



انجمن مهندسان مکانیک ایران



دانشگاه صنعتی اصفهان

# حکیده مقالات

## چهاردهمین کنفرانس سالانه (بین المللی)

# مهندسی مکانیک



ویراستاران:

دکتر محمود سلیمی

دکتر محمود اشرفی زاده

دکتر سعید ضیایی راد

۲۶-۲۸ اردیبهشت ۱۳۸۵

دانشگاه صنعتی اصفهان

<http://isme2006.iut.ac.ir>  
[isme2006@cc.iut.ac.ir](mailto:isme2006@cc.iut.ac.ir)



IUT

کتابچه مقالات  
Book of Abstracts  
The 14<sup>th</sup> Annual (International) Conference  
of Mechanical Engineering  
چهاردهمین کنفرانس سالانه (بین المللی)



ISME



IUT

# Book of Abstracts

## The 14<sup>th</sup> Annual (International) Conference of Mechanical Engineering



Editors:

Dr. Mahmoud Salir

Dr. Mahmoud Ashr

Dr. Saeed Ziaei-Ra

16-18 May 2006  
Isfahan University of Tech  
Isfahan - IRAN

<http://isme2006.iut.ac.ir>  
[isme2006@cc.iut.ac.ir](mailto:isme2006@cc.iut.ac.ir)



## کاهش تلفات در جریان مافوق صوت دوفازی در پره‌های ثابت توربین بخار از طریق اسپری کردن قطرات آب

محمد رضا مه پیکر<sup>۱</sup>، اسماعیل لکزیان<sup>۲</sup>

دانشگاه فردوسی مشهد - دانشکده مهندسی - گروه مکانیک

esmaillakzian@yahoo.com

### چکیده

جریان بخار خالص آب در فشار و دمای خاص در اثر عبور از میان پره‌های ثابت توربین در قسمت واگرا منبسط و مافوق صوت شده و در نتیجه بخار مافوق سرد (supercooled) می‌شود، این بخار مستعد جوانه‌زایی می‌باشد. این فاز مایع در داخل توربین باعث تلفات ترمودینامیکی و ایرودینامیکی می‌شود. در این مقاله جریان به صورت یک بعدی در یک شیپوره همگرا-واگرا مدل شده است. با بکارگیری معادلات ارائه شده جهت جوانه‌زایی و رشد قطرات، تغییرات در میزان جوانه‌زایی، انتروپی، فشار، دما، عدد ماخ، قطر قطرات و تری در جریان بخار در اثر اسپری کردن قطرات مایع مورد بررسی قرار می‌گیرد. فرایند اسپری کردن در قسمت گلوگاه که ابتدای جریان مافوق صوت است، انجام می‌شود. لازم به توجه است، روش اسپری کردن قطرات مایع به درون جریان بخار جهت کاهش تلفات تاکنون بررسی نشده است.

واژه های کلیدی: مافوق سرد - جوانه‌زایی - شعاع بحرانی - تری (wetness) - انتروپی

## کاهش تلفات در جریان مافوق صوت دوفازی در پره‌های ثابت توربین بخار از طریق اسپری کردن قطرات آب

محمد رضا مه پیکر<sup>۱</sup>، اسماعیل لکزیان<sup>۲</sup>

دانشگاه فردوسی مشهد - صندوق پستی ۱۱۱۱-۹۱۷۷۵ - دانشکده مهندسی - گروه مکانیک  
esmaillakzian@yahoo.com

چکیده

جریان بخار خالص آب در فشار و دمای خاص در اثر عبور از میان پره‌های ثابت توربین در قسمت واگرا منبسط و مافوق صوت شده و در نتیجه بخار مافوق سرد (supercooled) می‌شود، این بخار مستعد جوانه‌زایی می‌باشد. این فاز مایع در داخل توربین باعث تلفات ترمودینامیکی و ایرودینامیکی می‌شود. در این مقاله جریان به صورت یک بعدی در یک شیپوره همگرا-واگرا مدل شده است. با بکارگیری معادلات ارائه شده جهت جوانه‌زایی و رشد قطرات، تغییرات در میزان جوانه‌زایی، انتروپی، فشار، دما، عدد ماخ، قطر قطرات و تری در جریان بخار در اثر اسپری کردن قطرات مایع مورد بررسی قرار می‌گیرد. فرایند اسپری کردن قطرات در قسمت گلوگاه ابتدای جریان مافوق صوت بمنظور کاهش انتروپی است، انجام می‌شود. لازم به توجه است که روش اسپری کردن قطرات مایع به درون جریان بخار دوفازی جهت کاهش تلفات تاکنون بررسی نشده است.

واژه‌های کلیدی: مافوق سرد - جوانه‌زایی - شعاع بحرانی - تری (wetness) - انتروپی

### ۱- مقدمه

در نیروگاه‌های فسیلی در انتهای توربین LP و در نیروگاه‌های هسته‌ای 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 دوفازی می‌شود. در اینجا بعلاوه سرعت بالای جریان سیال کماکان تک‌فاز می‌باشد که به این بخار، بخار مافوق سرد گفته می‌شود. این حالت تا خط ویلسون ادامه دارد ولی با این شرایط بخار قادر به ادامه مسیر نیست. بعد از ویلسون بخار اشباع گرمای نهان (Latent heat) خود را از دست می‌دهد و تبدیل به مایع اشباع در همان دما و فشار می‌شود که این منطقه، منطقه جوانه‌زایی (Nucleation) است. (شکل ۱-الف) جوانه‌زایی که ما بررسی می‌کنیم جوانه‌زایی هموزن یعنی بدون وجود هیچ گونه ناخالصی یا بدون داشتن هیچ گونه

سطحی، تقطیر انجام می‌شود.

