



کوبی شرکت در کنفرانس



بدین وسیله کوبی می شود ستای:   
 دکترانوردی

تعالیک صفت در کس یک قطره مومنت در حال بخیر

بخاست شده توسط:

زهره طالب لون حمید نازمند

در ششمین کنفرانس مومنت و استحقاق ایران در تاریخ ۲۷ تا ۲۹ بهمن ماه ۱۳۹۴ در دانشگاه فردوسی مشهد برای ارائه مورد پذیرش قرار گرفته و توسط نویسنده مکان در محل کنفرانس ارائه شده است.

دکتر حمید نازمند  
دکتر زهره طالب لونی

دکتر محمد باقر آبیانی  
دکتر علی کنفرانس

مستقیم کنفرانس مومنت و استحقاق ایران  
۲۰۱۶

## تعامل یک جفت ورتکس با یک قطره سوخت در حال تبخیر)

حمید نیازمند<sup>۱\*</sup>، زهرا طالب پور<sup>۲</sup>

دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

(\*حمید نیازمند: Niazmand@um.ac.ir)

### چکیده

در بسیاری از فرآیندهای مهندسی و صنعتی، استفاده از اسپری‌ها کاربرد فراوانی دارد. در این راستا بررسی نرخ انتقال حرارت قطرات اسپری در محیطی با طیف وسیعی از گردهای آشفته، از اهمیت بسزایی برخوردار است. از طرفی این گردها را می‌توان به صورت مجموعه‌ای از ورتکس‌هایی در نظر گرفت که در زمان اسپری سوخت در محفظه احتراق شکل گرفته‌اند. در این مطالعه، به بررسی تغییرات ضریب انتقال حرارت یک قطره سوخت در طی تعامل با یک جفت ورتکس در جریان لزج و تراکم‌ناپذیر با استفاده از حل عددی معادلات ناویر-استوکس و انرژی در  $Re=100$  پرداخته شده است. به منظور اطمینان از صحت محاسبات، نتایج با داده‌های عددی گزارش شده در مقالات مقایسه شده و هماهنگی خوبی بین نتایج مشاهده گردید. اثر عواملی که مورد بررسی قرار می‌گیرند، عبارتند از: فاصله اولیه مرکز دو ورتکس از محور اصلی جریان، قدرت، اندازه و جهت چرخش آن‌ها. با در نظر گرفتن بیشترین نرخ انتقال حرارت از قطره، شرایط اولیه دو ورتکس انتخاب شده است. سپس توزیع فشار، خطوط هم دما و توزیع عدد ناسلت محلی بر روی سطح قطره گزارش شده است. در نهایت به تأثیر تبخیر سطحی قطره بر نرخ انتقال حرارت آن پرداخته شده است.

واژه‌های کلیدی: قطره سوخت- ورتکس- انتقال حرارت

### ۱- مقدمه

استفاده از اسپری‌ها در بسیاری از فرآیندهای مهندسی و کاربردهای صنعتی همچون موتورهای احتراق داخلی، برج‌های خنک‌کن و خشک‌کن‌های پاششی به منظور تولید پودرهای خوراکی رواج دارند. طراحی صحیح و بهینه این سیستم‌ها و تجهیزات، نیازمند درک صحیحی از دینامیک، نرخ گرم شدن، توزیع دما و ... این قطرات مایع تزریق شده می‌باشد. در این راستا مباحث مربوط به رفتار قطرات از مباحث مهم و کلیدی در این فرآیندها می‌باشد.

در بسیاری از سیستم‌های احتراقی با در نظر گرفتن قطرات در ناحیه اسپری که نیروهای آیرودینامیکی بر نیروهای بین قطره‌ای غالب می‌باشند [۱]، قطرات با اعداد رینولدز از مرتبه ۱۰-۱۰۰ [۲] با طیف وسیعی از گردهای آشفته در تعامل می‌باشند که این گردها را می‌توان به صورت مجموعه‌ای از ورتکس‌هایی در نظر گرفت که در زمان اسپری سوخت در محفظه احتراق شکل گرفته‌اند [۳].

در رابطه با تعامل یک قطره سوخت با ساختارهای گردهای، ابعاد آن‌ها را می‌توان کوچکتر و یا کمی بزرگتر از قطره در نظر گرفت. این ساختارهای کوچک توانایی تولید تغییرات بزرگی در لایه مرزی و دنباله نزدیک قطره را دارند. به طور مثال، در

۱- استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، گروه مهندسی مکانیک

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد، گروه مهندسی مکانیک

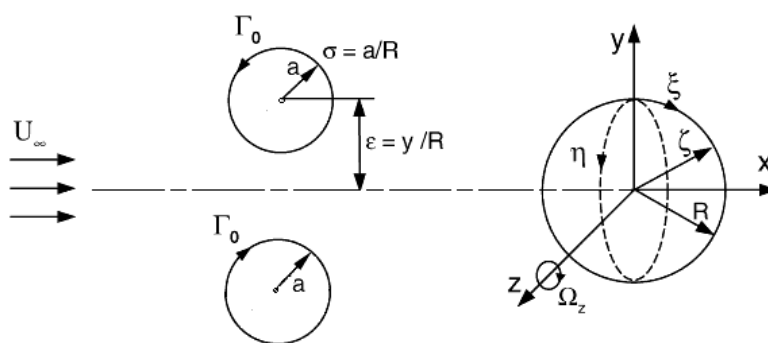


مطالعات گذشته اثر تعامل یک ورتکس با یک قطره چرخشی مورد بررسی قرار گرفته است که در بررسی انتقال حرارت از قطره، نشان داده شده است که چرخش آن و حضور ورتکس در جریان، توزیع انتقال حرارت را در اطراف قطره تغییر می‌دهد و در طی عبور ورتکس، مقدار متوسط سطحی عدد ناسلت افزایش و کاهش می‌یابد ولی مقدار متوسط زمانی آن در مقایسه با جریان متقارن محوری (جریان آرام بدون حضور ورتکس از روی قطره بدون چرخش) کمتر تحت تأثیر قرار گرفته است و مشاهده شده که همراه با تبخیر سطحی قطره، ضخامت لایه مرزی حرارتی افزایش می‌یابد که منجر به کاهش نرخ انتقال حرارت از قطره می‌شود [۴]. بیسوال و همکاران فرآیند تبخیر قطره سوختی که در یک محیط داغ تزیق شده است را با در نظر گرفتن تغییرات سرعت قطره (به دلیل وارد شدن شتاب منفی ناشی از نیروی درگ وارده به قطره) مورد بررسی قرار دادند [۵]. سازین در سال ۲۰۰۶ مقاله‌ای جامع ارائه کرده است که در آن به مروری جامع بر مدل‌های گرم شدن و تبخیر قطرات سوخت پرداخته است [۶]. مسائل دیگری نیز از قبیل ارائه یک مدل چند بخشی برای شبیه‌سازی احتراق اسپری [۷]، بررسی اثر انتقال حرارت تشعشی بر نرخ گرم شدن یک قطره سوخت در حضور چرخش داخلی آن [۸] و مدل‌سازی فرآیند تبخیر و گرم شدن قطرات سوخت بنزین [۹]، اخیراً مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

