

## تأثیر رطوبت نسبی و چگالش غیرتعادلی بر تغییر پارامترهای عملکردی نازل‌های گذر صوت

حسن مسعودی راد<sup>۱</sup>، مهدی معرفت<sup>۲\*</sup>، رضا مداحیان<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری دانشگاه تربیت مدرس (h.masoudirad@modares.ac.ir)

<sup>۲</sup> استاد دانشگاه تربیت مدرس (نویسنده مسئول: maerefat@modares.ac.ir)

<sup>۳</sup> دانشیار دانشگاه تربیت مدرس (maddahian@modares.ac.ir)

### چکیده

چگالش غیرتعادلی بخار آب در جریان‌های گذر صوت تأثیر قابل‌توجهی بر عملکرد نازل‌ها و تجهیزات هوایی دارد و در شرایط مرطوب، باید این پدیده در فرآیند طراحی و تحلیل جریان مورد توجه قرار گیرد. در این پژوهش، تأثیر رطوبت نسبی بر جریان گذر صوت در نازل با استفاده از مدل‌سازی عددی و شبیه‌سازی چگالش غیرتعادلی بخار آب بررسی شد. معادلات حاکم با در نظر گرفتن فرآیندهای هسته‌زایی و رشد قطرات، به کمک توابع کاربری در یک حل عددی تراکم پذیر حل شدند. نتایج نشان داد که حضور بخار آب تغییرات قابل‌توجهی در عدد ماخ، فشار و دما ایجاد می‌کند. در حضور بخار آب در رطوبت هوای ۱۰٪، مدل هوای خشک مقدار عدد ماخ را ۱۶ درصد بیشتر از مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل مرطوب تخمین زده و فشار و دمای خروجی را به ترتیب ۴۳.۳ و ۵۲ درصد کمتر برآورد می‌کند. افزایش رطوبت نسبی شدت شوک چگالشی را افزایش داده و نرخ هسته‌زایی را در رطوبت بالاتر از ۸۰ درصد به مقدار حداکثری می‌رساند. همچنین، در رطوبت نسبی بالای ۶۰ درصد، تعداد قطرات چگالش یافته به‌طور ناگهانی افزایش می‌یابد. بر این اساس، در طراحی نازل‌های گذر صوت و کمپرسورها در شرایط مرطوب، باید چگالش غیرتعادلی بخار آب در لحاظ شود تا از خطاهای عملکردی جلوگیری گردد.

### تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۲۴

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۱۰

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۱۲

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۶/۰۱

### کلیدواژه‌ها:

چگالش غیرتعادلی

نازل گذر صوت

هسته‌زایی

شبیه‌سازی عددی

رطوبت

**استناد:** مسعودی راد، حسن، معرفت، مهدی، مداحیان، رضا. تأثیر رطوبت نسبی و چگالش غیرتعادلی بر تغییر پارامترهای عملکردی نازل‌های گذر صوت. مکانیک سیالات و آیرودینامیک (۱۴۰۴)؛ ۱۴ (۱): ۶۲-۵۱.

<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23223278.1404.14.1.4.7>



© نویسندگان.

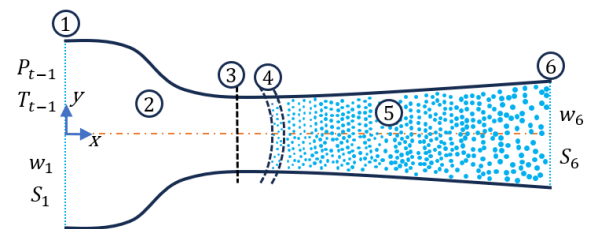
ناشر: دانشگاه جام امام حسین (ع).

## ۱- مقدمه

در زمینه طراحی و بهینه‌سازی سامانه‌های جریان سیال گازی، تحلیل جریان‌های گذر صوت در نازل‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. یکی از عوامل تأثیرگذار در این جریان‌ها، رطوبت نسبی هوا است که می‌تواند ویژگی‌های فیزیکی و حرارتی گازها را تغییر دهد. هوای مرطوب ترکیبی از هوای خشک و بخار آب است و رطوبت نسبی آن به صورت نسبت فشار بخار آب به فشار اشباع تعریف می‌شود:

$$S = \frac{P_v}{P_g} \quad (1)$$

در حالت  $S > 1$ ، سیستم به حالت فوق اشباع وارد شده از حالت تعادل خارج می‌شود. در این شرایط، اگر قطرات تشکیل شده از اندازه بحرانی بزرگ‌تر باشند، بخار فوق سرد به جوانه زنی قطرات منجر شده و سیستم را به تعادل بازمی‌گرداند.



شکل (۱): چگالش قطرات در یک هوای مرطوب ۱- ورودی ۲- ناحیه مرطوب تعادلی حاوی بخار ۳- گلوگاه ۴- ناحیه جوانه زایی (چگالش سریع) ۵- ناحیه مرطوب تعادلی حاوی قطره ۶- خروجی

نازل‌های گذر صوت برای شتاب‌دهی جریان هوا به سرعت‌های فراصوت طراحی می‌شوند و در صنایعی مانند هوافضا، تولید انرژی، و سامانه‌های پیش‌ران‌شان کاربرد دارند [۱، ۲]. این نازل‌ها شرایطی را ایجاد می‌کنند که در آن فشار، دما و عدد ماخ به‌طور قابل توجهی تغییر می‌کنند. سیال کاری اصلی در این فرآیند، هوا است که پس از فیلتراسیون همچنان حاوی بخار آب باقی می‌ماند، زیرا حذف کامل رطوبت امکان‌پذیر نیست [۳]. حضور بخار آب در جریان مافوق صوت می‌تواند به چگالش غیرتعادلی منجر شود که تأثیر مستقیم بر ساختار جریان، توزیع فشار و دما دارد. این پدیده در سامانه‌هایی مانند تونل‌های باد یا کمپرسورهای صنعتی، می‌تواند موجب کاهش بازده، افزایش افت فشار و حتی آسیب به اجزا شود [۴]. بنابراین، توجه به اثرات رطوبت و چگالش در طراحی و عملکرد نازل‌های گذر صوت، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است.

رطوبت نسبی و دمای محیط، دو عامل کلیدی هستند که بر رفتار جریان فراصوت تأثیر می‌گذارند. تحقیقات نشان داده‌اند که افزایش رطوبت نسبی می‌تواند در برخی موارد، کارایی حرارتی را

تحت تأثیر قرار داده و باعث تغییرات چشمگیری در عدد ماخ، توزیع فشار و بازده سیستم شود [۵، ۶]. هاسکل [۳] گزارش کرده است که رطوبت بیش از ۵۰ درصد در طولانی‌مدت می‌تواند به مشکلات ساختاری در اجزای فلزی منجر شود. سانابه و تهانی [۷] دریافتند که تزریق آب توان مصرفی کل را کاهش می‌دهد، اما ممکن است به دلیل افزایش چگالی هوا، توان موردنیاز برخی اجزا افزایش یابد. سان و همکاران [۸] تأیید کردند که حرکت قطرات در جریان می‌تواند ضمن تغییرات در خواص جریان، بر پایداری آن اثر منفی بگذارد.

پدیده چگالش غیرتعادلی در نازل‌های گذر صوت، از دیدگاه مهندسی اهمیت ویژه‌ای دارد. پراتل [۹] در سال ۱۹۳۶ مفهوم موج‌های تراکمی را در این نازل‌ها معرفی کرد. شنر [۱۰] با روش‌های عددی نشان داد که بخار آب در جریان فراصوت می‌تواند شوک‌های تراکمی ایجاد کند. این شوک‌ها با آزادسازی گرمای نهان، جریان را به حالت غیرتعادلی می‌برند و بر عملکرد نازل‌ها تأثیر می‌گذارند. ویشنفسکی و همکاران [۱۱] مدل‌هایی برای پیش‌بینی تراکم بخار در جریان فراصوت ارائه کردند که دقت شبیه‌سازی‌ها را بهبود بخشید. دایکاس و وریفسکی [۱۲] با مدل‌سازی عددی، تحلیل‌های مؤثری از جریان چگالش در نازل‌ها ارائه دادند. بیشتر مطالعات در این حوزه مرتبط با اثرات چگالش در حضور سیال عامل بخار آب است. در حالی که اثر رطوبت در هوا کمتر مورد توجه بوده است. مطالعات وانگ و گو [۱۳] نشان داد که پدیده چگالش در هوای مرطوب در عملکرد نازل نقش تعیین‌کننده‌ای دارد و این اثر باید در طراحی سامانه‌های واقعی در نظر گرفته شود.