در جریان مافوق صوت در صورتی که حرارت به جریان داده شود باعث کاهش سرعت و افزایش فشار سیال می‌شود. این افزایش فشار که با نام شوک میعان نامیده می‌شود تا خط تر (Wet line) ادامه دارد که این شوک باعث تلفات فراوان در میزان انتروپی می‌شود. (در نتایج بعدی دیده می‌شود که با اسپری کردن قطرات آب به درون نازل این شوک ناپدید شده است). در واقع در این قسمت تغییرات افزایش سطح در جهت کاهش فشار جریان است ولی دادن گرما به سیال باعث می‌شود که فشار جریان افزایش یابد تا قبل از Wet line عامل گرما برنده است اما پس از آن، عامل سطح پیروز خواهد بود که باعث کاهش فشار می‌شود. بعد از جوانه‌زایی تقطیر بخار، بیشتر روی سطح قطرات تشکیل شده اتفاق می‌افتد و از این به بعد جوانه‌زایی کمتر محسوس می‌باشد و همان قطرات تشکیل شده شروع به رشد می‌کنند (شکل ۱-الف) که معادلات آن در قسمتهای بعدی ارائه شده است. [5] حضور فاز مایع در داخل توربین باعث ایجاد افت‌های زیر می‌شود.

۱- دانشیار گروه مکانیک دانشگاه فردوسی

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد تبدیل انرژی دانشگاه فردوسی

## ۲-۲- جنبه سینماتیکی جوانه‌زایی

حتی در بخار داغ، کلاسترها (تعداد مولکول‌هایی هستند که با هم بر خورد می‌کنند و قطره تشکیل می‌دهند) به صورت مداوم شکل می‌گیرند و بر اساس Statistical fluctuation از بین می‌رود. در شرایط یکنواخت تعداد کلاسترها از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$N_g = N_1 \exp\left(\frac{-\Delta G}{KT_G}\right) \quad (۳)$$

رابطه (۳) معروف به رابطه Boltzman می‌باشد.

$N_g$  تعداد کلاسترها شامل  $g$  مولکول می‌باشند.

$K$  ثابت Boltzman

بر اساس رابطه بالا آقای Volmer رابطه (۴) را ارائه داد.

$$J_{Volmer} = 4\pi^2 \frac{Pq}{\sqrt{2\pi mKT_G}} mn_1 \exp\left(\frac{-\Delta G^*}{KT_G}\right) \quad (۴)$$

$m$  جرم یک مولکول به تنهایی

$q$  کسر تقطیر شده بر روی هسته (از تعداد مولکولی‌هایی که به سطح قطره بر خورد می‌کنند، فقط مقداری از آنها جذب قطره می‌شود. مقدار  $q$  ضریب تقطیر که به کمک تحقیقات آزمایشگاهی به دست می‌آید. معمولاً عددی بین ۰.۰۳۶-۱ می‌باشد.)

معادله (۴) یک معادله تقریبی است. مثلاً به مقدار تبخیر در آن اشاره نشده است.

آقای Zeldovich [1] با استفاده از روابط ترمودینامیکی و آماری موفق شد رابطه زیر را برای حالت Steady State ارائه کند.

$$J_{st} = \sqrt{\frac{2N^3}{\pi}} \frac{qP^2 \sqrt{\sigma_r}}{\rho_L (RT_G)^2} \exp\left[\frac{-16\pi N \sigma_r^3}{3\rho_L^2 (RT_G)^3 \left\{\ln\left(\frac{P}{P_s(T_G)}\right)\right\}^2}\right] \quad (۵)$$

علی‌الرغم تحلیل پیچیده آقای Zeldovich اختلاف بین  $J_{Volmer}$  و  $J_{st}$  فقط با order  $10^{-2}$  با هم تفاوت دارند. رابطه توسط پیشنهاد‌های دیگران اصلاح شد.

۱. افت‌های ترمودینامیکی: به خاطر دمای بالاتر فاز مایع نسبت به بخار که باعث انتقال حرارت بین دو فاز و افزایش آنتروپی می‌شود.

۲. افت‌های ایرودینامیکی: به خاطر شوک میعان ولایه مرزی.  
۳. خسارات مکانیکی: در اثر بر خورد قطرات با سطح پره‌ها. به همین خاطر لازم است معادلات تشکیل قطره بررسی شود تا ایرفویلی طراحی شود که کمترین تلفات را داشته باشد. [3]

اسپری کردن قطرات به درون نازل، یکی از روش‌هایی است که در این مقاله برای کاهش میزان تلفات پیشنهاد شده است.

در زمینه جوانه‌زایی حل‌های گسترده‌ای توسط Gyarmathy [4] و Bakhtar [1] و دیگران انجام شده است.

## ۲- جوانه‌زایی همگن و تشکیل مایع اشباع در

### بخار مافوق سرد (Supercooled)

در اینجا به بررسی جوانه‌زایی همگن (بدون حضور سطح) در بخار مافوق سرد می‌پردازیم. بحث جوانه‌زایی را می‌توان به دو صورت مورد بررسی قرار داد. اول از نظر ترمودینامیک و سپس از نظر سینماتیکی مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

### ۲-۱- جنبه ترمودینامیکی جوانه‌زایی

مقدار انرژی گیبس لازم جهت تشکیل یک قطره در  $P, T$  مشخص از بخار مافوق سرد در همان دما و فشار در غیاب میدان‌های مغناطیسی و الکتریکی به صورت زیر می‌باشد. [1]

$$\Delta G = 4\pi r^2 \sigma_r - \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_L RT_G \ln\left[\frac{P}{P_s(T_G)}\right] \quad (۱)$$

با مشتق‌گیری از عبارت بالا نسبت به  $r$  می‌توان شعاع بحرانی  $r^*$  را پیدا کرد.

$$r^* = \frac{2\sigma_r}{\rho_L RT_G \ln\left[\frac{P}{P_s(T_G)}\right]} \quad (۲)$$

قطراتی که شعاع آنها از  $r^*$  کمتر باشد با از دست دادن مولکول‌ها و کاهش انرژی مخصوص سطحی خود تمایل درونی به تبخیر دارند و اگر شعاع بزرگتر از  $r^*$  باشد قطره رشد خواهد کرد.