در این مطالعه، به بررسی اثرات متقابل یک جفت ورتکس و یک قطره سوخت در میدان جریان سه‌بعدی، ناپایدار، تراکم‌ناپذیر و لزج در  $Re=100$  با عدد پرانتل  $Pr=1$  پرداخته می‌شود. دو ورتکس با داشتن بیشترین تأثیر بر روی قطره سوخت در میدان جریان قرار گرفته‌اند. در این راستا، به بررسی تغییرات موقعیت اولیه دو ورتکس، قدرت، اندازه و جهت چرخش آن‌ها نسبت به قطره پرداخته شده و رفتار حالت گذاری ضریب انتقال حرارت قطره گزارش شده است. سپس به ازاء بیشترین نرخ انتقال حرارت از قطره، شرایط و هندسه اولیه دو ورتکس در بدست آوردن دیگر نتایج این مطالعه انتخاب شده است. در نهایت، اثر تبخیر سطحی قطره بر ضریب انتقال حرارت آن مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲- معادلات حاکم و شرایط مرزی

یک نمایش ساده از پیکربندی جریان در شکل ۱ ارائه شده است. جریانی لزج، تراکم‌ناپذیر و ناپایدار در جهت مثبت محور  $x$  از روی یک قطره سوخت تک دما به شعاع  $R$  عبور می‌کند. قطره نیز به طور ناگهانی در میدان جریان قرار گرفته است و مرکز آن در مبدأ دستگاه مختصات کارتزین می‌باشد و تنها حرکت چرخشی حول محور  $z$  (عمود بر جهت جریان) دارد. دو ورتکس مشابه که فاصله اولیه مرکز آن‌ها از محور  $x$ ،  $\varepsilon$ ، که با استفاده از شعاع قطره بی‌بعد شده است، همراه با جریان



شکل ۱ - هندسه جریان

آزاد به سمت قطره حرکت می‌کنند. ورتکس‌ها در فاصله محوری ۱۰ برابر شعاع قطره از مرکز آن در جریان بالادست قرار گرفته‌اند. در این فاصله اثر ورتکس‌ها بر روی قطره قابل چشم‌پوشی می‌باشد، به این دلیل که مقدار سرعت ناشی از دو ورتکس در نزدیکی قطره، کمتر از دو درصد سرعت جریان آزاد می‌باشد. ورتکس‌ها که ورتکس رنکین (Rankin) [۱۰] نیز نامیده می‌شوند، همان ویژگی‌هایی را دارند که توسط کیم (Kim) و همکارانش [۱۱] به کار رفته است.  $\sigma = a/R$  شعاع بی‌بعد هسته

ورتکس‌ها است که درون این هسته سرعت القا شده از مقدار صفر در مرکز هسته به ماکزیمم سرعت مماسی در شعاع  $r=a$  می‌رسد که با  $V_{max}$  نشان داده می‌شود. در بیرون از این هسته ( $r>a$ )، میدان سرعتی توسط ورتکس‌ها ایجاد می‌شود که در  $r \rightarrow \infty$  ناپدید می‌شود. هریک از این دو ورتکس که به صورت دو بعدی فرض شده‌اند، توسط تابع جریان زیر ارائه می‌شوند:

$$\psi(x, t, z, t = 0) = -\frac{\Gamma_0}{2\pi} \ln[(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 + a^2] \quad (1)$$

در معادله بالا  $\Gamma_0=2\pi a U_\infty V_{max}$  گردش اولیه ورتکس در شعاع  $a$  می‌باشد که برای دو ورتکس یکسان می‌باشد و در چرخش ساعتگرد مثبت فرض شده است.  $x_c$  و  $y_c$  نیز موقعیت اولیه مرکز دو ورتکس در صفحه  $(x-y)$  می‌باشد. با توجه به خطی بودن معادله تابع جریان ارائه شده و استفاده از اصل برهم‌نهی، برای یک جفت ورتکس تابع جریان به صورت زیر می‌باشد:

$$\psi(x, t, z, t = 0) = -\sum_{j=1}^2 \frac{\Gamma_0}{2\pi} \ln[(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2 + a^2] \quad (2)$$

میدان فشار اولیه تحمیل شده توسط دو ورتکس نیز از تعادل شتاب گریز از مرکز با گرادیان فشار در جهت شعاعی به صورت معادله زیر بدست می‌آید:

$$p_0(x, y, z, t = 0) = -\sum_{j=1}^2 \frac{\Gamma_0^2}{2\pi^2} \frac{1}{[(x-x_j)^2 + (y-y_j)^2 + a^2]} \quad (3)$$

معادلات حاکم شامل معادله پیوستگی، مومنوم و انرژی برای جریان آرام سیال نیوتنی با خواص ثابت، جهت تعیین مولفه‌های سرعت، دما و فشار به صورت زیر می‌باشند:

$$\int_A \vec{V} \cdot \vec{n} dA = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \int_V \vec{V} dV + \int_A \vec{V} \vec{V} \cdot \vec{n} dA = -\int_A p \vec{n} dA + \frac{2}{Re} \int_A \nabla \vec{V} \cdot \vec{n} dA \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \int_V T dV + \int_A T \vec{V} \cdot \vec{n} dA = \frac{2}{Re Pr} \int_A \vec{V} T \cdot \vec{n} dA \quad (6)$$

