

شبیه‌سازی عددی حرکت قطرات آب در یک جت مغشوش هوا برخورد کننده به صفحه تخت دما ثابت و اثر قطرات بر انتقال حرارت

علی سعیدی¹، سید هادی پورحسینی²، محمد مقیمان³

¹ دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک - دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد - Ali.saeedi@stu-mail.um.ac.ir

² دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک - دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد - hadipoorhoseini@gmail.com

³ استاد گروه مهندسی مکانیک - دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد - mmoghiman@yahoo.com

چکیده

افزایش شدت انتقال حرارت شناخته شده است. نتایج آزمایشگاهی بر روی سرمایش داخلی پره‌های توربین به همراه قطرات ریز آب نشان داده‌اند که تزریق 5% آب در هوا می‌تواند نرخ انتقال حرارت را 20 تا 30 درصد افزایش دهد [2]. مزیت این کاربرد در صرفه‌جویی تا 50% مصرف انرژی برای خنک‌کاری پره‌های توربین است. کارهای تحقیقاتی در جریان مه‌آلود حول استوانه، لبه و صفحه نشان می‌دهند که افزایش تنها چند درصد از قطرات فاز مایع باعث افزایش چندین برابری نرخ انتقال حرارت می‌شود [3]. این افزایش در هر دو رژیم آرام و درهم مشاهده شده است. از آنجا که در جریان‌های مه‌آلود فرآیند تبخیر و تغییر فاز قطرات روی می‌دهد و این فرآیند به بسیاری از پارامترهای حرارتی و هیدرودینامیکی جریان بستگی دارد، در تئوری این نوع جریان برای آسان‌تر شدن مسئله فرضیات زیادی صورت می‌گیرد [4].

در این مقاله یک جت محبوس مغشوش دو بعدی متقارن محوری با فاز حامل هوا و قطرات بسیار ریز آب به عنوان فاز پراکنده به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا مساله به صورت تک فاز با دیدگاه اویلری حل شده و تغییرات عدد نوسلت با نتایج قابل دسترس مقایسه شده و توافق مطلوبی را نشان می‌دهند. در ادامه فاز پراکنده نیز در جریان وارد شده و معادلات حاکم بر قطرات با دیدگاه لاگرانژی حل گردیده‌اند. اثر دبی جرمی و قطر قطرات بر عدد نوسلت و حرکت قطرات مورد توجه قرار گرفته است.

2. هندسه و فرضیات مساله

مدل فیزیکی مساله یک جت محبوس مغشوش دو بعدی متقارن محوری است که به علت تقارن و دو بعدی بودن آن تنها نیمی از مساله شبکه‌بندی و حل شده است (شکل 1). هوای ورودی دارای دمای 298K، فشار 1 اتمسفر و رطوبت نسبی 30% است. با توجه به قطر قطرات عدد بایوت ($Bi = ad_{droplet} / k$) خیلی کوچکتر از 0/1 بوده و دمای قطره تنها تابعی از زمان است. کسر حجمی فاز پراکنده (قطرات) کمتر از 10^{-4} می‌باشد و بنابراین می‌توان فاز پراکنده را بسیار رقیق فرض گرفت و از برخورد میان ذرات و چسبیدن آنها به یکدیگر و همچنین تاثیر قطرات بر توربولانسی جریان صرف‌نظر کرد [3]. عدد وبر نسبی قطرات ($We = r|\rho_w - \rho_g| d / \mu$) کمتر از مقدار بحرانی ($We_c \cong 7$) بوده و قطرات را می‌توان به صورت کروی فرض گرفت [5]. با توجه به اینکه جریان به صورت مغشوش می‌باشد، از نیروی بویانسی صرف‌نظر شده و تنها نیروی درگ بر قطرات مورد

در این مقاله یک جت محبوس مغشوش دو بعدی متقارن محوری با فاز حامل هوا و قطرات بسیار ریز آب به عنوان فاز پراکنده به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا مساله به صورت تک فاز با دیدگاه اویلری حل شده و تغییرات عدد نوسلت با نتایج قابل دسترس مقایسه شده و توافق مطلوبی را نشان می‌دهند. در ادامه فاز پراکنده قطرات آب نیز در جریان وارد شده و اثر آنها بر انتقال حرارت و همچنین نحوه برخورد آنها با سطح هدف و حرکت در جریان سیال مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهند که افزودن فاز قطرات آب به هوا باعث افزایش چند برابری ضریب انتقال حرارت می‌شود. از طرفی حرکت قطرات در جریان حاکی از تاثیر قطرات بزرگتر بر انتقال حرارت در پایین دست محل برخورد جت به دلیل حرکت نمودن در نزدیکی سطح دارد. قطرات کوچکتر در محل برخورد جت بر انتقال حرارت موثر بوده و سریع‌تر از قطرات بزرگتر با جریان حمل شده و از سطح دور می‌شوند.