و هر چه مقدار  $r^*$  کوچکتر باشد امکان تشکیل قطرات و جوانه‌زایی بیشتر می‌باشد.

می‌شود.

$$L \frac{dm_r}{dt} = 4\pi r^2 \alpha_r (T_l - T_G) \quad (9)$$

که  $L$  انتالپی تبخیر بخار بوده و نشان دهنده مقدار انرژی آزاد شده بر واحد جرم بخار هنگام چگالش آن است.  $\alpha_r$  ضریب انتقال حرارت از سطح قطره به بخار می‌باشد. یک رابطه تجربی برای  $\alpha_r$  توسط گرماسی [4] به صورت زیر داده شده است.

$$\alpha_r = \frac{\lambda}{r(1 + 3.18K_n)} \quad (10)$$

در رابطه فوق  $K_n$  عدد بدون بعد ندسن بوده و به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$K_n = \frac{1.88\mu_G}{2r\rho_G\sqrt{RT_G}} \quad (11)$$

معادلات (9) تا (11) بطور ضمنی تغییر در شعاع و درجه حرارت قطره را بر حسب خواص بخار توصیف نموده و می‌توانند بصورت عددی و با استفاده از روش تکرار حل شوند.

#### ۲-۴- نرخ رشد قطرات مایع

قطره‌های بزرگتر از اندازه بحرانی به وسیله مولکولهای جذب شده رشد می‌کنند اما مولکولهای چگالش یافته حرارت نهان خود را ابتدا به قطره مایع داده و سپس از طریق قطرات مایع انتقال حرارت به فاز بخار انجام می‌شود. بنابراین نیاز به محاسبه تحلیلی برای نرخ تغییر فاز و حل همزمان معادلات تشریح کننده نرخهای انتقال حرارت و جرم لازم می‌باشد. اما به دلیل حجم عبارات و عملیات، پایه عملیات بر روی یک تقریب پیشنهادی به وسیله گرماسی استوار می‌گردد که عبارات جبری را به طور موثری ساده می‌کند. برای اعتبار مطالب بالا فرض می‌شود که  $P_s(T_L, r) = P$  فرض شده است و تغییرات در کشش سطحی و انتالپی تبخیر بخار آب در بازه دمایی  $T_l$  تا  $T_G$  در نظر گرفته نمی‌شود. گرماسی نشان داد که دمای  $T_l$  یک قطره احاطه شده با بخار در فشار  $P$  و دمای  $T_G$  با رابطه زیر به شعاع آن  $r$  مرتبط می‌شود.

$$T_l = T_s(P) - \left[ T_s(P) - T_G \right] \frac{r^*}{r} \quad (12)$$

با استفاده از رابطه فوق می‌توان نرخ رشد قطره را روی روند از دست دادن حرارت به وسیله قطره محاسبه کرد که برای

آقای Courtney [6] پیشنهاد می‌نماید که فشار جزئی

$$N_g = N_l \exp\left(\frac{-\Delta G}{KT_G}\right)$$

کلاسترها را لحاظ کنیم. زیرا معادله

$$s = \frac{P}{P_s(T_G)}$$

کلاسیک به اندازه  $s$  کاهش یابد.

آقای Kantrowitz [2] پیشنهاد کرد که دمای قطره را که از دمای محیط و بخار بیشتر است، در محاسبات لحاظ کنیم. در نتیجه معادله اصلاح شده Courtney و Kantrowitz به صورت زیر پیشنهاد می‌شود. [2]

$$J = \frac{q}{1+\nu} \left( \frac{2\sigma}{\pi m^3} \right)^{0.5} \frac{\rho_s(T_G)}{\rho_L} \exp\left[ \frac{-4\pi r^2 \sigma}{3KT_G} \right]$$

where (6)

$$\nu = \frac{q\rho_G}{\alpha} \left( \frac{RT_G}{2\pi} \right)^{0.5} \left( \frac{L^2}{RT_G^2} - \frac{L}{2T_G} \right)$$

$L$  گرمای نهان تبخیر

$\alpha$  ضریب انتقال حرارت جابجایی

$\rho_s(T_G)$  دانسیته بخار اشباع در دمای  $T_G$

آقای Benson & Shuttleworth [1] برای تنش سطحی به علت تاثیر مهم در مقدار جوانه‌زایی بررسی کرده و فرمول زیر را پیشنهاد کردند.

$$\sigma_r = \sigma_\infty \left( 1 - \frac{1}{3g^3} \right) \quad (7)$$

#### ۲-۳- رشد قطرات مایع در بخار فوق اشباع

وقتی قطر قطرات به اندازه بحرانی رسیدند شروع به رشد و بزرگ شدن می‌کنند. با استفاده از تئوری جنبشی گازها و بالانس جرم می‌توان نشان داد که نرخ رشد قطره‌ای به جرم  $m_r$  با اختلاف بین نرخ چگالش و تبخیر معادل است. یک رابطه نیمه تجربی برای نرخ رشد قطره توسط Zidi & Bakhtar [8] به صورت زیر ارائه شده است.

$$\frac{dm_r}{dt} = \frac{q_c \sqrt{8\pi R}}{1+a} \left[ \rho_G \sqrt{T_G} - \rho_s(T_L, r) \sqrt{T_L} \right] \quad (8)$$

که در آن  $\rho_s(T_L, r)$  دانسیته بخار متقابل با فشار اشباع در درجه حرارت  $T_G$  روی یک سطح منحنی به شعاع  $r$  است.