که  $A$ ،  $\vec{V}$  و  $\vec{n}$  به ترتیب مساحت المان، بردار سرعت و بردار یکه در جهت عمود بر سطح المان می‌باشند. این معادلات با استفاده از شعاع قطره  $R$  و سرعت جریان آزاد  $U_\infty$  به ترتیب به عنوان طول مشخصه و سرعت مشخصه بی‌بعد شده‌اند.  $\tau$  مقیاس زمانی است که برای آن رابطه  $\tau = t U_\infty / R$  را داریم و  $t$  زمان می‌باشد که در این مطالعه، گام زمانی بی‌بعد  $\Delta \tau = 0.015$  در نظر گرفته شده است. عدد رینولدز بر اساس قطر قطره  $(D)$  به صورت  $Re = U_\infty D / \nu$  تعریف می‌شود که در آن  $\nu = \mu / \rho$  و  $\mu$  و  $\rho$  به ترتیب ویسکوزیته دینامیکی و چگالی سیال) ویسکوزیته سینماتیکی می‌باشد. دمای بی‌بعد سیال نیز به صورت  $T = (T_f - T_\infty) / (T_s - T_\infty)$  تعریف می‌شود.

شبهه در مجاورت سطح قطره با ضریب انبساط در جهت  $r$  به دلیل تغییرات شدید در این ناحیه ریز شده است. مرز خارجی حوزه حل به دو قسمت جریان ورودی (از نقطه سکون جلویی تا  $\theta_{out}$ ) و جریان خروجی از  $\theta_{out}$  تا نقطه سکون پشت قطره تقسیم شده است. زاویه خروج  $(\theta_{out})$  در  $Re=100$  با توجه به تجربه دیگر محققان [5, 6, 10]  $120^\circ$  درجه در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی در قسمت ورودی مرز خارجی به صورت سرعت یکنواخت ورودی  $(u=1, v=w=0)$ ،  $\partial p / \partial \zeta = 0$  و  $T=0$  و در قسمت خروجی مرز خارجی  $(\theta \geq 120^\circ)$  به صورت فشار صفر و گرادیان صفر تمامی مولفه‌های سرعت و دما در راستای خطوط جریان در نظر گرفته شده است. همچنین روی سطح قطره در حالت عدم لغزش، شرط مرزی تساوی تنش‌های برشی و سرعت‌های مماسی و تساوی دمای قطره و دمای سیال برقرار می‌باشد. مولفه‌های بی‌بعد سرعت بر روی سطح قطره با سرعت چرخشی بی‌بعد  $\Omega_z = R \omega_z / U_\infty$  به وسیله معادلات (7) بیان می‌شوند:

$$u = \Omega_z \cos \varphi \sin \theta, v = \Omega_z \cos \varphi \cos \theta, w = 0 \quad (7)$$

که  $w_z$  سرعت چرخشی قطره حول محور  $z$  و  $\varphi$  و  $\theta$  مولفه‌های دستگاه مختصات کروی می‌باشند. مقادیر اولیه مولفه‌های سرعت و فشار با استفاده از انطباق میدان جریان القایی توسط دو ورتکس بر روی جریان آزاد یکنواخت بدست می‌آیند:

$$u_{t=0} = 1 + \frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad v_{t=0} = -\frac{\partial \psi}{\partial x}, \quad w_{t=0} = 0, \quad p_{t=0} = p_0 \quad (8)$$

که در آن  $p_0$  در معادله (۳) داده شده است. برای محاسبه نرخ انتقال حرارت لحظه‌ای از مقدار متوسط آن بر روی سطح قطره استفاده می‌شود که توسط عدد ناسلت گذرا ( $Nu$ ) به صورت زیر بیان می‌شود:

$$Nu(\tau) = \frac{hD}{k} = \frac{1}{A} \int_A \vec{V}T \cdot \vec{n} dA \quad (9)$$

که  $h$  و  $k$  به ترتیب ضرایب انتقال حرارت جابجایی و رسانایی می‌باشند. متوسط زمانی عدد ناسلت نیز در طی دوره  $(\tau_2 - \tau_1)$  در طول تعامل ورتکس‌ها با قطره به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\overline{Nu} = \frac{1}{(\tau_2 - \tau_1)} \int_{\tau_1}^{\tau_2} Nu(\tau) d\tau \quad (10)$$

### ۳- الگوریتم حل عددی

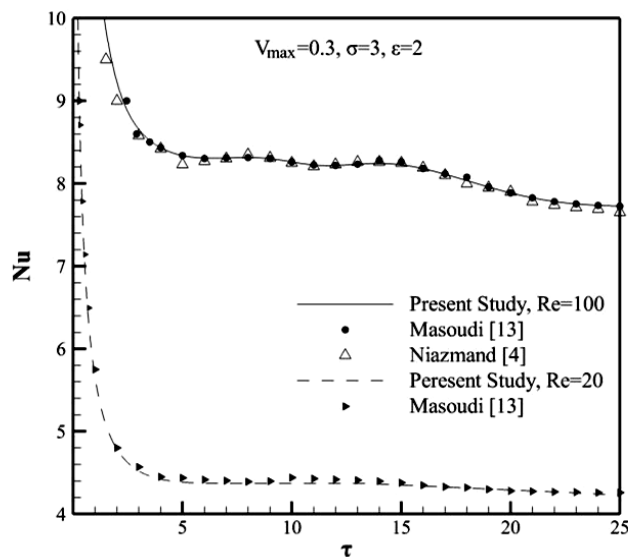
دستگاه مختصاتی که برای حل جریان حول یک قطره مناسب می‌باشد، دستگاه مختصات کروی  $(\theta, \varphi, r)$  است، اما با توجه به طبیعت جریان حول قطره در اعداد رینولدز متوسط که دارای تقارن محوری است، استفاده از دستگاه مختصات استوانه‌ای با تقارن محوری اجازه تحلیل هندسه‌های پیچیده‌تر را نیز می‌دهد. با توجه به نیاز به استفاده از شبکه غیر یکنواخت، در این مطالعه به جای استفاده از بسط مشتقات در شبکه غیر یکنواخت، معادلات حاکم در دستگاه مختصات عمومی  $(\xi, \eta, \zeta)$  با در نظر گرفتن فاصله‌های یکنواخت  $(\Delta \xi = \Delta \eta = \Delta \zeta = 1)$  بسط داده می‌شوند. برای اینگونه مسائل که شامل هندسه‌های پیچیده هستند، روش حجم کنترلی به لحاظ فیزیکی مناسب‌تر از بقیه روش‌هاست. گسسته‌سازی معادلات نیز با دقت مرتبه دوم در زمان و مکان انجام شده است.