واژه‌های کلیدی: جت برخوردی، جریان مغشوش، انتقال حرارت، حرکت قطرات

1. مقدمه

جت‌های برخوردی¹، به عنوان عاملی کارا و موثر جهت افزایش نرخ انتقال حرارت و انتقال جرم موضعی مورد استفاده قرار می‌گیرند. جت‌های برخورد کننده را می‌توان به دو نوع جت محبوس² و جت غیر محبوس³ طبقه‌بندی نمود [1]. در جت محبوس، سیال در مسیر توسعه شعاعی تحت تاثیر یک مرز علاوه بر مرز هدف قرار دارد. از جمله موارد کاربرد جت‌های برخوردی جهت افزایش نرخ انتقال حرارت می‌توان به خنک کاری ورق‌های فولادی، قطعات الکترونیکی، صنایع کاغذ و پره‌های توربین اشاره کرد.

ارتقا تکنولوژی، بالا بردن بازده و کاهش مصرف انرژی در صنایع استفاده کننده از جت‌های برخوردی به شدت وابسته به افزایش میزان انتقال حرارت جت‌های برخوردی است. جریان مخلوط هوا-قطره با قطرات بسیار ریز آب (قطر کمتر از 100 μm) که به عنوان جریان مه‌آلود⁴ شناخته می‌شود، یکی از مؤثرترین روش‌ها برای

Impinging Jets¹
Confined²
Unconfined³
Mist Flow⁴

تا زمانی که دمای قطره کمتر از دمای جوش آن باشد معادله انرژی قطره در حالت کلی با احتساب انتقال جرم، انتقال حرارت جابه‌جایی و صرف نظر از تشعشع به این صورت است:

$$C_{pL} r_L \frac{pd_L^3}{6} \frac{dT_L}{dt} = apd_L^2 (T_c - T_L) - J_s p d_L^2 (L + C_{pv} (T_c - T_L)) \quad (4)$$

در این رابطه J_s شار جرمی بخار از سطح قطره در حال تبخیر می‌باشد. این عبارت بر اساس معادله بقا برای جرم بخار روی سطح یک قطره در حال تبخیر حاصل می‌گردد. با توجه به تعریف عدد استانتون نفوذی به می‌توان رابطه شار جرمی بخار را بر حسب آن نوشت:

$$J_s = St_D \cdot r \cdot U \cdot b_{1D} \quad (5)$$

U سرعت بین دو فاز و b_{1D} به ضریب نفوذپذیری معروف می‌باشد. همانطور که بیان گردید قطرات به صورت کروی هستند بنابراین تغییر قطر قطره را تا زمانی که به دمای جوش نرسیده باشد اینگونه می‌توان بیان کرد:

$$d_n^3 = d_{n-1}^3 - J d_{n-1}^2 \frac{6\Delta t}{r_L} \quad (6)$$

4. مدل سازی برخورد قطره با سطح

برخورد یک قطره با سطح را می‌توان به سه حالت کلی تقسیم‌بندی کرد: چسبیدن قطره⁶، منعکس شدن از سطح (برخورد و بازگشت)⁷، متلاشی شدن قطره⁸. بر اساس عدد وبر عمودی قطره در هنگام برخورد با سطح وضعیت قطره را طبق دسته‌بندی فوق می‌توان مشخص کرد. عدد وبر مقیاسی از نسبت اندازه انرژی جنبشی قطره به انرژی کشش سطحی آن است و به صورت زیر تعریف می‌شود:

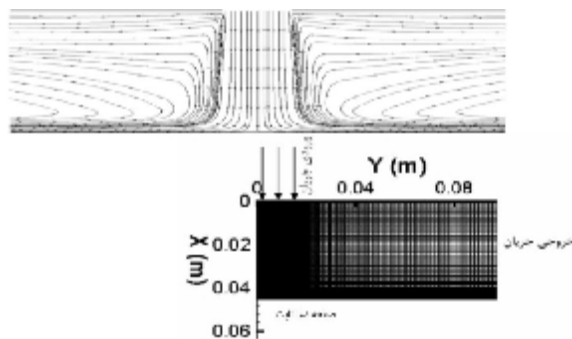
$$We = \frac{rv^2 d}{s} \quad (7)$$

عدد وبر بحرانی برای قطره که از هم پاشیدگی رخ دهد، وابسته به پارامترهای متفاوتی مانند ضریب هدایت حرارتی قطره، صافی سطح، دمای سطح و زاویه برخورد قطره است. بر همین اساس در شرایط متفاوت اعداد وبر بحرانی متفاوتی گزارش شده است. در این شبیه‌سازی بر اساس مرجع [9] عدد وبر بحرانی 50 فرض گرفته شده است. با بررسی دقیق مسیر قطرات مشخص شد که در حوزه سرعت‌های مورد استفاده در این تحقیق عدد وبر قطره در برخورد با سطح همیشه کمتر از این مقدار بحرانی است. رابطه بین سرعت عمودی قطره در برخورد و بازگشت از سطح بر اساس عدد وبر به صورت زیر می‌باشد [10]:

$$e_n = 1 - 0.163 We_n^{0.3913}, \quad e_n = \frac{v_{o,n}}{v_{i,n}} \quad (8)$$

5. حل عددی معادلات حاکم

توجه قرار گرفته است. دما و سرعت قطرات در ورودی جریان با شرایط هوا یکسان می‌باشد. یک مدل تنش جبری برای مدل‌سازی اغتشاشات جریان انتخاب شده است [6].



شکل 1: طرح هندسه مساله و میدان حل (D=10 mm, h/D=4/5)

3. معادلات حاکم

3-1 معادلات فاز پیوسته

معادلات پیوستگی، مومنوم، انرژی و پخش بخار حاکم بر مساله بر اساس مرجع [7] می‌باشند. این معادلات دارای ترم‌های چشمه و چاه هستند که اثر فاز پراکنده بر فاز پیوسته را وارد معادلات می‌نمایند.

3-2 معادلات فاز پراکنده

با نوشتن معادلات حرکت قطره، انرژی و تغییر قطر آن می‌توان ترم‌های چشمه و چاه را محاسبه و اثر دو فاز بر یکدیگر را اعمال کرد. مسیر قطره به وسیله انتگرال‌گیری از موازنه نیرو بر قطره شامل نیروهای پسا، گرانشی و سایر نیروهای خارجی پیش‌بینی می‌شود. موازنه نیرو را به صورت زیر می‌توان نوشت [8]:

$$\frac{d\mathbf{r}}{dt} = F_D (\mathbf{v}_a - \mathbf{v}_d) + \frac{g(\mathbf{r}_d - \mathbf{r}_a)}{r_d} + \mathbf{F} \quad (1)$$

عبارت \mathbf{F} شامل کلیه نیروهای خارجی به قطره به جز نیروی پسا و $g(\mathbf{r}_d - \mathbf{r}_a) / r_d$ نیروی بویانسی است که از این دو ترم صرف نظر شده است. ضریب نیروی پسا با رابطه زیر بیان می‌شود:

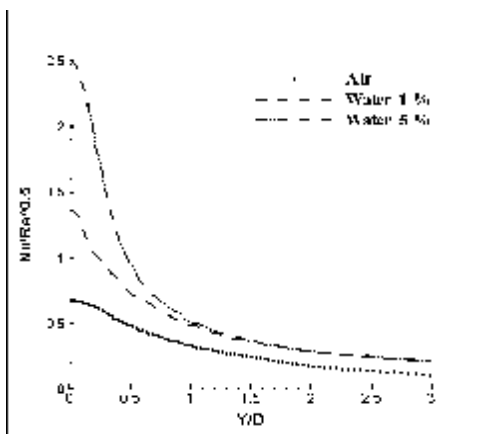
$$F_D = \frac{18m_g C_D Re}{r_d d^2 24} \quad (2)$$