با صرف نظر کردن از اینرسی حرارتی قطره، بالانس انرژی یا نرخ انتقال حرارت از قطره به بخار بوسیله رابطه زیر داده

$$dP + \frac{f\rho_G u^2}{2D_e} dx + \rho_G u du = 0 \quad (19)$$

که در آن  $D_e$  و  $f$  به ترتیب قطر هیدرولیکی و ضریب اصطکاک کانال می‌باشد.

معادله انرژی برای جریان یکنواخت آدیاباتیک به صورت زیر می‌باشد.

$$d\left[(W - W_L)\left(h_G + \frac{u^2}{2}\right) + W_L\left(h_L + \frac{u^2}{2}\right)\right] = 0 \quad (20)$$

با نوشتن  $L$  به جای  $(h_G - h_L)$  می‌توان نشان داد که:

$$dh_G + u du - \frac{d(W_L L)}{W} = 0 \quad (21)$$

یک عبارت برای  $dh_G$  به صورت زیر بیان شده است.  $V$  حجم مخصوص می‌باشد.

$$dh_G = C_p dT_G + \left[V_G - T_G \left(\frac{\partial V_G}{\partial T_G}\right)_P\right] dP \quad (22)$$

با استفاده از معادله حالت می‌توان نشان داد که:

$$\left[V_G - T_G \left(\frac{\partial V_G}{\partial T_G}\right)_P\right] = \frac{1}{\rho_G} \left(1 - \frac{Y}{X}\right) \quad (23)$$

با جایگذاری معادله (23) در معادله (22) و ترکیب آن با معادله (21) و تقسیم معادله حاصل بر  $C_p dT_G$  نتیجه زیر حاصل می‌شود.

$$\frac{dT_G}{T_G} + \frac{P}{\rho_G C_p T_G} \left(1 - \frac{Y}{X}\right) \frac{dP}{P} + \frac{u^2}{C_p T_G} \frac{du}{u} - \frac{1}{C_p T_G} \frac{d(W_L L)}{W} = 0 \quad (24)$$

با در نظر گرفتن  $dA/A$ ,  $fdx/De$ ,  $dW_L/W$  به عنوان متغیرهای مستقل، پنج معادله (14)، (16)، (18)، (19)، (24) می‌توانند برای حل پنج مجهول را در نظر می‌گیریم.

با معرفی  $d\rho_G/\rho_G$ ,  $du/u$ ,  $dP/P$ ,  $dT_G/T_G$ ,  $dZ/Z$

کسر خشکی (Dryness fraction)، به صورت  $\zeta = (W - W_L)/W$  و نوشتن در ترم عدد ماخ، عبارت

منتجه برای  $d\rho_G/\rho_G$ ,  $dT_G/T_G$ ,  $dZ/Z$  می‌توان

بصورت زیر تنظیم شود. در معادلات زیر چهار متغیر مستقل  $dA/A$ ,  $f$ ,  $W_L$ ,  $dW_L$  وجود دارد. عبارات  $f$ ,  $dA/A$  نشان

دهنده شکل کانال و افت اصطکاک می‌باشند.

یک کره ساکن به ازای عدد ندسن معتبر است. شدت رشد قطره به صورت زیر نوشته شود.

$$\frac{dr}{dt} = \frac{\lambda}{(r + 1.59L)\rho} \frac{T_L - T_G}{h_G - h_L} \quad (13)$$

$$h_L = C_L(T_L - T_D)$$

که در آن  $Q_L$  حرارت مخصوص آب و  $T_D$  دمای مرجع (datum) و برابر ۲۷۳،۱۵ کلوین می‌باشد.  $\lambda$  ضریب انتقال حرارت رسانایی.

### ۳- معادلات دینامیک گاز جریان دو فازی

با فرض جریان یکنواخت و یک بعدی بخار معادلات اساسی به صورت زیر می‌باشد.

معادلات پیوستگی: در آن  $W$  نرخ جریان جرم کلی

$$\frac{d\rho_G}{\rho_G} + \frac{dr}{A} + \frac{du}{u} + \frac{dW_L}{W - W_L} = 0 \quad (14)$$

معادله حالت برای بخار:

$$\frac{P}{\rho_G RT_G} = 1 + B_1 \rho_G + B_2 \rho_G^2 + B_3 \rho_G^3 \quad (15)$$

ضرایب  $B_3, B_2, B_1$  در رابطه فوق به ضرایب ویریال دانسیته معروف بوده و تابعی از درجه حرارت فاز بخار می‌باشد.

$$\frac{dP}{P} - X \frac{d\rho_G}{\rho_G} - Y \frac{dT_G}{T_G} = 0 \quad (16)$$

$$X = \frac{\rho_G}{P} \left(\frac{\partial P}{\partial \rho_G}\right)_{T_G} = \frac{1 + 2B_1 \rho_G^2 + 3B_2 \rho_G^2 + 4B_3 \rho_G^3}{1 + B_1 \rho_G^1 + B_2 \rho_G^2 + B_3 \rho_G^3}$$

$$Y = \frac{T_G}{P} \left(\frac{\partial P}{\partial T_G}\right)_{\rho_G} = 1 + \frac{\rho_G T_G}{1 + B_1 \rho_G^1 + B_2 \rho_G^2 + B_3 \rho_G^3}$$

$$\left[\frac{dB_1}{dT_G} + \rho_G \frac{dB_2}{dT_G} + \rho_G^2 \frac{dB_3}{dT_G}\right]$$

عدد ماخ فاز بخار:

$$Z = Ma = \frac{u^2}{\left(\frac{\gamma P}{\rho_G}\right)} \quad (17)$$

با مشتق معادله گیری معادله فوق نتیجه زیر حاصل می‌شود.

$$\frac{dZ}{Z} = \frac{2dMa}{Ma} = 2 \frac{du}{u} + \frac{d\rho_G}{\rho_G} - \frac{dP}{P} \quad (18)$$

معادله مومنتم برای فاز بخار:

میزان بخار کاسته شود.  $(w=w*(1-wetness))$  البته با مقایسه بین متغیرهای جریان در حالت بدون کاستن مقدار مایع اسپری شده از دبی جریان و حالت کاستن مقدار مایع اسپری شده، تفاوت کم را نشان می‌دهد. پس می‌توان فرض کرد که میزان دبی قطرات ناچیز می‌باشد و در محاسبات تغییر ایجاد نمی‌کند.