با توجه به این یافته‌ها، در نظر گرفتن اثرات رطوبت در فرآیند طراحی نازل‌های گذر صوت، امری ضروری است که می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر عملکرد سامانه‌های هوانوردی و صنعتی داشته باشد. در این مطالعه، با استفاده از نرم‌افزار انسیس فلونت و پیاده‌سازی مدل‌های چگالش در قالب کد نویسی C، اثر رطوبت نسبی بر پدیده چگالش غیرتعادلی در نازل‌های گذر صوت بررسی شده است. هدف این پژوهش، درک بهتر تأثیر رطوبت بر جریان برای طراحی دقیق‌تر و کارآمدتر نازل‌ها در شرایط مرطوب است.

## ۲- معادلات حاکم و مدل‌ها

شبیه‌سازی جریان هوای مرطوب در نازل‌های گذر صوت با استفاده از نرم‌افزار انسیس فلونت انجام شده است. برای تحلیل دوفازی جریان (فاز گازی شامل هوا و بخار آب، و فاز مایع شامل قطرات چگالیده)، از رویکرد اویلری مبتنی بر معادلات گونه استفاده شده است. مخلوط هوا و بخار آب به صورت تک سیالی مدل شده و معادلات بقای جرم، تکانه، و انرژی برای کل مخلوط

$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} \quad (3)$$

$$\frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot [u(\rho E + p)] = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T + \boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{u}) + S_h \quad (4)$$

که در آن  $\rho$ ،  $\mathbf{u}$ ،  $p$  و  $E$  به ترتیب معرف چگالی، بردار سرعت، فشار و انرژی کل  $E = h + \frac{u^2}{2} - \frac{p}{\rho}$  است.  $k_{eff}$  و  $T$

ضریب هدایت مؤثر و دما است. عبارت چشمه  $S_E$  از معادلات فرآیند چگالش محاسبه می‌شود. چگالی از رابطه  $\rho = \rho_v \gamma_v + \rho_l \gamma_l$  به دست می‌آید.

همچنین به منظور مدل‌سازی آشفستگی از مدل  $k - \omega$  استفاده شده است. این مدل به دلیل دقت بالا در پیش‌بینی جریان‌های با گرادیان فشار قوی، مانند شوک‌های تراکمی ناشی از چگالش غیر تعادلی، و رفتار مناسب در نزدیکی دیواره‌های نازل (شرط بدون لغزش) انتخاب شده است. مدل  $k - \omega$  تعادل مناسبی بین دقت و هزینه محاسباتی ارائه می‌دهد و برای شبیه‌سازی جریان‌های گذر صوت با چگالش غیر تعادلی مناسب است [۱۱ و ۱۴]. باین حال، در شرایط با شدت توربولانس بالا یا تغییرات چگالی شدید، ممکن است مدل‌های پیشرفته‌تر مانند LES مورد نیاز باشد، اما برای اهداف این مطالعه، این مدل به دلیل سازگاری با داده‌های تجربی [۲۰] کافی است. معادلات و شرح آن را می‌توان در راهنمای نرم‌افزار فلوئنت [۱۶] که فرم معادلات ۵ و ۶ ارائه شده می‌توان یافت:

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} k) = P_k - \beta^* \rho k \omega + \nabla \cdot ((\mu + \sigma_k \mu_t) \nabla k) \quad (5)$$

$$\frac{\partial (\rho \omega)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \omega) = \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \beta \rho \omega^2 + \nabla \cdot ((\mu + \sigma_\omega \mu_t) \nabla \omega) + 2(1 - F_1) \frac{\rho \sigma_\omega \omega^2}{\omega} \nabla k \cdot \nabla \omega \quad (6)$$

## ۲-۱- مدل‌سازی چگالش بخار و رشد قطرات آب

برای هر فاز گونه (شامل بخار،  $v$ ، و قطرات آب،  $l$ )، یک معادله انتقال به صورت زیر حل می‌شود:

$$\frac{\partial \rho Y_i}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho Y_i \mathbf{u}) = S_i \quad (7)$$

که در آن  $Y_i$  و  $S_i$  کسر حجمی و عبارت چشمه برای گونه  $i$  است. گونه  $i$  می‌تواند به صورت بخار ( $v$ ) و یا مایع ( $l$ ) باشد. برای به دست آوردن کسر حجمی هوا از معادله بقای گونه استفاده می‌شود. همچنین، به منظور یافتن چگالش قطرات مایع در هر نقطه به یک معادله انتقال اضافی دیگر نیاز است تا از طریق آن تعداد خوشه‌های مولکولی (کلاسترهای مایع) پدید آمده را به دست آورد.

حل شده‌اند. معادله انتقال گونه برای کسر جرمی بخار آب به منظور توصیف رفتار فاز گازی به معادلات اضافه شده است. برای فاز مایع، یک معادله بقای جرم اویلری جداگانه برای کسر جرمی مایع تعریف شده که نرخ چگالش و نرخ هسته‌زایی را شامل می‌شود. ویژگی‌های سیال مانند لزجت و هدایت حرارتی برای مخلوط هوا-بخار-مایع محاسبه می‌شود.

به جای استفاده از مدل‌های چندفازی استاندارد مانند VOF یا اویلری-اویلری، این رویکرد به دلیل سادگی و تمرکز بر چگالش غیر تعادلی انتخاب شده است. در این مدل‌سازی، چندین فرض در نظر گرفته شده است:

- نادیده گرفتن سرعت لغزشی بین فازها

فرض شده است که سرعت فاز مایع (قطرات) و فاز گاز (هوا و بخار) یکسان است. این فرض به دلیل اندازه بسیار کوچک قطرات چگالیده شده (در مقیاس نانومتر، شکل ۱۲) و نیروی درگ غالب بین فازها اعمال شده است، که باعث می‌شود سرعت قطرات به سرعت جریان گاز نزدیک باشد. باین حال، در شرایط واقعی، به دلیل اختلاف چگالی بین فازها، به ویژه در سلول‌های محاسباتی با کسر جرمی بالای فاز مایع، لغزش بین فازها ممکن است رخ دهد. این فرض ساده‌سازی برای کاهش پیچیدگی محاسبات و تمرکز بر اثرات چگالش غیر تعادلی اتخاذ شده است، اما ممکن است در مواردی که فاز مایع غالب است، دقت مدل را محدود کند.

- چشم‌پوشی از تعاملات بین قطرات مایع به دلیل اندازه کوچک آن‌ها

- ثابت در نظر گرفتن ظرفیت حرارتی قطرات مایع

این فرضیات در شرایط خاص ممکن است باعث انحراف نتایج شوند، اما برای اهداف این مطالعه که بر بررسی چگالش غیر تعادلی متمرکز است، مناسب هستند.

نرم‌افزارهای تجاری غالباً توانایی شبیه‌سازی چگالش بخار آب در حالت یک‌فاز بخار منفرد نه به همراه فاز دیگر (هوا) را دارد که در برخی از پژوهش‌های جدید نیز مورد استفاده قرار گرفته است [۱۴، ۱۵]. برای بررسی اثر رطوبت نسبی در جریان‌های هوای محتوی بخار آب، لازم است که یک مدل پیچیده‌تر پیاده‌سازی شود که قابلیت شبیه‌سازی تغییرات رطوبت نسبی و تأثیر آن بر محل تشکیل شوک‌ها، توزیع فشار و دما و سایر ویژگی‌های دینامیکی جریان را در برگیرد. این مدل می‌تواند به طور دقیق‌تر تأثیر رطوبت نسبی را در تغییرات رفتار شوک‌های فشرده‌سازی و دما مدل‌سازی کند. در یک جریان گذر صوت، جریان سیال توسط معادلات دیفرانسیل جزئی کنترل می‌شود که بقای جرم، تکانه و انرژی را توصیف می‌کنند. برای مدل‌سازی جریان متراکم از مدل RANS استفاده شده و معادلات انتقال به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (2)$$

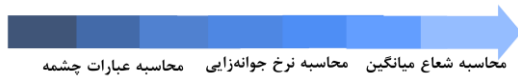
همچنین  $\frac{dr}{dt}$  با توجه به رابطه ارائه شده توسط یانگ [۱۸] به دست می‌آید.

$$\frac{dr}{dt} = \frac{p}{h_i \rho_i \sqrt{2\pi R_v T}} \frac{\gamma+1}{2\gamma} C_p (T_s - T) \quad (۱۸)$$

### ۳- روش عددی و حل معادلات

در این مقاله، نرم‌افزار تجاری فلوئنت نسخه ۲۰۲۳ به‌عنوان حل گر معادلات انتقال ۲ تا ۸ بکار گرفته شد. معادله ۸ به‌عنوان یک UDS<sup>۱</sup> برای نرم‌افزار تعریف گردید. معادلات ۹ تا ۱۸ نیز به‌صورت یک برنامه به زبان C و از طریق UDF<sup>۲</sup> معرفی شدند. حل معادلات از طریق الگوریتم حل توأمان فشار و سرعت<sup>۳</sup> انجام شده که این الگوریتم به‌طور هم‌زمان معادلات فشار و سرعت را حل می‌کند و به‌ویژه برای شبیه‌سازی جریان‌های پیچیده و چند فازی مانند چگالش بخار آب بسیار مؤثر است [۱۹]. دقت گسسته سازی برای تمامی معادلات مرتبه دو پیشرو در نظر گرفته شد. معیار همگرایی حل برای تمامی معادلات ۱۰<sup>-۵</sup> لحاظ گردید. الگوریتم حل این مسئله به‌طور خلاصه در شکل ۲ ارائه شده است.

