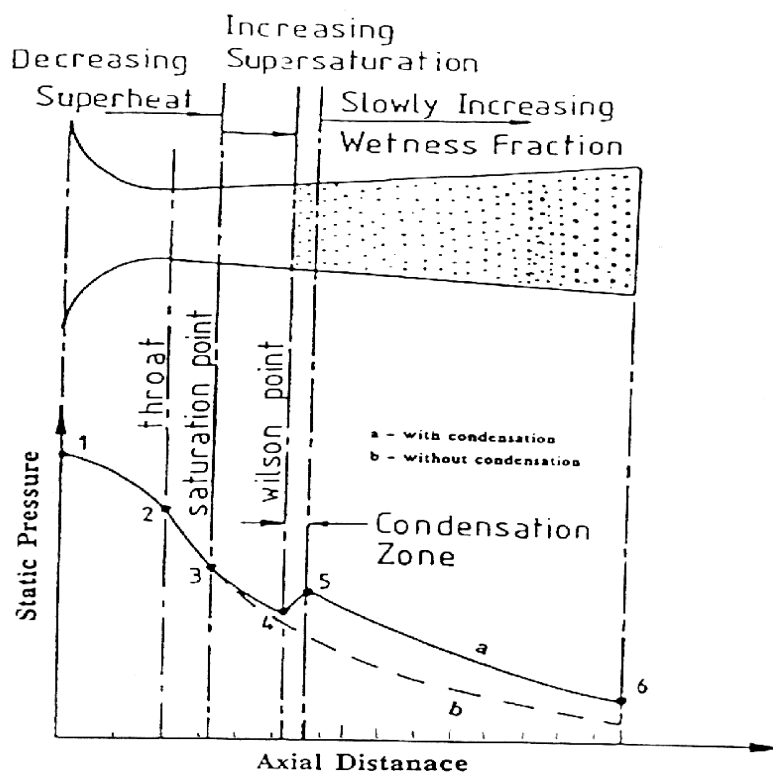
<sup>۶</sup> . Expansion Piston

<sup>۷</sup> . Cloud chamber

نمی‌باشد، لذا عموماً فرآیند چگالش داخل توربین از طریق مشاهده عملکرد جریان تراکم‌پذیر یک بعدی در شیپوره‌های همگرا - واگرا مورد مطالعه و بررسی قرار می‌گیرد. در بخش‌های زیر به تشریح چنین جریان‌هایی می‌پردازیم.

### ۱-۲-۱: انبساط بخار در شیپوره‌های همگرا - واگرا

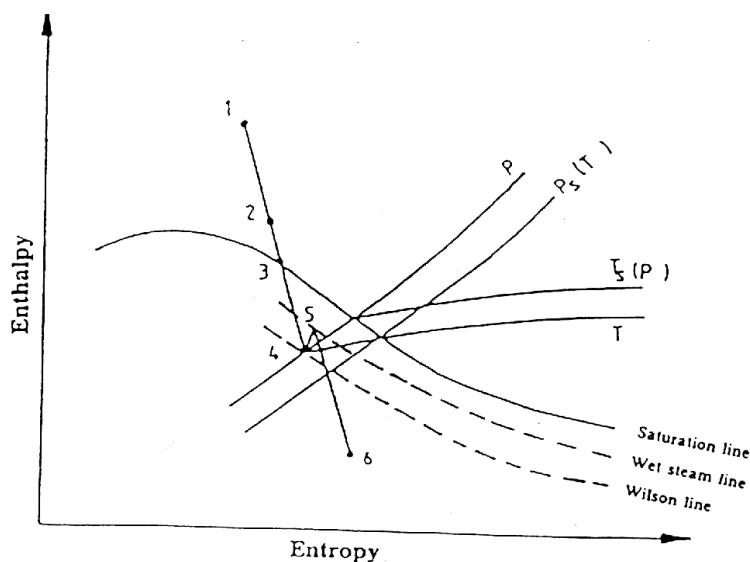
یک نمونه از انبساط بخار از شرایط خشک فوق‌گرم به مرطوب داخل شیپوره همگرا - واگرا در شکل (۱-۱) نشان داده شده است.



شکل (۱-۱): تغییرات فشار در یک شیپوره همگرا-واگرا در حالت تک‌فاز و دو فاز

بخار در حالت خشک و فوق‌گرم در نقطه (۱) وارد شیپوره شده و در قسمت همگرا شتاب گرفته، تا شرایط صوتی در گلوگاه انبساط می‌یابد (نقطه ۲). در نقطه (۳) شکل (۱-۲) خط اشباع قطع می‌شود که ممکن است قبل یا بعد از گلوگاه اتفاق بیفتد. از این نقطه به بعد بخار قادر به حفظ حالت تعادلی خود نبوده و تا زیر شرایط اشباع سرد می‌گردد. به این ناحیه که در آن جریان در حالت نیمه

پایدار غیر تعادلی قرار دارد حالت مافوق سرد<sup>۱</sup>، مادون سرد<sup>۲</sup> یا فوق اشباع<sup>۳</sup> می‌گویند. در این ناحیه جینهای قطره<sup>۴</sup> شروع به تشکیل و رشد می‌کنند، اما نرخ جوانه‌زایی مرتبط با این جینهای پیش‌رس آنقدر پایین است که بخار به انبساط خود همانند یک بخار تک فاز خشک ادامه می‌دهد.



شکل (۱-۲): چگونگی انبساط بخار دوفاز در نمودار آنتالپی-انترپی

با انبساط بیشتر، بخار به منتهی درجه حالت نیمه پایدار غیر تعادلی خود رسیده و سعی می‌کند بر آن غلبه کرده و حالت تعادلی خود را کسب نماید. در این حالت حرکت جنبشی و برخورد مولکولها باعث به وجود آمدن دسته‌های کوچک مولکولی<sup>۵</sup> شده که از طریق چگالش مجدد پایداری کافی را کسب نموده و به حالت تعادلی می‌رسند. این تحول جوانه‌زایی نامیده می‌شود که طی آن قطره مایع شکل می‌گیرد. بسته به شرایط محلی و نرخ انبساط، نرخ جوانه‌زایی بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته و به ماکزیمم آن در نقطه (۴) می‌رسد. این قسمت، منطقه جوانه‌زایی<sup>۶</sup> نامیده شده و بوسیله نقطه

- 
1. Supercooled.
  2. Subcooled
  3. Supersaturated.
  4. Droplet embryos.
  5. Micro clusters.
  6. Nucleation zone.