#### ۴-۱- بررسی اثر اسپری قطرات آب در جریان

##### دو فازی بر روی متغیرهای جریان

برای وارد کردن میزان مایع اسپری شده دو پارامتر، درصد تری و شعاع قطرات را داریم و می‌توان با تغییر درصد تری در یک شعاع مشخص، تعداد قطرات را تغییر داد. با فرض اینکه قطر قطرات اسپری شده ۱ میکرومتر باشد، با تغییر میزان تری می‌توان تعداد قطرات تغییر داد و اثرات آن را روی متغیرهای جریان بررسی کرد. تمام محاسبات در فشار و دما اولیه  $P=198576 \text{ Pa}$  &  $T=405.6 \text{ K}$  انجام شده و سطح بدون اصطکاک  $f=0.0$  می‌باشد.

در یک شعاع مشخص هر چه میزان اسپری (Wetness inlet) بیشتر باشد، تعداد قطرات بیشتر می‌شود. در نتیجه سطح بیشتری برای تقطیر در اختیار بخار است و از آنجا که تقطیر روی سطح خیلی راحت‌تر از جوانه‌زایی می‌باشد پس انتظار می‌رود که جوانه‌زایی کمتر شود. با توجه به شکل (۲) نتیجه می‌شود.

$$J_{w=0.01} < J_{w=0.001} < J_{w=0.0001} < J_{w=0.00001} < J_{w=0} < \infty$$

که دقیقاً همان روند پیش‌بینی شده تأیید می‌شود. از نظر تاثیر روی تغییرات فشار همانطور که می‌دانیم در جریان مافوق صوت اگر به جریان گرما بدهیم فشار افزایش و سرعت کاهش می‌یابد (جریان رایلی). [7] در اینجا چون در مقدار اسپری بیشتر، جوانه‌زایی کمتر است پس گرمای کمتری به جریان داده می‌شود و افزایش فشار کمتر است. پس میزان شوک میعان کاهش می‌یابد و می‌دانیم شوک هم باعث افزایش انتروپی و تلفات می‌باشد. این تغییرات در شکل (۳) بین اسپری ( $Wetness=0.01$ ) و اسپری های دیگر و نیز حالت بدون پاشش بررسی گردیده است که دقیقاً با پیش‌بینی ما یکسان است.

$$P_{w=0.01} < P_{w=0.001} < P_{w=0.0001} < P_{w=0.00001} < P_{w=0}$$

در مورد عدد ماخ با توجه به بحث جریان رایلی چون در مقدار اسپری بیشتر، جوانه‌زایی کمتر است پس گرمای

$$\frac{dZ}{Z} = \frac{1}{1 - \left(\frac{Z}{\zeta}\right) \left(1 + \frac{(1-\zeta)(\gamma-X)}{\gamma}\right)} * \left\{ \left[ \left(\frac{\gamma-X}{Y}\right) (\gamma Z + 1) + \gamma + 1 \right] \right. \quad (25)$$

$$* \left\{ \left[ \frac{fZdx}{2D_e} + \left(1 + \frac{\gamma Z}{\zeta}\right) \frac{Y}{XC_p T_G} \frac{d(W_L L)}{W} - \left\{ 2 + \frac{Z}{\zeta} \left[ (\gamma-1) - (1-\zeta) \left(\frac{\gamma-X}{Y}\right) \right] \right\} \left[ \frac{dA}{A} + \frac{dW_L}{W - W_L} \right] \right\} \right.$$

$$\frac{dT_G}{T_G} = \frac{1}{1 - \left(\frac{Z}{\zeta}\right) \left(1 + \frac{(1-\zeta)(\gamma-X)}{\gamma}\right)} * \left\{ \left[ \left(\frac{\gamma-X}{Y}\right) (X - Y - \gamma Z) \frac{fZdx}{2D_e} \right] \right. \quad (26)$$

$$+ \left(1 - \frac{\gamma Z}{\zeta X}\right) \frac{1}{C_p T_G} \frac{d(W_L L)}{W} Z \left(\frac{\gamma-X}{Y^2}\right) * \left( X + \frac{X-Y}{\zeta} \right) \left[ \frac{dA}{A} + \frac{dW_L}{W - W_L} \right] \left. \right\}$$

$$\frac{d\rho_G}{\rho_G} = \frac{1}{1 - \left(\frac{Z}{\zeta}\right) \left(1 + \frac{(1-\zeta)(\gamma-X)}{\gamma}\right)} * \left\{ \left[ \left(\frac{Z}{Y}\right) (X - Y - \gamma Z) \frac{fZdx}{2D_e} \right] \right. \quad (27)$$

$$- \frac{Y}{XC_p T_G} \frac{d(W_L L)}{W} + \frac{Z}{\zeta} \left[ 1 + (1-\zeta) \right] * \left( \frac{\gamma-Y}{Y} \right) \left[ \frac{dA}{A} + \frac{dW_L}{W - W_L} \right] \left. \right\}$$

#### ۴- چگونگی اسپری قطرات آب در جریان دو

##### فازی و محاسبات

برای محاسبه متغیرهای جریان در کانال همگرا-واگرا، در قسمت همگرا جریان به صورت خشک بررسی می‌شود و با این فرض که ماخ در گلوگاه برابر با ۱ شود. در قسمت واگرا از معادلات جریان دو فاز استفاده می‌شود. به همین خاطر نمودار متغیرهای مربوط به جریان تر مثل جوانه‌زایی و قطر قطرات، فقط برای بعد از گلوگاه رسم شده‌اند ولی متغیرهایی مشترک در جریان خشک و در جریان تر برای کل طول محوری کانال رسم شده است. برای محاسبه میزان نرخ جوانه‌زایی (J) از معادله (۶) استفاده می‌شود میزان اسپری قطرات مایع در قسمت گلوگاه با دادن درصد تری (wetness) و شعاع قطرات وارد محاسبات می‌شود. با این فرض که به همان میزان قطره که اسپری می‌شود از

که دقیقاً همین نتیجه بدست آمد که در شکل (۱۲) مشخص می‌باشد. بقیه نتایج نیز منطبق بر پیش‌بینی‌ها می‌باشد.