به دلیل اینکه اغلب سرعت حرکت قطرات در هوا کم بوده و اعداد ماخ مربوطه کوچکتر از ۰.۳ است، جریان سیال تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته می‌شود. یکی از مشکلاتی که در حل معادلات ناویر-استوکس در این نوع از جریان‌ها وجود دارد، محاسبه میدان فشار است، زیرا یک معادله مستقل زمانی برای محاسبه فشار وجود ندارد. برای محاسبه توزیع زمانی فشار، معادله‌ای صریح که شامل عبارت فشار باشد، وجود ندارد. بنابراین از یک روش مشابه Projection استفاده شده است که اولین بار توسط چورین (Chorin) از دانشگاه برکلی در سال ۱۹۶۸ ارائه شد [۱۲]. این روش یک روش حل دو مرحله‌ای می‌باشد که در مرحله اول معادلات مومنتوم با استفاده از میدان فشار مرحله قبل (در اولین گام زمانی با استفاده از حدس اولیه) حل می‌شوند. در مرحله دوم تصحیح‌کننده‌های فشار و سرعت با یک معادله پوآسون محاسبه و حوزه سرعت و فشار تصحیح می‌شوند [۱۲].

### ۴- اعتبارسنجی حل عددی و استقلال نتایج از شبکه

تغییرات ضریب انتقال حرارت قطره در تعامل با یک تک ورتکس در موقعیت اولیه  $x_c = -10R$  و  $y_c = 2R$ ، با شعاع هسته  $\sigma = 3$  و سرعت چرخشی  $V_{max} = 0.3$ ، به صورت تابعی از زمان بی‌بعد  $(\tau)$  برای دو عدد رینولدز جریان ۲۰ و ۱۰۰ در شکل ۲ رسم شده و با نتایج دیگر محققان مقایسه شده است. این شکل نیز نشان‌دهنده تطابق بسیار خوب نتایج حل عددی حاضر با نتایج دیگر محققان می‌باشد. همان طور که مشاهده می‌شود، تغییراتی که در ضریب انتقال حرارت قطره در برخورد یک ورتکس با آن رخ می‌دهد، در  $Re = 100$  بیشتر از  $Re = 20$  می‌باشد و این اختلاف را می‌توان حدود ۴۵.۲۳ درصد به ازاء مقدار نهایی  $Nu$  در

$\tau=25$  در نظر گرفت. به این دلیل که اثرات لزجت در اعداد رینولدز پایین تر غالب می‌باشند و تغییرات اینرسی را که توسط ورتکس ایجاد شده، دمپ می‌کنند.



شکل ۲- رفتار حالت گذرای ضریب انتقال حرارت قطره در تعامل با یک تک ورتکس در مقایسه با نتایج دیگر محققان در رینولدز ۲۰ و ۱۰۰

به منظور بررسی استقلال نتایج از شبکه، نتایج بدست آمده برای عدد ناسلت و ضریب پسای قطره صلب در  $Re=100$  در تعامل با دو ورتکس مشابه در فاصله اولیه  $\epsilon=\pm 1.5$  با شعاع هسته  $\sigma=1$  و قدرت  $V_{max}=0.4$  در جدول ۱ به ازاء چند شبکه با تعداد گره متفاوت رسم شده است. همان طور که مشاهده می‌شود با افزایش تعداد گره‌ها از  $81 \times 50 \times 81$  به  $81 \times 62 \times 91$  میزان تغییرات عدد ناسلت، ضریب پسا و برای قطره به ترتیب در حدود  $0.1$ ،  $0.07$  و  $1.11$  درصد می‌باشد. با توجه به این مطلب، شبکه با تعداد گره  $81 \times 50 \times 81$  در محیطی که شعاع خارجی آن  $20$  شعاع قطره از مرکز آن در نظر گرفته شده است، انتخاب گردید که از لحاظ دقت، نتایج قابل قبولی بدست می‌دهد، هم‌چنین با در نظر گرفتن هزینه محاسباتی کم، کارآمدترین شبکه می‌باشد.

جدول ۱- بررسی اثر تعداد گره‌های شبکه بر مقادیر متوسط عدد ناسلت و ضریب پسای قطره در تعامل با دو ورتکس مشابه با  $V_{max}=0.4$ ،  $\sigma=1$  و

$Re=100$  در  $\epsilon=\pm 1.5$

$\xi*\eta*\zeta$	Nu	$C_D$	$C_L$
$31 \times 42 \times 31$	۷.۳۱۲	۰.۹۸۴	-۰.۱۰۵
$41 \times 42 \times 41$	۷.۵۶۵	۱.۰۱۳	-۰.۰۹۱
$61 \times 42 \times 61$	۷.۶۲۱	۱.۰۲۱	-۰.۰۸۹
$61 \times 50 \times 61$	۷.۶۳	۱.۰۲۲	-۰.۰۸۹
$81 \times 50 \times 81$	۷.۶۳۶	۱.۰۲۶	-۰.۰۹
$91 \times 50 \times 81$	۷.۶۳۶	۱.۰۲۶	-۰.۰۹
$91 \times 62 \times 81$	۷.۶۴۴	۱.۰۲۶۲	-۰.۰۹۱

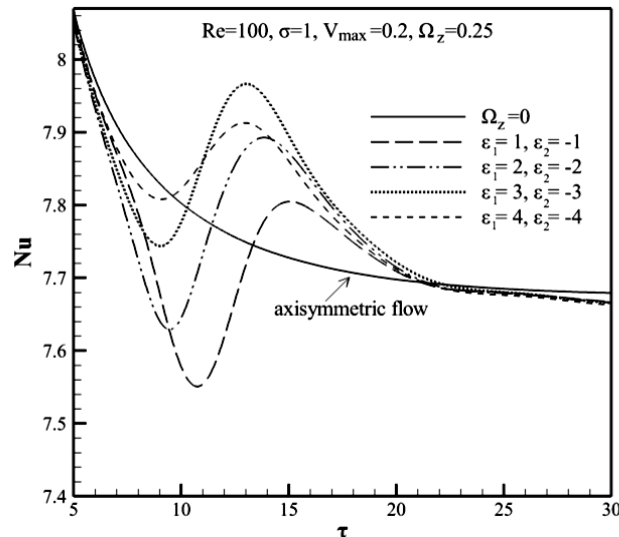
## ۵- نتایج

پس از اعتبار سنجی حل عددی صورت گرفته، به بررسی جریان حول قطره با چرخش در جهت ساعتگرد با  $\Omega_z=0.25$  در تعامل با یک جفت ورتکس در  $Re=100$  می‌پردازیم. ماکزیمم سرعت مماسی در لبه هسته هر دو ورتکس در محدوده