اجرای روش عددی محاسبه نرخ جرمی تعیین شعاع بحرانی تعریف معادلات انتقال



شکل (۲): الگوریتم حل در مسئله چگالش غیرتعادلی

### ۴- میدان محاسباتی

در این مطالعه، هندسه نازل طبق مدل ارائه شده توسط مووز و استین [۲۰] مورد استفاده قرار گرفته است. این نازل از نوع همگرا-واگرا است که برای آن نتایج تجربی فرآیند چگالش بخار آب در جریان مافوق صوت به‌دست آمده است. گلوگاه نازل در فاصله ۸۲/۲ mm از ابتدای نازل ( $L_1$ ) و ارتفاع گلوگاه ( $H_2$ ) و عمق نازل هر کدام ۱۰ mm است. شکل ۳ پروفیل این نازل همگرا-واگرا را نشان می‌دهد. قسمت مادون صوت نازل از یک منحنی با شعاع ۵۳ mm و قسمت واگرا از یک منحنی با شعاع ۶۸۴ mm تشکیل شده است. میدان حل به‌صورت دوبعدی و به‌صورت نیمه به جهت تقارن ایجاد شده است. همچنین شبکه میدان حل در این شکل نشان داده شده است. بر این اساس در ناحیه وسط میدان حل به دلیل وجود گرادیان‌های شدیدتر به دلیل موج تراکمی شبکه ریزتری ایجاد شده است.

$$\frac{\partial \rho N}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} N) = S_N \quad (۸)$$

که در آن  $N$  و  $S_N$  تعداد قطرات و عبارت چشمه برای تولید قطرات است.

### ۲-۲ عبارات چشمه و مدل سازی رشد قطرات

با محاسبه عبارات چشمه در معادلات فوق، دسته معادلات کافی برای محاسبه پدیده چگالش به دست می‌آید. عبارات چشمه برای معادلات ۳ تا ۵ عبارت است از:

$$S_I = \dot{m} \quad (۹)$$

$$S_V = -\dot{m} \quad (۱۰)$$

$$S_E = \dot{m} h_i \quad (۱۱)$$

$$S_N = \rho J \quad (۱۲)$$

که در آن  $\dot{m}$  نرخ جرم چگالش شده بر واحد حجم سیال است. همچنین  $h_i$  گرمای نهان تبخیر و  $J$  نرخ جوانه زایی قطرات بر واحد حجم با شعاع بحرانی  $r^*$  است. شعاع بحرانی قطرات برای حالتی که  $S > 1$  باشد از رابطه کلوین هلمهولتز و بر اساس رابطه زیر به دست می‌آید:

$$r^* = \frac{2\sigma}{\rho_l R_v T \ln(S)} \quad (۱۳)$$

پارامتر  $J$  از رابطه بولتزمن و با توجه به معادله جوانه زایی کلاسیک محاسبه می‌شود.

$$J = \frac{q_c}{1 + \phi} \frac{\rho}{\rho_l} \sqrt{\frac{2\sigma}{\pi m_v^3}} e^{\left(\frac{-4\pi r^* \sigma}{3k_b T}\right)} \quad (۱۴)$$

که در آن  $\sigma$ ،  $m_v$  و  $k_b$  به ترتیب کشش سطحی، جرم یک مولکول آب و ثابت بولتزمن است. مقدار  $q_c$  به‌عنوان ضریب چگالش بوده و یک فرض می‌شود. همچنین  $\phi$  در ضریب اصلاحی با توجه به مطالعه کانترویتز [۱۷] به‌صورت رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\phi = \frac{2(\gamma-1)}{(\gamma+1)} \frac{h_i}{R_v T} \left( \frac{h_i}{R_v T} - \frac{1}{2} \right) \quad (۱۵)$$

نرخ جرمی قطرات تشکیل شده ( $\dot{m}$ ) ناشی از نرخ جرم قطرات تشکیل شده در حالت بحرانی و نرخ جرمی رشد آن‌ها در بخار فوق سرد است.

$$\dot{m} = \rho_l \frac{4}{3} \pi r^{*3} + \rho_l 4\pi \bar{r}^2 N \frac{dr}{dt} \quad (۱۶)$$

که در آن  $\bar{r}$  شعاع میانگین قطرات است و با توجه به رابطه زیر بر هر سلول محاسباتی حاوی کسر حجمی مایع به دست می‌آید.

$$\bar{r} = \sqrt[3]{\frac{3\rho_l Y_l}{4\pi \rho_l N}} \quad (۱۷)$$

<sup>۱</sup> User-Defined Scalar

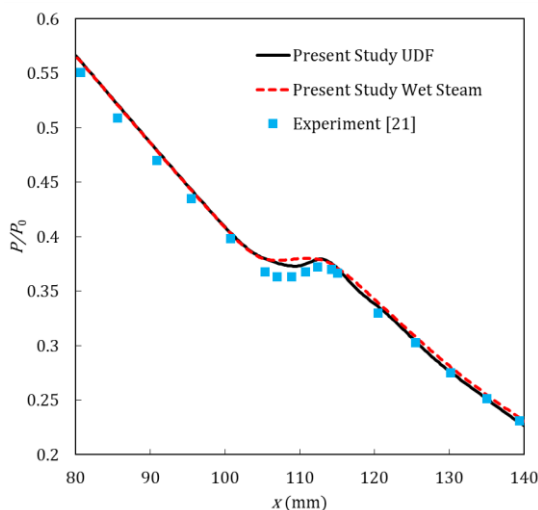
<sup>۲</sup> User-Defined Functions

<sup>۳</sup> Coupled Algorithm

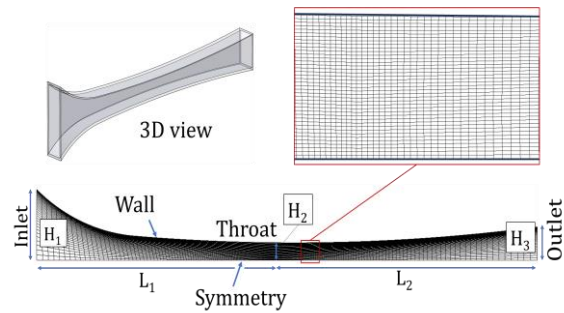
مشاهده شد، که نشان‌دهنده انتقال جریان به حالت غیر تعادلی است. بیشترین اختلاف با نتایج تجربی در همین ناحیه اتفاق افتاده است که می‌تواند ناشی از فرضیاتی باشد که برای حل مسئله از قبیل فرض عدم لغزش بین فازها و یا تعاملات بین قطرات باشد. با این حال، نتایج کلی شبیه‌سازی با روندهای تجربی [۲۰] همخوانی خوبی دارد، و اختلاف در موقعیت شوک چگالشی به دلیل ساده‌سازی‌های مدل‌سازی قابل انتظار است.