### ۵- نتیجه‌گیری

همانطور که از نمودارها مشخص است با اسپری کردن مقدار معینی قطرات مایع به درون جریان بخار در حال جوانه‌زایی در حال گذر از تیغه‌های ثابت توربین (همانند کانال همگرا-واگرا) می‌توان:

- ۱- شوک میعان و اثرات آن را از بین برد. (کاهش سرعت و افزایش فشار نداریم).
  - ۲- میزان تولید انتروپی یا انرژی تلف شده ناشی از تولید انتروپی را کاهش داد.
  - ۳- حتی جالب است که با اسپری کردن فاز مایع در انتها، مقدار فاز مایع نسبت به حالت بدون اسپری کاهش یافته است.
- اگر در پره‌های توربین، محلی برای اسپری قطرات در نظر گرفته شود می‌تواند روش مفیدی در جهت کاهش تلفات باشد.

### References

1. M.R.Mahpeykar, F.Bakhtar, K.K.Abbas An Investigation of Nucleating Flows of Steam In a Cascade of Turbine Blading -Theoretical Treatment, Transactions of ASME vol 117(1995)
2. Judith Wo" lk and Reinhard Strey, Empirical function for homogeneous water nucleation rates, JOURNAL OF CHEMICAL PHYSICS, vol 117 (2003)
3. F.Bakhtar and M.R.Mahpeykar and F.Mashmouhy- Studies of nucleating and wet steam flows two-dimensional cascades, Journal of Mechanical Engineering Science IMechE vol part c 218(2004)
4. G.Gyarmathy, Bases for a theory for wet steam turbines, bull.No.6, Inst. for therm Turbomachines in fed.Tech.Univ.Zurich(1964)
5. F.Bakhtar and M.R.Mahpeykar On the performance of a cascade of turbine rotor tip section blading in nucleating steam Part 3: theoretical treatment, (1997) Proc Instn Mech Engrs Vol211 Part C.
6. Courtney, W.G, Kinetics of condensation of water vapour, f.chem.Phys.(1962) 36, 2018.
7. James E.A John, Gas Dynamics, school of engineering university of Massachusetts-(1933).
8. F.Bakhtar and K.Zidi, On the self-diffusion of water vapour, Proc.Instn.Mech.Engrs.199 c2, 64-159(1985)

کمتری به جریان داده می‌شود و کاهش سرعت، کمتر است. در شکل (۴) این روند مقایسه و تایید می‌شود.

$$M_{w=0.01} > M_{w=0.001} > M_{w=0.0001} > M_{w=0.00001} > M_{w=0}$$

در توربین تمام تلاش ما بر این است که انرژی نهفته در بخار به صورت فشار و دما را به انرژی جنبشی (سرعت) تبدیل کنیم و حال با اسپری کردن آب می‌توان از کاهش سرعت جلوگیری کرد.

نتیجه قابل توجه دیگری که از اسپری کردن قطرات آب بدست می‌آید این است که با وجود آنکه ما مقداری از فاز مایع را به جریان اضافه کرده‌ایم. در انتهای کانال میزان تری در حالتیکه میزان اسپری  $wetness\ inlet=0.01$  است نسبت به حالت بدون اسپری ۱ درصد کاهش یافته است که نتایج در شکل (۵) مشخص است. یکی از علت‌های کاهش میزان تری به خاطر کاهش میزان جوانه‌زایی می‌باشد.

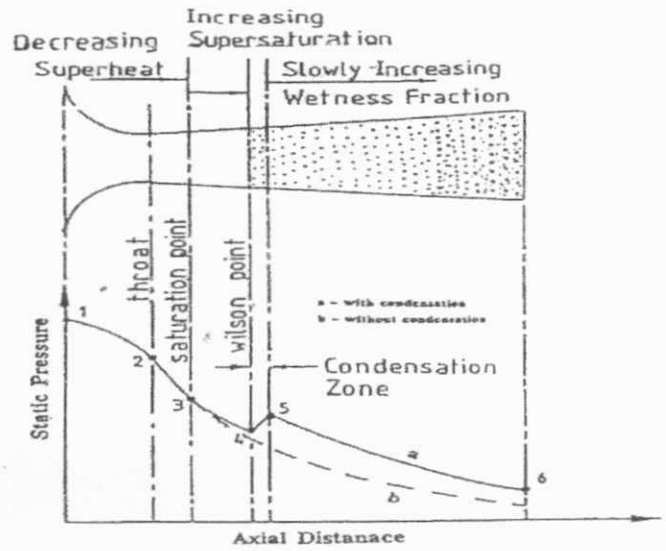
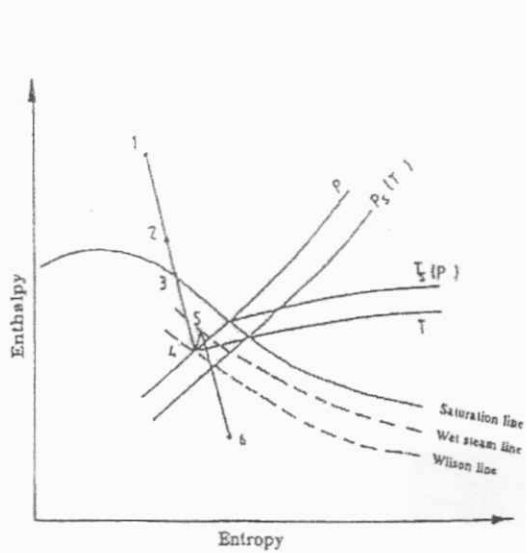
همانطور که پیش بینی می‌شود در اسپری بیشتر چون گرمای کمتری به جریان مافوق صوت داده می‌شود در نتیجه میزان افزایش دما هم در مورد قطرات آب (شکل (۶)) و هم بخار (شکل (۷)) کمتر می‌باشد.