0.1 ≤ V<sub>max</sub> ≤ 0.4 مدنظر می‌باشد که ورتکس‌ها با شعاع هسته σ=1 ابتدأ در موقعیت x<sub>0</sub>=-10R و y<sub>0</sub>=εR با محدوده -4 ≤ ε ≤ 4 در جریان بالادست قطره قرار گرفته‌اند. دمای اولیه دو ورتکس نیز برابر با دمای میدان جریان می‌باشد و اختلالات دمایی تولید نمی‌کنند. در ابتدا با بررسی تغییرات فاصله اولیه مرکز دو ورتکس از محور x، تغییرات قدرت، اندازه و جهت چرخش آن‌ها، دو ورتکس با بیشترین نرخ انتقال حرارت از قطره انتخاب شده‌اند. سپس توزیع فشار و عدد ناسلت محلی و خطوط هم دما در اطراف قطره در طی تعامل با دو ورتکس آورده شده‌اند. در نهایت اثر تبخیر سطحی بر روی نرخ انتقال حرارت قطره مورد بررسی قرار گرفته است.

### ۱-۵- اثر تغییرات فاصله اولیه مرکز دو ورتکس از محور x بر ضریب انتقال حرارت قطره

در این بخش اثر فاصله اولیه مرکز ورتکس‌ها از محور x با استفاده از تغییرات ε در محدوده -4 ≤ ε ≤ 4 مورد بررسی قرار می‌گیرد. در شکل ۳، تغییرات ضریب انتقال حرارت قطره در طی عبور دو ورتکس از روی آن به ازاء مقادیر مختلف ε در Re=100 نشان داده شده است. ورتکس‌ها با مقادیر یکسان σ=1 و V<sub>max</sub>=0.2 با چرخش در جهت پادساعتگرد (Γ<sub>0</sub><0) به سمت قطره با Ω<sub>z</sub>=0.25 حرکت می‌کنند. نتایج مربوط به تغییرات عدد ناسلت در عبور جریان از روی یک قطره غیر چرخشی در غیاب ورتکس (جریان متقارن محوری) برای مقایسه آورده شده است.



شکل ۳- رفتار حالت گذرای ضریب انتقال حرارت قطره برای مقادیر مختلف فاصله اولیه مرکز دو ورتکس از محور x

با توجه به شکل، در زمان برخورد ورتکس‌ها با قطره، ضریب انتقال حرارت قطره کاهش می‌یابد و بیشترین کاهش در مقدار Nu به ازاء کمترین مقادیر ε ایجاد می‌شود. با نزدیک شدن ورتکس‌ها به ناحیه پشتی قطره که محدوده‌ای کم فشار می‌باشد، اثرات جابجایی در این ناحیه افزایش می‌یابد که منجر به افزایش نرخ انتقال حرارت از قطره می‌شود. همان طور که مشاهده می‌شود، بیشترین این مقدار در حالتی ایجاد می‌شود که موقعیت اولیه دو ورتکس در حدود ۳ برابر شعاع قطره از محور x باشد. بنابراین، با قرارگیری دو ورتکس در موقعیت اولیه |ε|=3 مقدار متوسط عدد ناسلت برای آن برابر با ۷.۷۸۲ می‌باشد که در مقایسه با نتایج مربوط به جریان متقارن محور (Nu=7.749)، ۰.۴۴ درصد افزایش یافته است.

### ۲-۵- اثر قدرت و اندازه دو ورتکس

در این بخش اثر قدرت اولیه دو ورتکس با استفاده از تغییرات V<sub>max</sub> در محدوده 0.1 ≤ V<sub>max</sub> ≤ 0.4 بر ضریب انتقال حرارت قطره بررسی شده است. شدت آشفته‌گی که در احتراق اسپری به طور معمول در حدود ۱۰-۴۰٪ است که دلیل بر انتخاب این

حوزه برای  $V_{max}$  می‌باشد [۱۴]. هندسه اولیه جریان و دیگر پارامترها همانند بخش قبل با در نظر گرفتن  $|\varepsilon|=3$  می‌باشد. قدرت هر ورتکس  $\Gamma$ ، نسبت مستقیم با ماکزیمم سرعت مماسی ( $V_{max}$ ) دارد. واضح است که ورتکس‌هایی با  $V_{max}$  بزرگتر نوسانات شدیدتری در میدان جریان ایجاد می‌کنند و تأثیر بیشتری بر نرخ انتقال حرارت قطره خواهند داشت. در جدول ۲، مقادیر متوسط عدد ناسلت در طی دوره  $\tau_1=5$  تا  $\tau_2=30$  به ازاء مقادیر مختلف  $V_{max}$  آورده شده است. بیشترین مقدار متوسط نرخ انتقال حرارت در این دوره در حالتی ایجاد می‌شود که قدرت اولیه دو ورتکس برابر با ۰.۳ در میدان جریان باشد.  $Nu_{min}$  و  $Nu_{max}$  به ترتیب کمترین و بیشترین مقدار عدد ناسلت نشان می‌دهد که با توجه به نتایج بدست آمده، با افزایش قدرت دو ورتکس،  $Nu_{min}$  با شدت بیشتری نسبت به  $Nu_{max}$  تغییر می‌کند. بدین ترتیب دو ورتکس با  $V_{max}=0.3$  با داشتن بیشترین نرخ انتقال حرارت از قطره، بیشترین تأثیر را بر روی آن دارند.