عدد رینولدز در این رابطه بر اساس سرعت نسبی بین ذره و سیال تعریف می‌شود. ضریب پسا برای یک ذره کروی صاف بر اساس توصیف مورسی و الکساندر ($C_D = a_1 + a_2 / Re + a_3 / Re^2$) اعمال شده است [8]. فرآیند تبخیر قطرات در میدان جریان بر ضریب نیروی پسا و همچنین ضریب انتقال حرارت تاثیر می‌گذارد⁵. بر همین اساس برای یک قطر در حال تبخیر ضریب نیروی پسا به صورت زیر تصحیح می‌شود [7]:

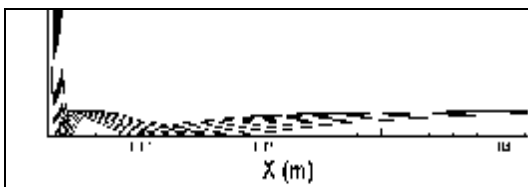
$$C_{DP} = \frac{C_D}{1 + C_p \frac{(T - T_L)}{L}} \quad (3)$$

Stick mode[†]
Rebound mode[‡]
Break up mode[^]

Blowing effects[^]

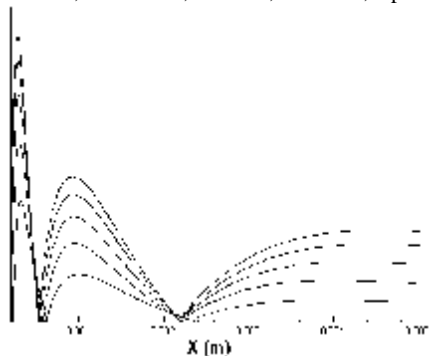


شکل 3 تاثیر درصد جرمی فاز پراکنده ($d_p=20 \mu\text{m}$) بر عدد نوسلت
 $T_w=308 \text{ k}$, $D=10 \text{ mm}$, $h/D=4.5$, $Re=4000$



شکل 4 نحوه برخورد قطرات با سطح

$T_w=308 \text{ k}$, $D=10 \text{ mm}$, $h/D=4.5$, $Re=4000$, $D_p=20 \mu\text{m}$



شکل 5 نحوه برخورد قطرات با سطح

$T_w=308 \text{ k}$, $D=10 \text{ mm}$, $h/D=4.5$, $Re=4000$, $D_p=20-50 \mu\text{m}$

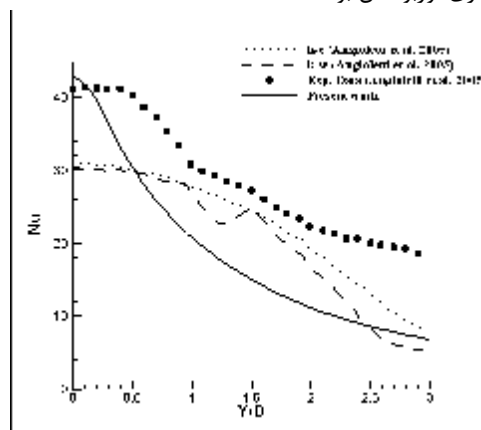
در شکل 5 برخورد یک گستره از اندازه‌های ذرات بین 20 تا $50 \mu\text{m}$ با سطح نشان داده شده است. قطر میانه برای این ذرات $26 \mu\text{m}$ و تعداد دسته‌بندی ذرات 5 تعریف شده است. با توجه به تابع توزیع روزین راملر کد از بین این ذرات 5 اندازه نماینده (20, 27/5, 35, 42/5 و $50 \mu\text{m}$) انتخاب می‌کند. تفاوت در اندازه قطر ذرات باعث تفاوت عدد ویر هر قطر نماینده شده و به تبع آن ضریب ارتجاع سرعت متفاوت می‌شود. این تفاوت را می‌توان در برخورد و بازگشت ذرات از سطح مشاهده کرد. قطره کوچکتر عدد ویر کمتر و ضریب ارتجاع بزرگتری دارد. بنابراین سرعت آن در بازگشت از قطره بزرگتر بیشتر است.

در شکل 6 تغییرات مولفه u سرعت قطره برای سه حالت مقایسه شده است. هر خط عمودی در نمودار نشان دهنده تغییر جهت در مولفه سرعت u (مولفه عمود بر سطح برخورد) است. برای قطره $20 \mu\text{m}$ سه تغییر جهت مشخص وجود دارد در حالی که برای قطره $50 \mu\text{m}$ چهار تغییر جهت نمایان است. از طرفی قطره کوچکتر در اولین برخورد سرعت برگشت بیشتری را نشان می‌دهد.