در مورد درجه مافوق سردی (Degree of Supercooling) و نسبت اشباع (Supersaturation Ratio) که دو عامل اصلی بررسی شرایط جوانه‌زایی می‌باشند دیده می‌شود که در هر دو مورد در اسپری بیشتر، مقدار کمتری دارند. (شکل (۸) و (۹)) در نهایت میزان انتروپی در حالت اسپری قطرات کمتر از حالت بدون اسپری می‌باشد. همانطور که می‌دانیم یکی از بهترین سنجش‌ها برای میزان تلفات، انتروپی است که هر چه مقدار کمتری داشته باشد جریان مقبولتری می‌باشد. (شکل (۱۰))

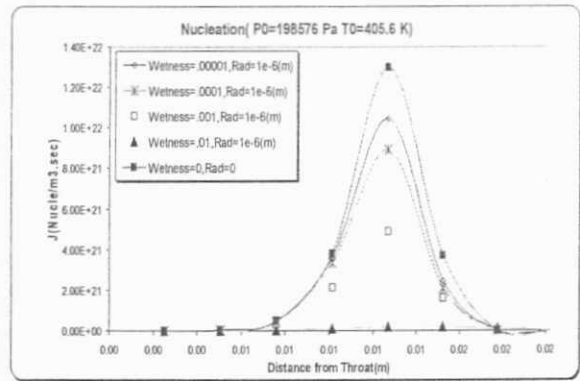
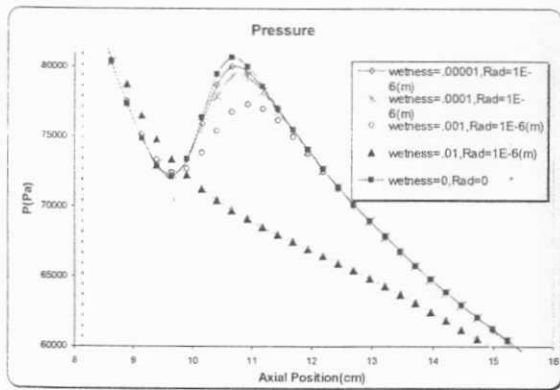
اگر مقدار انرژی تلف شده در اثر انتروپی را به صورت  $(q = s * T)$  تعریف کنیم که در آن دما، دمای همان مرحله می‌باشد یعنی انتروپی هر استپ در دمای همان استپ ضرب می‌شود. واحد دما کلونین می‌باشد. همانطور که در شکل (۱۱) مشخص می‌باشد میزان تلفات در اسپری ۰.۰۱ کمتر می‌باشد.

البته تمام این آزمایشات در مورد وقتی که میزان تری ثابت باشد و شعاع قطرات تغییر کند نیز انجام شده است. در این مورد وقتی که در یک تری یکسان، شعاع کوچکتر باشد تعداد قطرات بیشتر شده و در نتیجه سطح بیشتری در اختیار بخار می‌باشد پس میزان جوانه زایی کمتر می‌شود



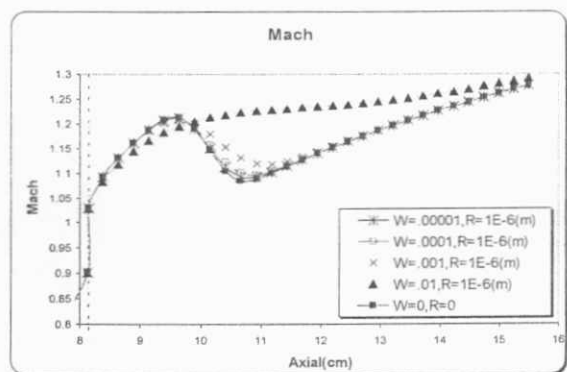
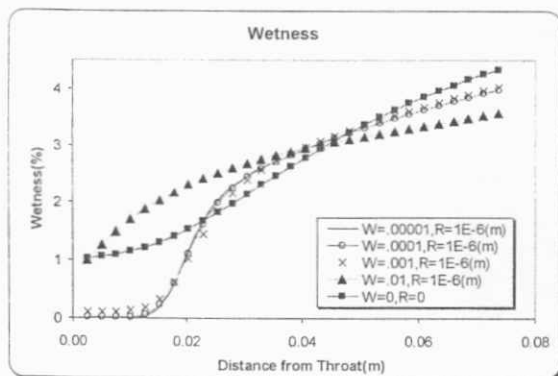


شکل (۱): الف- توزیع فشار محوری در یک شیوره همگرا-واگرا در حالت همراه با چگالش و بدون چگالش.  
 ب- خط حالت در نمودار انتالی-انترپی برای انبساط بخار همراه با چگالش.