## ۵-۲- استقلال حل از شبکه

به منظور بررسی استقلال حل از شبکه محاسباتی چهار شبکه محاسباتی مختلف در نظر گرفته شد. شبکه‌های درشت، متوسط، ریز و ریز تر که به ترتیب به تعداد ۲۰۰۰، ۸۰۰۰، ۳۲۰۰۰ و ۱۲۸۰۰۰ گره به صورت منظم ایجاد شدند. شکل ۵ تغییرات جوانه زایی و نسبت فشار استاتیک به فشار کل را بر روی محور برای حالت ورودی بخار فوق گرم در شبکه‌های مختلف را نشان می‌دهد. بر اساس این شکل با ریز شدن شبکه استقلال حل از شبکه با دقت مطلوبی ایجاد شده است. پارامتر جوانه زایی به دلیل ماهیت آن که در ناحیه بسیار باریکی که ایجاد می‌شود بیشترین حساسیت را نسبت به شبکه دارد. بقیه پارامترها تأثیر کمتری از شبکه دارند به طوری که با تعداد شبکه کمتر نیز می‌توان استقلال نتایج را مشاهده کرد. همان‌طور که از شکل ۵ مشخص است تغییرات نسبت فشار بر روی محور برای حالت ورودی بخار فوق گرم در شبکه‌های مختلف در ناحیه چگالش سریع حساسیت بالاتری دارد که با افزایش شبکه استقلال حل ایجاد شده است.



شکل (۴): تغییرات فشار در مدل ارائه شده و مقایسه با نتایج تجربی و مدل بخار مرطوب فلوئنت



شکل (۳): هندسه نازل لاول شبکه ایجاد شده در آن

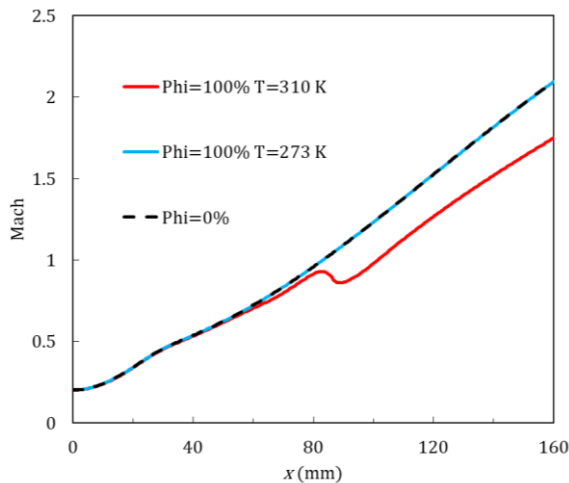
## ۴-۱- شرایط مرزی

شرایط مرزی در شکل ۳ نشان داده شده است. مرز پایین میدان به صورت تقارن است. برای شبیه‌سازی جریان در نازل گذر صوت، فشار کل ورودی ۱ atm، دمای کل ۲۷۳ K یا ۳۱۰ K (به عنوان مرجع برای شرایط مرطوب)، و رطوبت نسبی ۰٪، ۲۰٪، ۴۰٪، ۶۰٪، ۸۰٪ و ۱۰۰٪ تعریف شده است. جریان ورودی مادون صوت است و کسر جرمی بخار آب ( $\gamma_v$ ) بر اساس رطوبت نسبی محاسبه شده است. در خروجی، فشار استاتیکی به گونه‌ای انتخاب می‌شود که جریان مافوق صوت برقرار شود. از آنجاکه جریان مافوق صوت است و جریان برگشتی وجود ندارد شرایط دما و کسر جرمی برگشتی در محاسبات تأثیری ندارد. دیواره‌های نازل با شرط بدون لغزش و آدیاباتیک مدل‌سازی شده‌اند. این شرایط با داده‌های تجربی مووز و استین [۲۰] سازگار است.

## ۵- نتایج

### ۵-۱- اعتبارسنجی و صحت‌سنجی

به منظور بررسی اعتبار مدل‌سازی، نتایج مطالعه حاضر با نتایج مووز و استین [۲۰] مقایسه و در شکل زیر نشان داده شده است. در این شکل نتایج تحقیق حاضر با نتایج مدل بخار مرطوب نرم‌افزار تجاری فلوئنت نیز مقایسه شده است. این نتایج برای حالتی است که بخار آب به صورت فوق گرم وارد می‌شود. ورودی بخار آب با فشار کلی ۴۰/۳ kpa و دمای کلی ۳۶۶ K است. مدل ارائه شده می‌تواند با در نظر گرفتن سهم ۱۰٪ برای بخار آب و در نبود هوا به نتایج زیر منتهی شود. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که تراکم بخار آب در منطقه مافوق صوت نازل، نزدیک به گلوگاه، آغاز می‌شود. شکل ۴ نشان می‌دهد که این مدل پروفیل فشار را با دقت مطلوبی در ناحیه چگالش سریع و بعد از آن تخمین می‌زند به طوری که خطای شبیه‌سازی در حداکثر مقدار آن کمتر از ۴٪ است. فشار استاتیکی در طول محور نازل کاهش می‌یابد. کاهش فشار با شروع تراکم همراه است و شوک تراکم در  $x = 105 \text{ mm}$

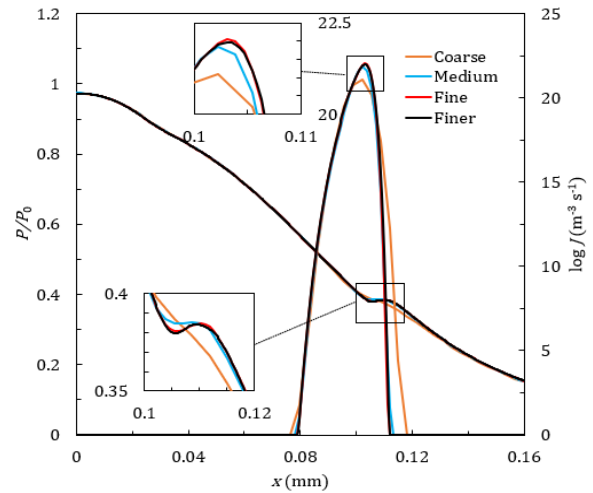


شکل (۶): تأثیر رطوبت نسبی و دمای ورودی بر پروفیل عدد ماخ در نازل گذر صوت در فشار یک اتمسفر

شکل ۷ تأثیر رطوبت نسبی بر رفتار جریان در نازل گذر صوت را در فشار یک اتمسفر نشان می‌دهد. این شکل شامل سه نمودار است که به ترتیب هندسه نازل، تغییرات فشار نسبی و تغییرات دمای نسبی را در طول نازل نمایش می‌دهند. در نمودار الف، هندسه نازل نشان داده شده است. در ناحیه گلوگاه و در فشار atm و دمای ۳۱۰ K، برای شرایط رطوبت اشباع، یک منطقه چگالش سریع مشاهده می‌شود که تأثیر قابل توجهی بر رفتار ترمودینامیکی جریان دارد. در این ناحیه، نقطه ویلسون<sup>۱</sup> نیز مشخص است که محل شروع چگالش ناگهانی در جریان مرطوب است.

در نمودار ب، تغییرات فشار نسبی در دو شرایط مختلف، یعنی هوای خشک و هوای مرطوب، بررسی شده است. در شرایط خشک، کاهش فشار به صورت یکنواخت در طول نازل ادامه دارد. اما در شرایط رطوبت اشباع، یک افت ناگهانی فشار در نزدیکی گلوگاه مشاهده می‌شود که به دلیل چگالش بخار آب و آزاد شدن گرمای نهان رخ می‌دهد. همچنین، در خروجی نازل، مقدار فشار برای شرایط خشک برابر با ۱۱/۲ kpa و برای شرایط مرطوب برابر با ۱۶/۱ kpa است. این اختلاف نشان می‌دهد که فشار خروجی در شرایط مرطوب حدود ۴۳/۳٪ بیشتر از حالت خشک است.

در نمودار ج، تغییرات دمای نسبی نمایش داده شده است. در شرایط خشک، دما به صورت پیوسته کاهش می‌یابد، اما در شرایط مرطوب، یک افت دمایی ناگهانی در محدوده چگالش سریع مشاهده می‌شود. این کاهش دما ناشی از آزاد شدن گرمای نهان در اثر تبدیل بخار آب به قطرات مایع است که در نتیجه بر عدد ماخ نیز تأثیر می‌گذارد به طوری که عدد ماخ در رطوبت نسبی ۱۰۰ درصد حدود ۱۶٪ کمتر است (شکل ۵). در خروجی نازل،



شکل (۵): تغییرات جوانه زایی و نسبت فشار بر روی محور برای حالت ورودی بخار فوق گرم در شبکه‌های مختلف