برای حل میدان جریان تغییرات لازم در شرایط مرزی دیوار، ورودی و خروجی و تقارن جریان بر کد عددی اعمال و معادلات حاکم بر فاز قطرات در کد وارد شده است. در این کد معادلات حاکم انفصال شده به روش حجم کنترل، با استفاده از الگوریتم سیمپل و طرح ADI حل می‌شوند. معیار همگرایی در حل مجموع باقیمانده‌ها کمتر از 10^{-4} انتخاب شده است. همانطور که بیان شد فاز پراکنده جریان (قطرات آب) به روش لاگرانژی مدل شده و معادلات حاکم بر قطره در گام‌های زمانی انتگرال‌گیری گردیده و در هر تکرار اثر قطرات بر معادلات جریان به صورت ترم‌های چشمه و چاه اعمال می‌شوند. برای حالت استفاده از قطرات با یک بازه از قطرهای متفاوت از تابع توزیع روزین راملر استفاده شده است [7].

6. نتایج

برای اطمینان از صحت کد و اعتماد به جواب‌های آن نتایج حاصل از برنامه با نتایج [11] مقایسه شده است. شکل 2 نشان می‌دهد که سیر کلی حل حاضر با جواب‌های آزمایشگاهی همسان است، هر چند که در مدل‌سازی جریان مغشوش همیشه حل با خطا همراه می‌باشد. این مشکل انگیزه اصلی برای توسعه و پیشرفت مدل‌سازی توربولانس بوده است.



شکل 2 مقایسه نتایج با حل عددی و تحلیلی
 $Re=4000$, $T_w=308 \text{ k}$, $D=10 \text{ mm}$, $h/D=4.5$

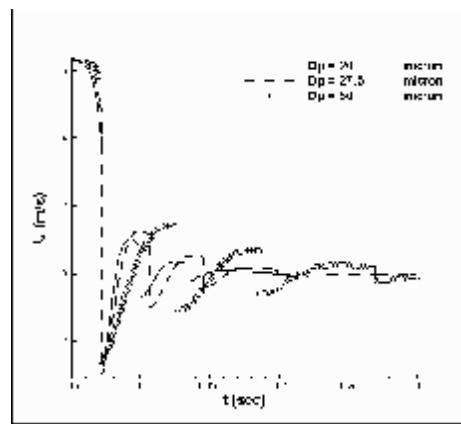
شکل 3 تاثیر فاز پراکنده متشکل از قطرات با قطر اولیه $20 \mu\text{m}$ با دو دبی جرمی به اندازه 1 و 5% دبی جرمی هوای ورودی بر عدد نوسلت نرمال شده با جذر رینولدز را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با اضافه کردن فاز قطرات با دبی جرمی 5% می‌توان عدد نوسلت را در محل سکون جت بیش از 3/5 برابر افزایش داد. در حالی که برای این افزایش در حالت تک فاز بایستی سرعت هوای ورودی را 8 برابر نمود.

در شکل 4 مسیر حرکت ذرات $20 \mu\text{m}$ در برخورد با سطح هدف نشان داده شده است. در کد از هر گره در ورودی جریان یک نقطه تزریق قطره تعریف شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، به دلیل اینکه عدد ویر ذرات برابرند، ضریب ارتجاع سرعت عمودی یکسان و همه قطرات با یک سرعت از سطح برمی‌گردند (تا ارتفاع یکسانی بالا می‌روند).

I	گرمای نهان تبخیر
\dot{m}_k	نرخ تغییر جرم قطره
Nu	عدد نوسلت
p	فشار
Re	عدد رینولدز
St	عدد استانتون
T_d, T_c	دمای قطره و فاز پیوسته (هوا)
u	سرعت گاز
v, v_d, v_n	سرعت قطره و هوا
V	حجم
$v_{o,n}, v_{i,n}$	مولفه عمودی سرعت قطره در برخورد و بازگشت
We	عدد وبر
علائم یونانی	
Γ_d, Γ_a	چگالی قطره و هوا
m_v, m_c	چگالی فاز پیوسته (هوا)
a	ضریب انتقال حرارت جابجایی
s	کشش سطحی
a_c	کسر حجمی فاز پیوسته