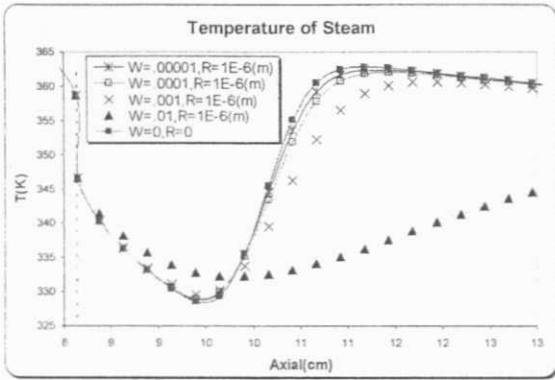
شکل (۲) اثر میزان اسپری بر روی مقدار جوانه‌زایی

شکل (۳) اثر میزان اسپری بر تغییرات فشار

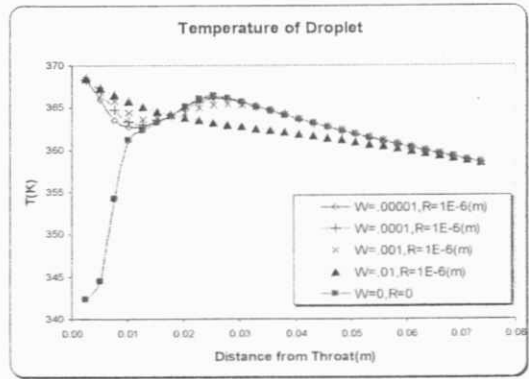


شکل (۴) اثر میزان اسپری بر روی عدد ماخ (خط چین محل گلوگاه است).

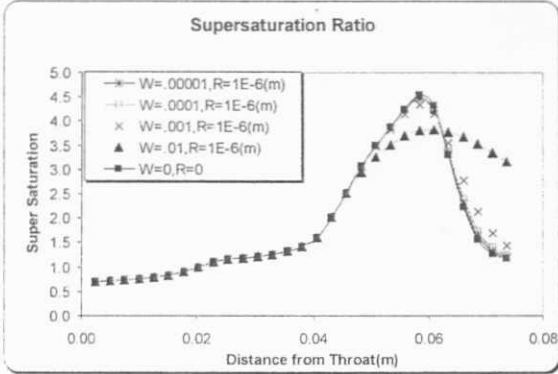
شکل (۵) اثر میزان اسپری بر روی مقدار تری



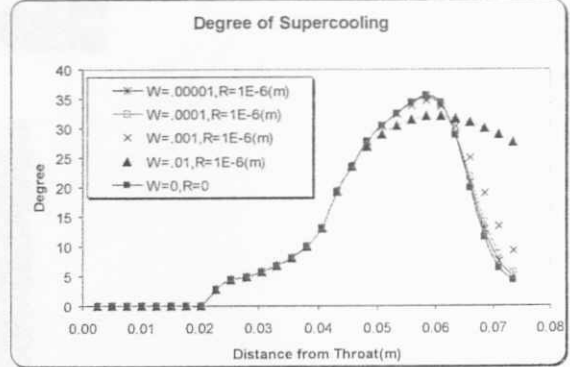
شکل (۷) اثر میزان اسپری بر تغییرات دمای بخار



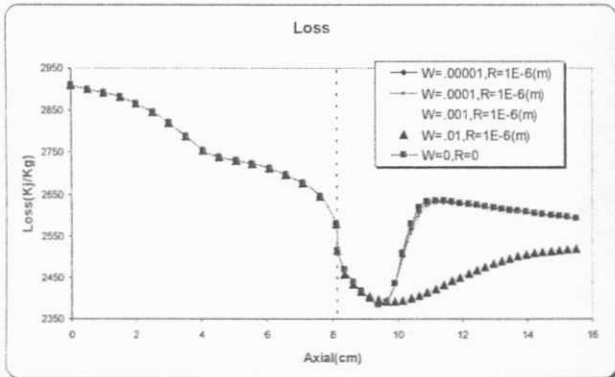
شکل (۶) اثر میزان اسپری بر تغییرات دمای قطره



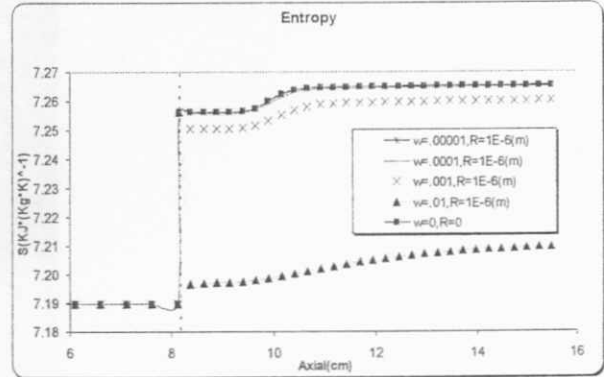
شکل (۹) اثر میزان اسپری بر تغییرات نسبت اشباع



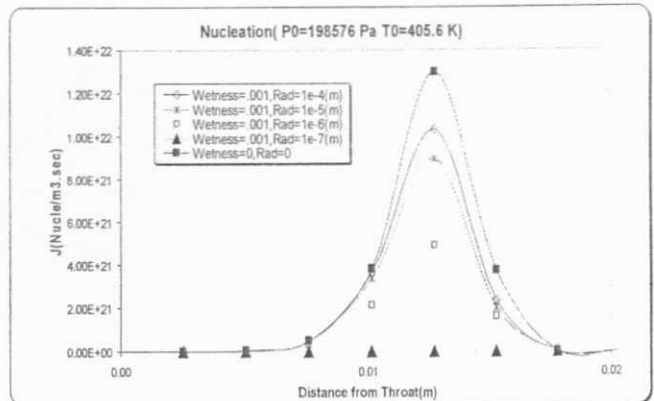
شکل (۸) اثر میزان اسپری بر تغییرات درجه مافوق سردی



شکل (۱۱) اثر میزان اسپری بر تلفات ناشی از انتروپی



شکل (۱۰) اثر میزان اسپری بر تغییرات انتروپی



شکل (۱۲) اثر میزان اسپری بر جوانه‌زایی در حالت میزان تری ثابت و شعاع متغیر