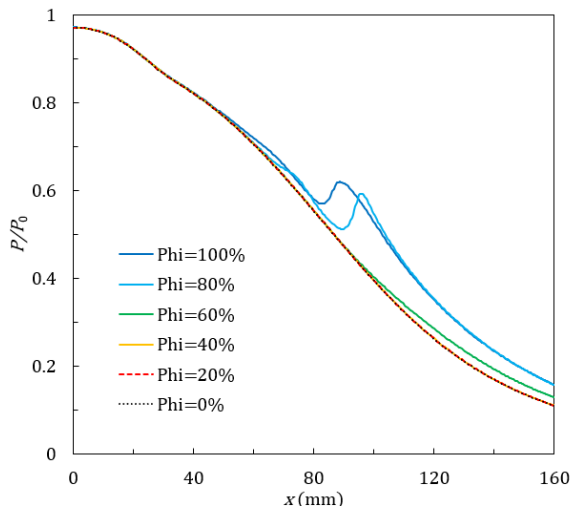
### ۵-۳- عملکرد هوای خشک و مرطوب در جریان گذر صوت

شکل ۶ تأثیر رطوبت نسبی و دمای ورودی بر پروفیل عدد ماخ در یک نازل گذر صوت را در فشار یک اتمسفر نشان می‌دهد. در شرایط خشک ( $\Phi=0\%$ )، جریان به صورت یکنواخت از رژیم زیرصوتی به فراصوتی شتاب گرفته و بدون تغییرات ناگهانی در عدد ماخ، از نازل عبور می‌کند. در مقابل، در شرایط رطوبت اشباع ( $\Phi=100\%$ )، رفتار جریان بسته به دمای ورودی تغییر می‌کند. در دمای ۲۷۳ K، عدد ماخ در طول نازل تقریباً مشابه شرایط خشک باقی می‌ماند. با این حال، در دمای ۳۱۰ K، یک افت ناگهانی در عدد ماخ در حوالی نقطه ۸۰ mm مشاهده می‌شود. دمای ورودی ۳۱۰ K به عنوان دمای مرجع انتخاب شده است، زیرا نماینده شرایط محیطی گرم و مرطوب (مانند سواحل جنوبی ایران) است که در آن رطوبت نسبی بالا و چگالش غیرتعدادی در نازل‌های گذر صوت محتمل‌تر است. این دما امکان بررسی تأثیر کسر جرمی بالای بخار آب بر تشکیل شوک‌های تراکمی و تغییرات عدد ماخ، فشار و دما را فراهم می‌کند. همچنین در دماهای بالاتر، ظرفیت هوا برای نگه داشتن رطوبت بیشتر است که منجر به افزایش مقدار اولیه بخار آب در مخلوط گاز می‌شود. بنابراین، در دمای بالاتر، چگالش بخار آب در نواحی بحرانی نازل محتمل‌تر بوده از این رو، در ادامه نتایج، دمای ۳۱۰ K به عنوان شرایط مرجع مورد بررسی قرار می‌گیرد تا تأثیر دقیق‌تر رطوبت نسبی و فرآیندهای چگالش در عملکرد نازل گذر صوت تحلیل شود.

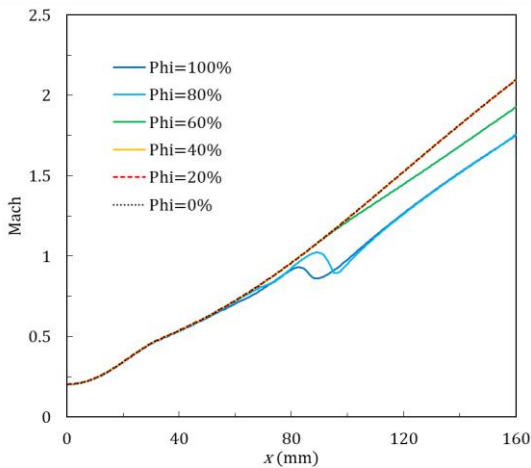
در شرایط رطوبت نسبی ۱۰۰٪، آزادسازی گرمای نهان دمای خروجی را به ۲۴۱ K افزایش می‌دهد (شکل ۷)، که از تنش‌های حرارتی ناشی از دماهای بسیار پایین در خروجی نازل جلوگیری می‌کند.

<sup>1</sup> Wilson Point

سمت پایین دست حرکت می‌کند. از طرفی این شکل نشان می‌دهد که رطوبت نسبی ۴۰٪ و کمتر از تقریباً تأثیر در فشار خروجی ندارد. تأثیر رطوبت نسبی هوا بر پروفیل عدد ماخ در طول نازل در شکل ۸ نمایش داده شده است. با افزایش رطوبت نسبی هوا از صفر تا ۱۰۰٪، عدد ماخ در خروجی نازل از ۲/۱۰ به ۱/۷۶ کاهش می‌یابد. افزایش رطوبت نسبی باعث افزایش شدت موج ضربه‌ای تراکم می‌شود که این امر ویژگی‌های خروجی نازل لا وال را تغییر می‌دهد. مطابق انتظار در رطوبت‌های نسبی پایین تغییری در عدد ماخ نسبت به حالت خشک ایجاد نشده است.



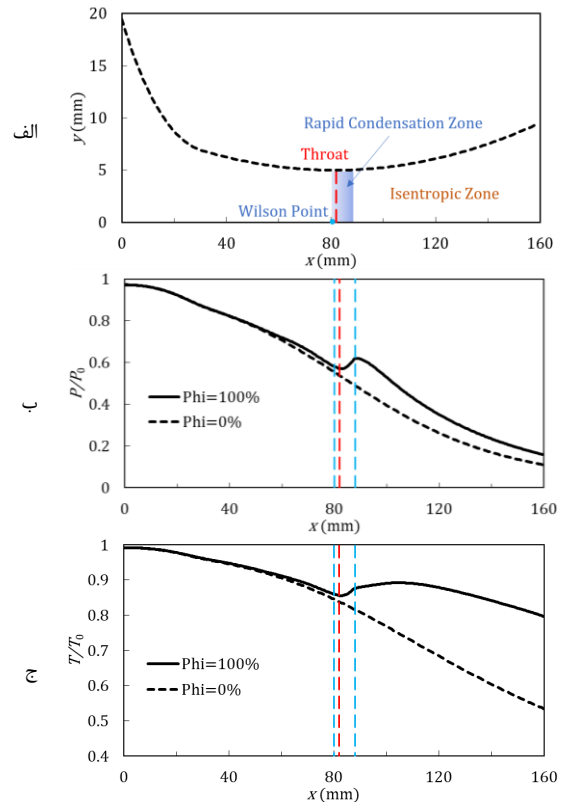
شکل (۸): پروفیل نسبت فشار در امتداد محور نازل سطوح مختلف رطوبت نسبی هوا



شکل (۹): پروفیل عدد ماخ در امتداد محور نازل سطوح مختلف رطوبت نسبی هوا

شکل ۱۰ توزیع نرخ خوشه‌های تشکیل شده در فرآیند هسته‌زایی را برای سطوح مختلف رطوبت نسبی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ناحیه هسته‌زایی قطرات در سطوح بالاتر رطوبت نسبی بیشتر و گسترده‌تر است. همچنین در رطوبت نسبی ۴۰٪

دمای هوای خشک برابر ۱۶۵ کلوین و دمای هوای مرطوب برابر ۲۵۳ کلوین است، که نشان می‌دهد دمای خروجی در شرایط مرطوب حدود ۵۲٪ بیشتر از حالت خشک است. نتایج نشان می‌دهند که اثر رطوبت بر خطوط جریان و رفتار جریان سیال در لایه مرزی اندک است، اما افزایش رطوبت در نازل گذر صوت باعث ایجاد تغییرات ناگهانی در فشار و دمای جریان شده و ممکن است پایداری جریان را تحت تأثیر قرار دهد. بنابراین، در ادامه تحلیل، تأثیر شرایط مرطوب در دمای ۳۱۰ K در نسبت‌های مختلف رطوبت بررسی خواهد شد تا تغییرات حاصل از چگالش بخار آب و اثرات ترمودینامیکی آن به‌دقت مطالعه شوند.