مراجع

- [1] E. Baydar and Y. Ozmen, 2006. "An experimental investigation on flow structures of confined and unconfined impinging air jets". *Heat Mass Transfer*, 42, pp. 338–346.
- [2] Nirmalan, V. N, Weaver, A. J, Hylton and D. L, 1998. *An experimental study of turbine vane heat transfer with water-air cooling*. American Society of Mechanical Engineers, New York, NY, ETATS-UNIS.
- [3] V. I. Terekhov and M. A. Pakhomov, 2003. "Numerical simulations of hydrodynamics and convective heat transfer in a turbulent tube mist flow". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46(9), pp. 1503-1517.
- [4] V. I. Terekhov and M. A. Pakhomov, 2002. "Numerical study of heat transfer in a laminar mist flow over a isothermal flat plate". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45(10), pp. 2077-2085.
- [5] K. Mastanaiah and E. N. Ganic, 1981. "Heat Transfer in Two-Component Dispersed Flow". *ASME J. Heat Transfer*, 103(2), pp. 300-306.
- [6] J. Zhang, S. Nieh and a. L. Zhou, 1992. "A new version of algebraic stress model for simulating strongly swirling flows". *Numerical Heat Transfer*, 22, pp. 49-62.
- [7] C. Crow, M. Summerfield and U. Tesuji, 1998. *Multiphase flows with droplets and particles*. CRC Press LLC,
- [8] 2004. *Fluent Version 6 user manual*.
- [9] D. Caviezel, C. Narayanan and D. Lakehal, 2008. "Adherence and bouncing of liquid droplets impacting on dry surfaces". *Microfluidics and Nanofluidics*, 5(4), pp. 469-478.
- [10] PhD, R. J. Issa, 2003. "Numerical modeling of the dynamics and heat transfer of impacting sprays for a wide range of pressures". PhD, University of Pittsburgh,
- [11] M. Angioletti, E. Nino and G. Ruocob, 2005. "CFD turbulent modelling of jet impingement and its validation by particle image velocimetry and mass transfer measurements". *International Journal of Thermal Sciences*, 44, pp. 349–356.



شکل 6 نحوه تغییرات مولفه u سرعت قطره

علت تفاوت در تعداد برخوردها را می‌توان با معادله 2 تفسیر کرد. بر اساس این رابطه برای نیروی پسا، هر چه قطر قطره کمتر باشد، نیروی پسا وارد به آن بیشتر و قطره بیشتر تحت تاثیر سیال قرار می‌گیرد. به همین دلیل قطره کوچکتر علی‌رغم داشتن عدد وبر کمتر و ضریب ارتجاع مولفه عمودی بیشتر، که در اولین برخورد بیشترین سرعت بازگشت را نشان می‌دهد، نیروی بیشتری به آن وارد شده و بسیار سریعتر تحت اثر جریان قرار گرفته و توسط سیال حمل می‌شود. در این شکل مشاهده می‌شود که قطره $27/5 \mu\text{m}$ برخورد چهارم بسیار خفیفی را نشان می‌دهد.

7. نتیجه‌گیری

بر اساس مطلب بیان شده می‌توان نتایج زیر را بیان نمود:

- با افزودن مقدار بسیار ناچیزی از قطرات آب (تنها به میزان چند درصد دبی جرمی هوا) می‌توان عدد نوسلت را بدون تغییر در شرایط هوای ورودی چند برابر افزایش داد.
- هر چه قطر قطرات ورودی به جریان بزرگتر باشد تاثیر خنک‌کنندگی آنها در پایین دست محل برخورد جت بیشتر است.
- هر چه قطر قطرات کوچکتر باشد در محل برخورد جت تاثیر خنک‌کنندگی بیشتری دارند.
- قطرات کوچک به سرعت توسط جریان حمل شده اما قطرات بزرگ در نزدیکی سطح حرکت می‌کنند.

فهرست علائم

Bi	عدد بایوت
C_n, C_{np}	ضریب درگ تصحیح شده و ضریب درگ کره صلب
C_{pl}, C_{pv}	گرمای ویژه قطره و بخار
d	قطر ذره
D, D_d	ضریب نفوذ بخار در هوا
F_n	نیروی پسا
g	ثابت گرانش
h_c	انتالپی فاز پیوسته (هوا)
$h_{s,k}$	گرمای نهان قطره
K_v	غلظت بخار در هوا
K_{vc}	غلظت بخار در سطح قطره
k_{eff}	ضریب هدایت موثر حرارت