جدول ۲- تغییرات عدد ناسلت به ازاء مقادیر مختلف  $V_{max}$

$V_{max}$	$Nu_{min}$	$Nu_{max}$	$\bar{Nu}$
۰.۱	۷.۷۹۹	۷.۸۱۷	۷.۷۴۸
۰.۲	۷.۷۴۴	۷.۹۶۶	۷.۷۸۲
۰.۳	۷.۶۳۴	۸.۰۸۹	۷.۸۰۸
۰.۴	۷.۴۷۸	۸.۱۵۸	۷.۷۹۶

اثرات اندازه هسته دو ورتکس بر نرخ انتقال حرارت قطره با در نظر گرفتن  $|\varepsilon|=3$  و  $V_{max}=0.3$  و  $0.5 \leq \sigma \leq 4$  بررسی شده است. بیشترین و کمترین و مقدار متوسط عدد ناسلت در طی دوره  $\tau_1=5$  تا  $\tau_2=30$  برای دو ورتکس با اندازه‌های مختلف در جدول ۳ آورده شده‌اند. با توجه به نتایج بدست آمده، بیشترین نرخ انتقال حرارت از قطره برای دو ورتکس با هسته‌ای به شعاع برابر با شعاع قطره ( $\sigma=1$ ) می‌باشد که نشان می‌دهد همیشه ورتکس‌های بزرگتر بیشترین تأثیر را بر روی نرخ انتقال حرارت نخواهند داشت.

جدول ۳- تغییرات عدد ناسلت به ازاء مقادیر مختلف  $\sigma$

$\sigma$	$Nu_{min}$	$Nu_{max}$	$\bar{Nu}$
۰.۵	۷.۷۶۸	۷.۹۳۲	۷.۷۷
۱	۷.۶۳۴	۸.۰۸۹	۷.۸۰۸
۲	۷.۳۱۶	۸.۰۷۴	۷.۷۲۱
۳	۷.۰۸۳	۸.۰۵۹	۷.۶۵۲
۴	۶.۹۹۷	۸.۰۸۶	۷.۶۴۸

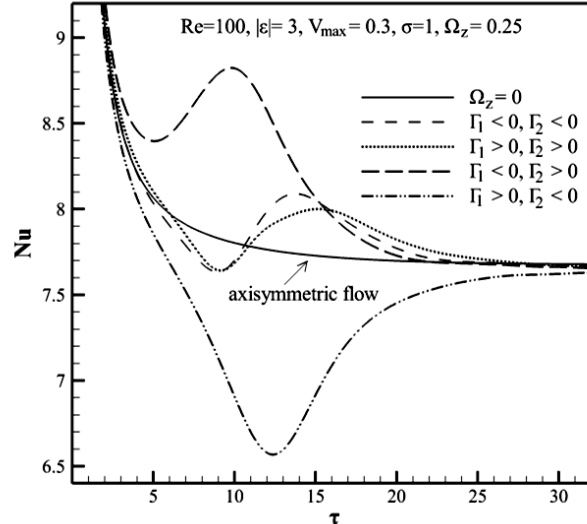
با توجه آنچه تا اینجا مشاهده شد، دو ورتکس در حالتی می‌توانند بیشترین تأثیر، به عبارت دیگر بیشترین نرخ انتقال حرارت از قطره را داشته باشند که با قدرتی برابر با  $V_{max}=0.3$  و هسته‌ای با شعاع اولیه برابر با شعاع قطره در موقعیت اولیه  $y_1=3R$  و  $y_2=-3R$  با فاصله محوری  $x_0=-10R$  در میدان جریان قرار گیرند. عامل دیگری که باید مورد بررسی قرار گیرد، جهت چرخش دو ورتکس می‌باشد که در ادامه به بررسی اثر آن بر ضریب انتقال حرارت قطره پرداخته شده است.

### ۳-۵- اثر جهت چرخش دو ورتکس

در این بخش اثر جهت چرخش دو ورتکس بر تغییرات حالت گذرای عدد ناسلت بررسی شده است. در شکل ۴، اثر جهت



چرخش دو ورتکس بر ضریب انتقال حرارت قطره نشان داده شده است. شرایط اولیه برای دو ورتکس به صورت  $|\epsilon|=3$ ،  $V_{\max}=0.3$  و  $\sigma=1$  می باشد. قطره نیز حرکتی چرخشی در جهت ساعتگرد با  $\Omega_z=0.25$  دارد. همچنین  $\Gamma_1$  و  $\Gamma_2$  به ترتیب گردش ورتکس بالایی و پایینی می باشند.