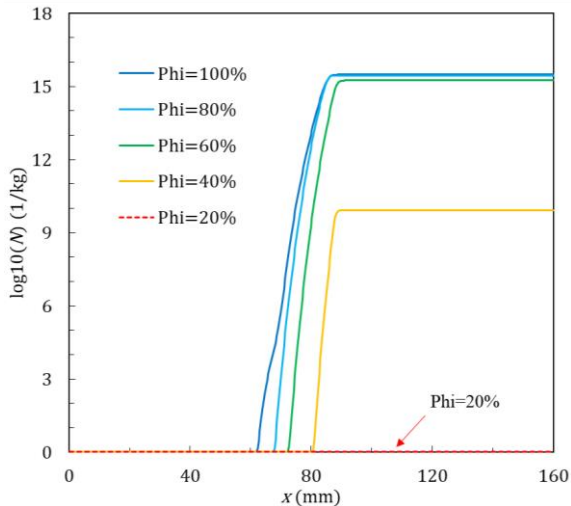


شکل (۷): (الف) موقعیت ناحیه چگالش سریع در نازل (ب) تغییرات نسبت فشار و (ج) نسبت دما روی محور برای حالت ورودی هوای خشک و رطوبت نسبی ۱۰۰٪

#### ۵-۴- تأثیر رطوبت نسبی هوا بر ویژگی‌های چگالش هوای مرطوب

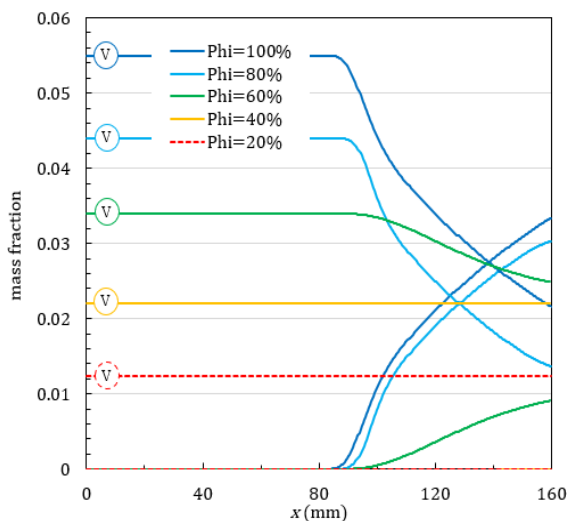
همان‌طور که در شکل ۸ نشان داده شده است، فشار در خروجی نازل با افزایش رطوبت نسبی هوای ورودی افزایش می‌یابد. در حالت رطوبت نسبی ۱۰۰٪، فشار خروجی مشابه رطوبت نسبی ۸۰٪ و بیشتر از حالت رطوبت نسبی ۶۰٪ است. موقعیت «نقطه ویلسون» برای سطوح مختلف رطوبت نسبی به مقدار کمی به

ورودی نازل می‌تواند تعداد قطرات در خروجی را کاهش دهد، به‌ویژه زمانی که رطوبت نسبی ورودی کمتر از ۶۰٪ باشد.



شکل (۱۱): تغییرات تعداد قطرات مایع در طول نازل برحسب درصد رطوبت

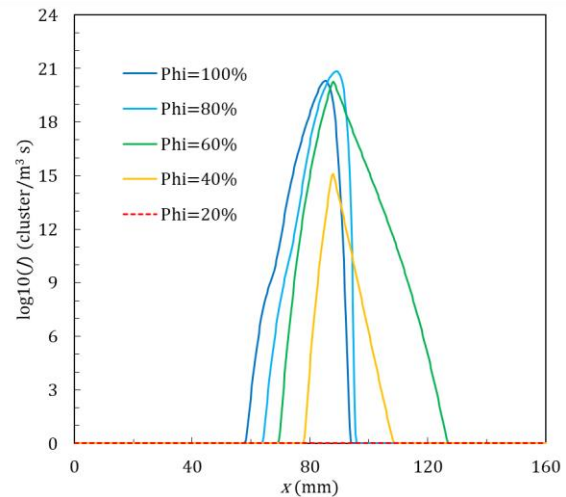
پروفیل‌های کسر جرمی مایع و بخار آب برای سطوح مختلف رطوبت نسبی در شکل ۱۲ ارائه شده است. نمودارهای که با علامت  $v$  علامت‌گذاری شده‌اند مربوط به کسر جرمی بخار آب در هوا هستند. بر اساس این شکل، کسر جرمی مایع با افزایش رطوبت نسبی هوای مرطوب افزایش می‌یابد. بیشترین کسر جرمی مایع در خروجی نازل ۳/۲٪ است که مربوط به رطوبت نسبی ۱۰۰٪ است. این مقدار با کاهش رطوبت نسبی تا ۶۰٪ به حدود ۰/۹٪ کاهش می‌یابد. همچنین در رطوبت نسبی ۲۰٪ و ۴۰٪ علی‌رغم وجود بخار آب در هوا، کسر جرمی مایع به‌طور محسوسی کاهش می‌یابد به‌طوری‌که در نمودار ارائه شده قابل مشاهده نیست و از مرتبه نزدیک به صفر است.



شکل (۱۲): تغییرات کسر جرمی مایع در طول نازل برحسب درصد رطوبت

با وجود اینکه هسته‌زایی انجام شده ولی چون نرخ کلاستر به نسبت سطوح بالاتر رطوبت نسبی کمتر است تأثیری در پارامترهای عملکردی نازل به‌طور ویژه ندارد. در رطوبت نسبی ۱۰۰٪ نقطه ویلسون زودتر از سطوح رطوبت نسبی ۸۰٪ و ۶۰٪ اتفاق افتاده و این عاملی در جهت عدم رشد بیشتر نرخ هسته‌زایی در نازل می‌تواند باشد. از همین رو، در رطوبت نسبی ۶۰٪ گستره فرآیند هسته‌زایی از سطوح بالاتر رطوبت نسبی به‌طور محسوسی بزرگ‌تر است. اوج نرخ هسته‌زایی با افزایش رطوبت نسبی به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. بیشترین نرخ هسته‌زایی از مرتبه نمایی  $21 \text{ m}^3/\text{s}$  در رطوبت نسبی ۸۰٪ به دست می‌آید، در حالی‌که در رطوبت نسبی ۴۰٪، این مقدار از مرتبه نمایی ۱۵ است.

پدیده هسته‌زایی با نرخ هسته‌زایی کم آغاز می‌شود و تعداد قطرات و کسر جرمی مایع تغییرات جزئی دارند. با افزایش سرمایه‌های بیش از حد هوای مرطوب، نرخ هسته‌زایی به‌سرعت افزایش می‌یابد تا زمانی که سرمایه‌های بیش از حد به حداکثر خود برسد. در این مرحله، نرخ هسته‌زایی در نقطه ویلسون به اوج خود می‌رسد. پس از نقطه ویلسون، اگرچه تعداد قطرات ثابت می‌ماند، اما شعاع قطرات به‌سرعت افزایش می‌یابد تا هوای مرطوب به حالت تعادل بازگردد.



شکل (۱۰): تغییرات نرخ خوشه‌های تشکیل شده در طول نازل برحسب درصد رطوبت

روند تغییرات تعداد قطرات در واحد جرم بر اساس رطوبت نسبی در شکل ۱۱ نمایش داده شده است. این نمودار نشان می‌دهد که رطوبت نسبی هوا تأثیر چشمگیری بر تعداد قطرات مترام شده دارد. در واقع، تعداد قطرات حالت‌های رطوبت نسبی ۶۰ تا ۱۰۰٪ هم‌مرتبه و با مرتبه نمایی ۱۵ است ولی در رطوبت نسبی ۴۰٪ مرتبه نمایی تعداد قطرات در واحد جرم ۳۴٪ کاهش می‌یابد. همچنین، موقعیت تشکیل قطرات با افزایش رطوبت نسبی به سمت بالادست حرکت می‌کند. بنابراین، کاهش رطوبت نسبی در

قطرات با یک تأخیر نسبت به افزایش شعاع قطرات رخ می‌دهد. این موضوع نشان‌دهنده آن است که ابتدا رشد شعاعی قطرات اتفاق افتاده و سپس با افزایش میزان تجمع بخار روی سطح، جرم قطرات به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد.

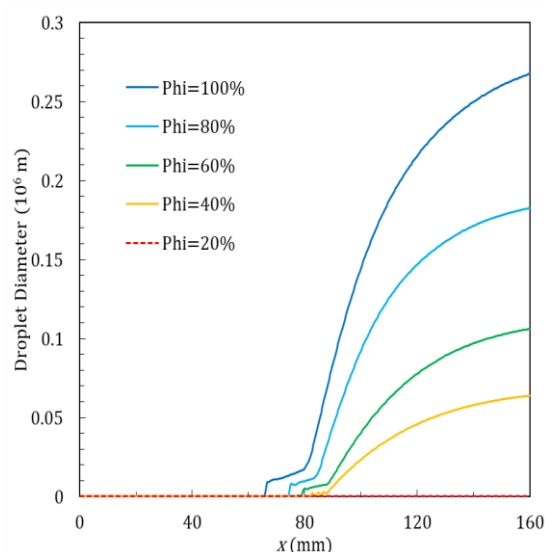
در مجموع، نتایج بیانگر آن است که در شرایطی که هوا دارای رطوبت بالاتری باشد، فرآیند چگالش قوی‌تر رخ داده و در نتیجه، اندازه قطرات در خروجی نازل بزرگ‌تر خواهد بود. از سوی دیگر، در شرایط رطوبت نسبی ۲۰ درصد، قطرات تشکیل شده بسیار کوچک هستند و رشد قابل‌ملاحظه‌ای در طول نازل مشاهده نمی‌شود، که نشان‌دهنده عدم وقوع چگالش گسترده در این شرایط است.

#### ۵-۵- بررسی موقعیت شوک انبساطی

بررسی شکل ۱۴ نشان می‌دهد که در شرایط رطوبت نسبی بالا (۱۰۰٪ و ۸۰٪)، یک ناحیه اختلال در عدد ماخ در حوالی گلوگاه نازل و کمی پس‌از آن مشاهده می‌شود. این تغییر ناگهانی در مقدار ماخ، همراه با افزایش فشار محلی، نشان‌دهنده رخداد یک موج ضربه‌ای ضعیف (شوگ چگالشی) است که در اثر چگالش ناگهانی بخار آب ایجاد شده است.

در این ناحیه، جریان به‌سرعت منبسط شده و به شرایط فوق سرد می‌رسد. در نتیجه، هسته‌زایی و چگالش سریع اتفاق افتاده و گرمای نهان آزاد می‌شود که منجر به افزایش فشار و کاهش ناگهانی عدد ماخ می‌شود. پس‌از این افت اولیه، جریان به تدریج به حالت تعادل بازمی‌گردد و عدد ماخ مجدداً افزایش می‌یابد. موقعیت این شوگ ضعیف در رطوبت نسبی ۸۰ و ۱۰۰ درصد به ترتیب در ۹۱ mm و ۸۵ mm از ابتدای نازل ایجاد شده و این نشان می‌دهد که با افزایش رطوبت نسبی شوگ چگالشی در بالادست جریان قرار می‌گیرد. شدت این شوگ ضعیف با افزایش میزان رطوبت بیشتر شده و در رطوبت‌های ۶۰٪ نیز به‌صورت بسیار خفیف‌تر رخ می‌دهد، اما در رطوبت ۲۰ و ۴۰ درصد و شرایط خشک، چنین پدیده‌ای رخ نمی‌دهد. شدت شوگ چگالشی از شکل ۸ قابل ارزیابی است به‌طوری‌که مقدار آن در کاهش عدد ماخ در حدود ۰/۱۵ برآورد می‌شود.

این پدیده در نازل‌های گذر صوتی و همچنین در کمپرسورهای هوایی که در حضور بخار آب کار می‌کنند، نشان‌دهنده اثرات چگالش غیر تعادلی بر ساختار جریان است. در شرایط خشک، چنین افت ناگهانی در عدد ماخ دیده نمی‌شود، که تأیید می‌کند این تغییرات ناشی از آزاد شدن گرمای نهان در اثر چگالش ناگهانی بخار آب است.



شکل (۱۳) تغییرات قطر قطرات در طول نازل برحسب درصد رطوبت

شکل ۱۳ نشان‌دهنده تغییرات قطر قطرات چگالش یافته در امتداد خط مرکزی نازل لا وال تحت شرایط مختلف رطوبت نسبی است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در تمامی شرایط، رشد قطرات از حوالی گلوگاه نازل، آغاز شده و در طول نازل به‌طور پیوسته افزایش می‌یابد. شروع افزایش قطر قطرات برای سطوح بالاتر رطوبت نسبی کمی زودتر اتفاق می‌افتد. در شرایطی که رطوبت نسبی اولیه بیشتر است، افزایش قطر قطرات نیز قابل‌توجه‌تر خواهد بود. در شرایط رطوبت نسبی ۱۰۰ درصد، قطره‌هایی قطرات به بیشترین مقدار خود یعنی ۲۶۴ nm رسیده، در حالی که در رطوبت‌های کمتر، میزان رشد قطرات محدودتر شده است.

در رطوبت نسبی ۲۰٪، خط مربوط به قطر قطرات در نیمه دوم نازل نزدیک به صفر قرار دارد. البته مقدار آن صفر نیست ولی از نظر مقیاسی نسبت به درصد‌های بالاتر بسیار کوچک‌تر است. این امر به دلیل نرخ چگالش بسیار پایین در رطوبت نسبی ۲۰٪ است، که منجر به تشکیل تعداد محدودی قطره با اندازه بسیار کوچک (نزدیک به صفر) می‌شود. در این شرایط، بخار آب کافی برای رشد قابل‌توجه قطرات در نیمه دوم نازل وجود ندارد، و قطر قطرات در مقیاس نمودار ناچیز است.

این افزایش قطر ناشی از تجمع مولکول‌های بخار آب روی سطح قطرات در هنگام رسیدن نرخ هسته‌زایی به مقدار بیشینه است. پس‌از این مرحله، تعداد هسته‌های چگالش تقریباً ثابت مانده، اما به دلیل وضعیت فوق سردشدگی، مولکول‌های بخار آب همچنان به سطح قطرات اضافه می‌شوند. این پدیده باعث رشد پیوسته قطرات تا خروجی نازل می‌شود. همچنین، مقایسه این نتایج با تغییرات کسر جرمی قطرات نشان می‌دهد که افزایش کسر جرمی

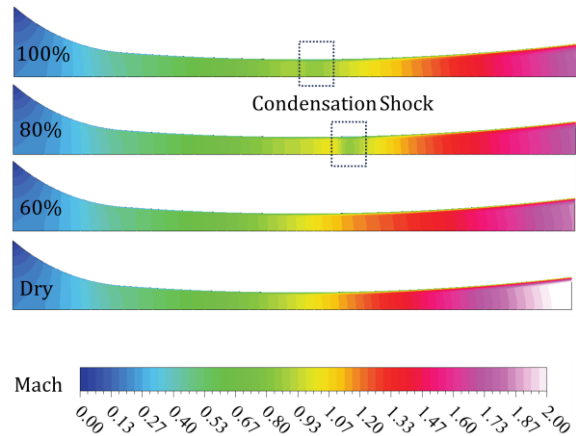
۷- فهرست علائم و اختصارات

$E$	انرژی کل، J
$h_i$	گرمای نهان تبخیر، J/kg
$J$	نرخ جوانه زایی قطرات بر واحد حجم، $1/m^3.s$
$k$	ضریب هدایت، W/m.K
$k_b$	ثابت بولتزمن، $1.380649 \times 10^{-23}$ J/K
$m_p$	جرم یک مولکول آب، kg
$\dot{m}$	نرخ جرم چگالش، $kg/m^3.s$
$N$	تعداد قطرات، $1/m^3$
$p$	فشار، pa
$q_c$	ضریب چگالش
$\bar{r}$	شعاع میانگین قطرات، m
$r^*$	شعاع بحرانی، m
$S$	رطوبت نسبی
$S_E$	چشمه حرارتی، $W/m^3$
$S_i$	چشمه گونه، $1/m^3.s$
$S_N$	چشمه تولید قطرات، $1/m^3.s$
$T$	دما، K
$t$	زمان، s
$u$	بردار سرعت، m/s
$Y$	کسر حجمی
<b>علائم یونانی</b>	
$\gamma$	نسبت ظرفیت گرمای ویژه
$\mu$	لزجت مولکولی، kg/m.s
$\rho$	چگالی، $kg/m^3$
$\sigma$	کشش سطحی، N/m
<b>زیرنویس</b>	
eff	مقدار مؤثر
$i$	نشان دهنده گونه
$l$	نشانده فاز مایع
$s$	نشان دهنده شرایط اشباع
$v$	نشانده فاز بخار

۸- مراجع

[1] Luo X, Wang J, Dooner M, Clarke J. Overview of current development in compressed air energy storage technology. Energy Procedia. 2014; 62: 603-611. DOI 10.1016/j.egypro.2014.12.059

[2] Mousavi SB, Ahmadi P, Pourahmadiyan A, Hanafizadeh P. Transient thermodynamic modeling