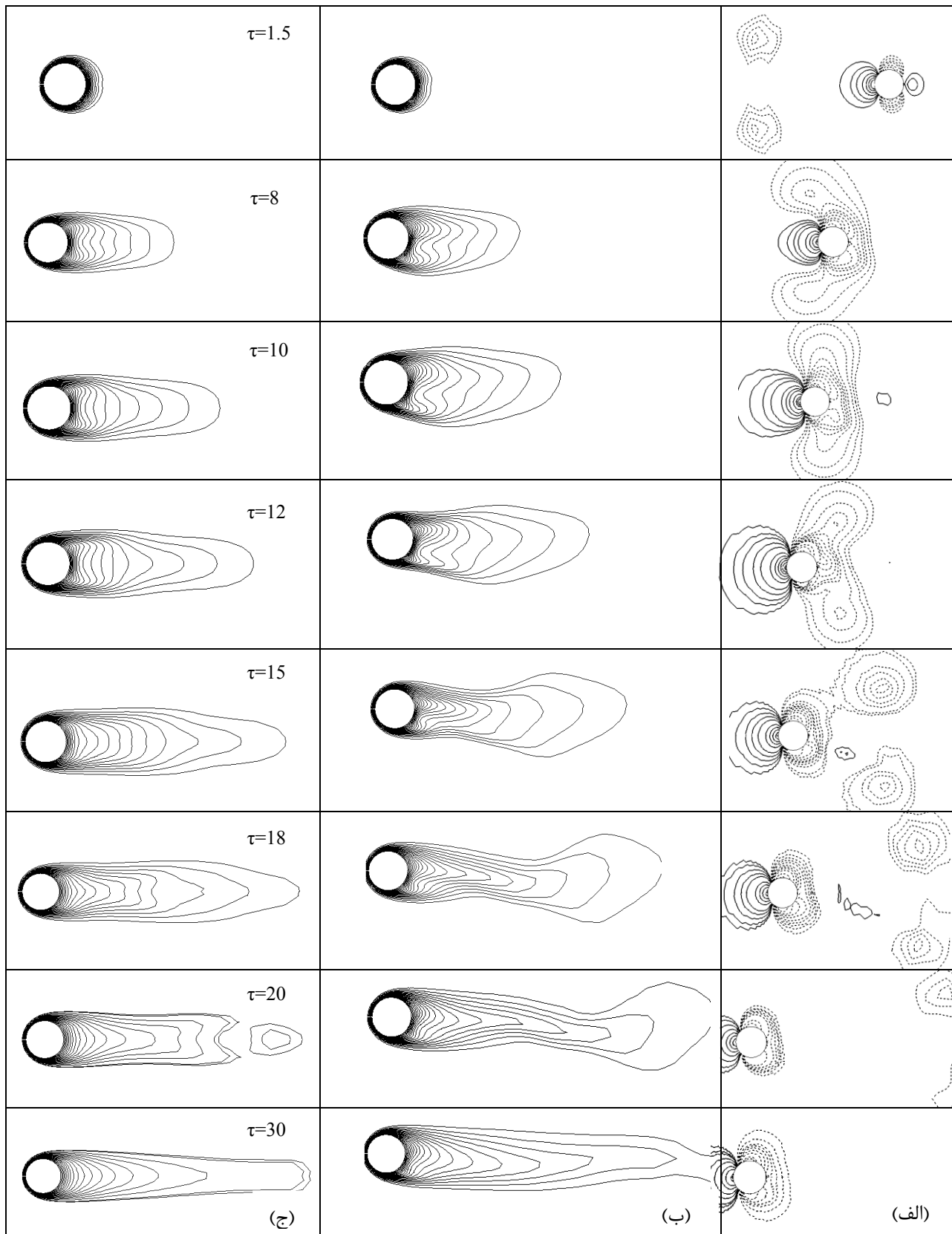


شکل ۴- رفتار حالت گذرای ضریب انتقال حرارت قطره در تعامل با دو ورتکس با جهت های چرخش متفاوت

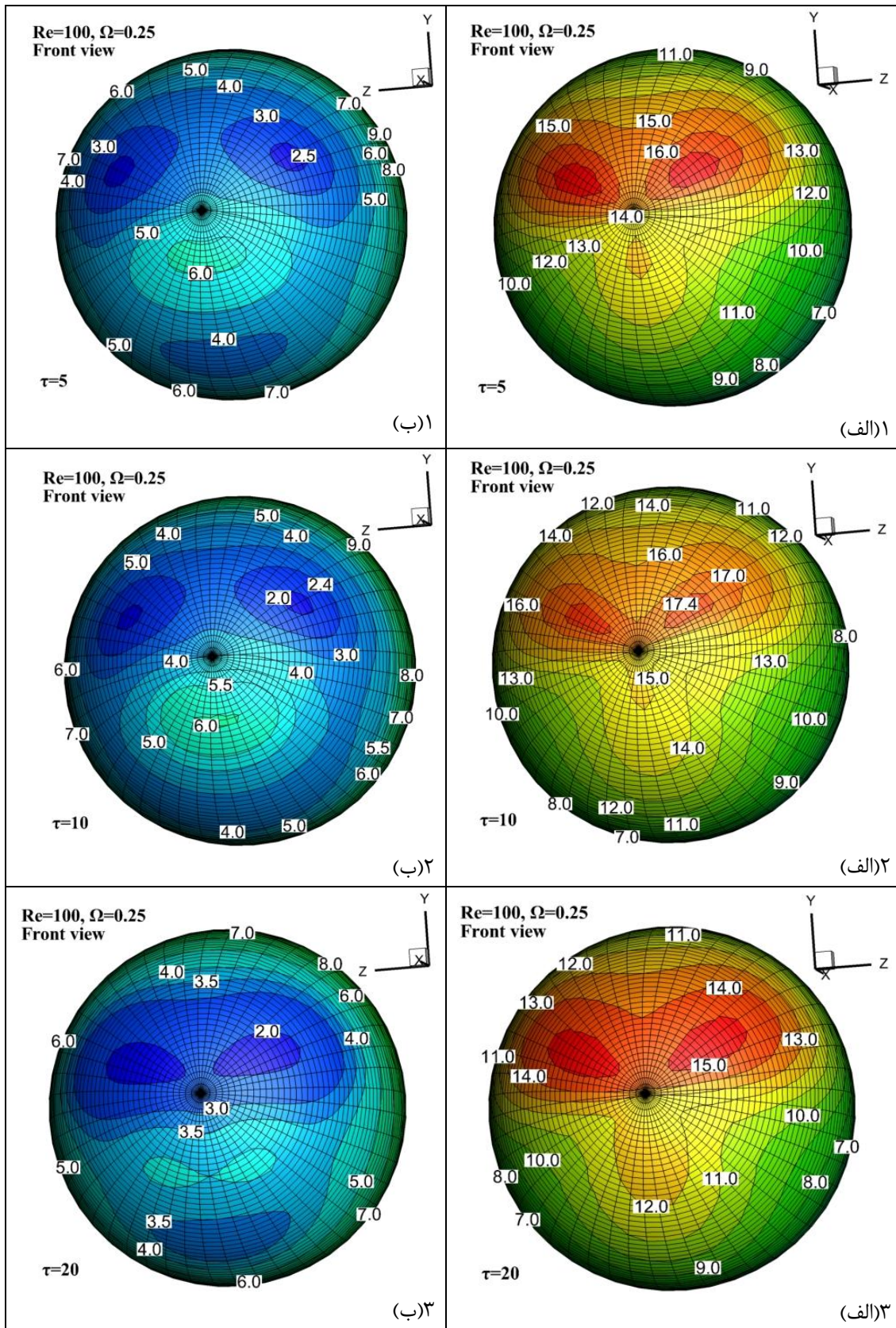
همان طور که مشاهده می شود، به ترتیب با چرخش پادساعتگرد و ساعتگرد ورتکس بالایی و پایینی بیشترین انتقال حرارت از قطره ایجاد می شود. با توجه به موقعیت اولیه این دو ورتکس و جهت چرخش آنها، سرعت جریان سیال در اطراف نقطه سکون در زمان نزدیک شدن ورتکس ها به قطره، افزایش می یابد که باعث افزایش اثرات جابجایی در نیمکره سمت چپ قطره می شود. در واقع می توان گفت، در این حالت دو ورتکس بیشترین تأثیر را بر روی قطره دارند.