شکل (۱۴) تغییرات عدد ماخ در نازل برحسب درصد رطوبت‌های ۶۰٪، ۸۰٪، ۱۰۰٪ و حالت خشک

۶- نتیجه‌گیری

این پژوهش رفتار چگالش غیرتعادلی بخار آب در جریان گذر صوت را با استفاده از مدل‌سازی عددی بررسی کرد. شبیه‌سازی‌ها با در نظر گرفتن هسته‌زایی و رشد قطرات نشان دادند که رطوبت نسبی به‌طور قابل توجهی بر متغیرهای کلیدی جریان، از جمله فشار، دما، عدد ماخ و نرخ چگالش، به‌ویژه در ناحیه گلوگاه نازل، تأثیر می‌گذارد و دینامیک و ترمودینامیک جریان را تغییر می‌دهد. مقایسه مدل هوای خشک و مرطوب نشان داد که مدل هوای خشک انبساط جریان را بیش‌ازحد تخمین زده و عدد ماخ خروجی را ۱۶ درصد بیشتر، و فشار و دمای خروجی را به ترتیب ۴۳.۳ و ۵۲ درصد کمتر از مدل مرطوب پیش‌بینی می‌کند. این اختلافات نشان‌دهنده اهمیت لحاظ کردن چگالش بخار آب در تحلیل سامانه‌های گذر صوت برای جلوگیری از خطاهای طراحی است. افزایش رطوبت نسبی ورودی نازل تغییرات قابل توجهی در ساختار جریان ایجاد کرده و نرخ هسته‌زایی و رشد قطرات را افزایش می‌دهد. در رطوبت نسبی ۸۰ و ۱۰۰ درصد، نرخ هسته‌زایی به حداکثر می‌رسد، در حالی که موقعیت نقطه ویلسون تقریباً ثابت می‌ماند. همچنین، افزایش رطوبت نسبی تا ۶۰ درصد باعث جهش ناگهانی در تعداد قطرات چگالش یافته می‌شود و این اثر در رطوبت‌های بالاتر تشدید می‌گردد. این یافته‌ها بر ضرورت در نظر گرفتن چگالش بخار آب در طراحی و بهینه‌سازی نازل‌های گذر صوت و کمپرسورهای هوایی، به‌ویژه در محیط‌های مرطوب، تأکید دارند. پیشنهاد می‌شود در تحلیل‌های عددی، توزیع رطوبت ورودی و اثرات چگالش به‌دقت مدل‌سازی شوند تا دقت پیش‌بینی فشار، دما و عدد ماخ افزایش یابد. نتایج این مطالعه می‌تواند به‌عنوان پایه‌ای برای توسعه مدل‌های عددی دقیق‌تر و بهبود راهکارهای کنترل چگالش در سامانه‌های تراکمی و رانشی مورد استفاده قرار گیرد.

- [11] Wiśniewski P, Dykas S, Majkut M, Zhang G. Selection of a steam condensation model for atmospheric air transonic flow prediction. *Applied Thermal Engineering*. 2022; 203: 117922. DOI 10.1016/j.applthermaleng.2021.117922.
- [12] Dykas S, Wróblewski W. Numerical modelling of steam condensing flow in low and high-pressure nozzles. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2012; 55(21-22): 6191-6199. DOI 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.06.029.
- [13] Wang J, Gu H. A study of moist air condensation characteristics in a transonic flow system. *Energies*. 2021; 14(13): 4052. DOI 10.3390/en14134052.
- [14] Jabir E, Brezgin D, Aronson K, Kim HD. Numerical estimation of non-equilibrium condensation of steam in supersonic nozzles. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2018; 32(10): 4531-4540. DOI 10.1007/s12206-018-0901-6.
- [15] Cai L, He M, Huang KZ, Xiong W. Computational fluid dynamics simulation of the supersonic steam ejector using different condensation models. *Thermal Science*. 2019; 23(Suppl. 3): S933-S941. DOI 10.2298/TSCI180601179C.
- [16] ANSYS, Inc. ANSYS Fluent User's Guide, Release 2023 R1. ANSYS, Inc.; 2023.
- [17] Kalikmanov VI, Van Dongen MEH. Semiphenomenological theory of homogeneous vapor-liquid nucleation. *Journal of Chemical Physics*. 1995; 103(10): 4250-4255. DOI 10.1063/1.469589.
- [18] Young JB. The spontaneous condensation of steam in supersonic nozzles. *Physicochemical Hydrodynamics*. 1982; 3(1): 57-82. DOI Not available.
- [19] Charton H, Perret C, Phan HT. Analysis of supersonic flows inside a steam ejector with liquid-vapor phase change using CFD simulations. *MDPI Proceedings*. 2024; 4(1): 1. DOI 10.3390/proceedings4010001.
- [20] Moses CA, Stein GD. On the growth of steam droplets formed in a Laval nozzle using both static pressure and light scattering measurements. *Journal of Fluids Engineering*. 1978; 100(3): 311-322. DOI 10.1115/1.3448672.
- and economic analysis of an adiabatic compressed air energy storage (A-CAES) based on cascade packed bed thermal energy storage with encapsulated phase change materials. *Energy Conversion and Management*. 2021; 243: 114379. DOI 10.1016/j.enconman.2021.114379.
- [3] Haskell RW. Gas turbine compressor operating environment and material evaluation. In: *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*. American Society of Mechanical Engineers; 1989; 79177. DOI Not available.
- [4] Alhazmy MM, Jassim RK, Zaki GM. Performance enhancement of gas turbines by inlet air-cooling in hot and humid climates. *International Journal of Energy Research*. 2006; 30(10): 777-797. DOI 10.1002/er.1182.
- [5] Al-Fahed SF, Alasfour FN, Abdulrahim HK. The effect of elevated inlet air temperature and relative humidity on cogeneration system. *International Journal of Energy Research*. 2009; 33(15): 1384-1394. DOI 10.1002/er.1546.
- [6] Shukla AK, Sharma A, Sharma M, Mishra S. Performance improvement of simple gas turbine cycle with vapor compression inlet air cooling. *Materials Today: Proceedings*. 2018; 5(9): 19172-19180. DOI 10.1016/j.matpr.2018.06.275.
- [7] Sanaye S, Tahani M. Analysis of gas turbine operating parameters with inlet fogging and wet compression processes. *Applied Thermal Engineering*. 2010; 30(2-3): 234-244. DOI 10.1016/j.applthermaleng.2009.07.005.
- [8] Sun J, Chen W, Li Y, Zhang H. The effect of wet compression on a centrifugal compressor for a compressed air energy storage system. *Energies*. 2019; 12 (5): 906. DOI 10.3390/en12050906.
- [9] Prandtl L. *Attidel Convegno Volta*. Volume XIV. 1st Edition. Roma: Reale Accademia D'Italia; 1936.
- [10] Schnerr GH, Mundinger G. Similarity, drag and lift in transonic flow with given internal heat addition. *European Journal of Mechanics B/Fluids*. 1993; 12(5): 597-612. DOI Not available.

## Effect of Relative Humidity and Nonequilibrium Condensation on the Variation of Performance Parameters in Transonic Nozzles

Hassan Masoudirad<sup>1</sup>, Mehdi Maerefat<sup>2\*</sup>, Reza Maddahian<sup>3</sup>

<sup>1</sup> PhD student, Tarbiat Modares University (h.masoudirad@modares.ac.ir)

<sup>2</sup> Professor, Tarbiat Modares University (\*Correspondence: maerefat@modares.ac.ir)

<sup>3</sup> Associate Professor, Tarbiat Modares University (maddahian@modares.ac.ir)

### ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research Paper

Received: 13 April 2025

Received in Revised form: 01 July

2025

Accepted: 03 August 2025

Available Online: 23 August 2025

### Keywords:

Non-equilibrium Condensation

Supersonic Nozzle

Nucleation

CFD

Humidity

### GRAPHICAL

Non-equilibrium condensation of water vapor in supersonic flows significantly impacts the performance of nozzles and aerospace equipment. Under humid conditions, this phenomenon must be considered during flow design and analysis. This study investigates the effect of relative humidity on supersonic flow in a nozzle using numerical modeling and simulation of non-equilibrium water vapor condensation. The governing equations, incorporating nucleation and droplet growth processes, were solved using user-defined functions within a compressible numerical solver. Results indicate that the presence of water vapor leads to significant changes in Mach number, pressure, and temperature. For 100% relative humidity, the dry air model overestimates the Mach number by 16% compared to the wet model's prediction and underestimates outlet pressure and temperature by 43.3% and 52%, respectively. Increasing relative humidity intensifies the condensation shock, and the nucleation rate reaches its maximum at humidities above 80%. Furthermore, above 60% relative humidity, the number of condensed droplets increases sharply. Therefore, non-equilibrium water vapor condensation must be accounted for in the design of supersonic nozzles and compressors operating in humid conditions to prevent performance errors.

**Cite this article:** Masoudirad, Hasan, Maerefat, Mehdi, Maddahian, Reza. Effect of Relative Humidity and Nonequilibrium Condensation on the Variation of Performance Parameters in Transonic Nozzles. Journal of Fluid Mechanics and Aerodynamics 2025; 14 (1): 51-62. DOI: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23223278.1404.14.1.4.7>