#### ۴-۵- خطوط جریان، توزیع فشار و توزیع سطحی عدد ناسلت

یک نمای کلی از الگوهای دمایی حالت گذرا و توزیع فشار در اطراف قطره در طی عبور یک جفت ورتکس در شکل ۴ با در نظر گرفتن  $Re=100$ ،  $\Omega_z=0.25$ ،  $|\epsilon|=3$ ،  $V_{\max}=0.3$ ،  $\sigma=1$  همراه با چرخش پادساعتگرد و ساعتگرد به ترتیب برای ورتکس بالایی و پایینی نشان داده شده اند. با توجه به شکل ۴(الف)، دو ناحیه کم فشار که مرتبط با هسته دو ورتکس می باشند، در میدان جریان نمایش داده شده اند. در شکل ۴(ج)، خطوط دما ثابت نسبت به محور  $x$  متقارن می باشد، زیرا قطره تنها چرکتی چرخشی حول محور  $z$  دارد. بر خلاف آن، در شکل ۴(ب) چرخش قطره باعث عدم تقارن خطوط دما ثابت در میدان جریان شده است. دو ورتکس در ابتدا در دمای برابر با دمای میدان جریان می باشد و اختلالات دمایی تولید نمی کند و تنها در زمانی که با لایه مرزی حرارتی قطره و دنباله آن در تعامل باشد، قابل مشاهده می باشند. با توجه به شکل خطوط دما ثابت، با نزدیک شدن دو ورتکس لایه مرزی حرارتی و دنباله قطره گسترش یافته اند. اگر  $\delta_T$  ضخامت لایه مرزی حرارتی بر روی سطح قطره در در نظر بگیریم، رابطه ای به صورت  $Nu \sim D/\delta_T$  [۱۵] خواهیم داشت که  $D$  قطر قطره می باشد. با توجه به این رابطه، ضخامت لایه مرزی حرارتی در اطراف نقطه سکون در نیمکره سمت چپ قطره کمتر از قسمت های دیگر قطره است که منجر به ماکزیمم نرخ انتقال حرارت از این قسمت می شود. با دور شدن ورتکس ها از قطره ( $\tau \geq 18$ )، خطوط دما ثابت در صفحه  $(x-y)$  به سمت پایین قطره کشیده می شوند، همچنین یک ناحیه دمایی جدا شده در صفحه  $(x-z)$  ظاهر می شود که با حرکت دو ورتکس به نواحی دورتر جریان پایین دست، ناپدید می شوند.



شکل ۵ جریان بر روی یک قطره با چرخش ساعتگرد در  $Re=100$  و  $\Omega z=0.25$  در تعامل با یک جفت ورتکس با چرخش پادساعتگرد در  $v_{max}=0.3$ ،  $\sigma=1$  و  $\epsilon=3$ : (الف) توزیع فشار در صفحه  $(x-y)$  با  $-6280 \leq p \leq 9028$  (خط فاصله‌ها برای مقادیر منفی استفاده شده است)؛ (ب) خطوط دما ثابت در صفحه  $(x-y)$ ، (ج) خطوط دما ثابت در صفحه  $(x-z)$ ، هر دو با  $0.05 \leq T \leq 0.95$



شکل ۶- توزیع عدد ناسلت محلی بر روی سطح قطره در  $Re=100$  و  $\Omega z=0.25$  و در تعامل با دو ورتکس با  $V_{max}=0.3$  و  $\sigma=1$  و  $\varepsilon=3$  در سه زمان (الف)،

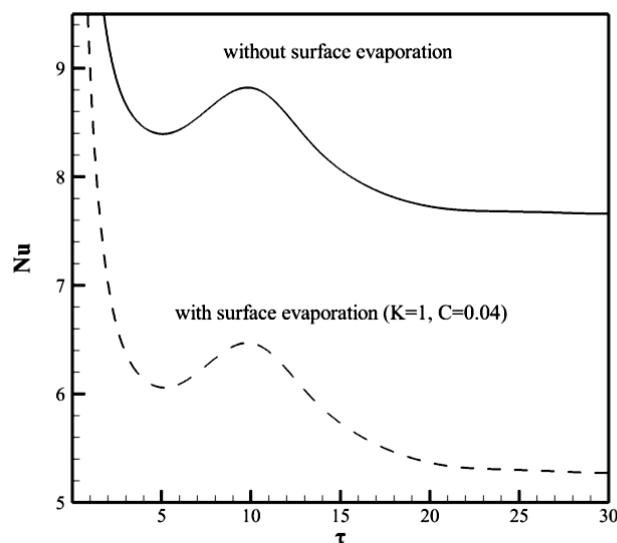
(ب)  $\tau=5$ ، (الف) ۲، (ب)  $\tau=10$  و (الف) ۳، (ب)  $\tau=20$

شکل ۶، توزیع سطحی عدد ناسلت بر روی قطره را نشان می‌دهد که در تعامل با یک جفت ورتکس با همان شرایط اولیه به کار رفته در شکل ۵ می‌باشد.  $\tau=5$  لحظه‌ای است که با توجه به شکل ۴ با نزدیک شدن دو ورتکس به قطره، ضریب انتقال حرارت آن شروع به افزایش می‌کند و مراکز هسته دو ورتکس در موقعیت  $5R$ - در جریان بالادست قرار دارند. در  $\tau=10$  نیز، بیشترین نرخ انتقال حرارت را از قطره خواهیم داشت و  $\tau=20$  لحظه‌ای است که دو ورتکس از قطره دور شده‌اند. با توجه به شکل، بیشترین نرخ انتقال حرارت قطره از ناحیه بالایی نیمکره جلویی آن می‌باشد که در دو ناحیه به صورت متقارن نسبت به صفحه  $(x-y)$  بر روی این قسمت قرار گرفته‌اند. به علاوه، ناحیه‌هایی با کمترین  $Nu$  به صورت متقارن در نیمکره عقبی و در ناحیه بالایی آن قرار گرفته‌اند. در  $\tau=10$ ، مقدار عدد ناسلت در ناحیه با بیشترین نرخ انتقال حرارت در مقایسه با شکل ۱ (الف) افزایش یافته است. از طرفی با توجه به شکل ۲ (ب)، مقدار ناسلت محلی نسبت به حالت قبلی در دو ناحیه با موقعیت تقریباً ثابت به صورت  $Nu=2.5$  به  $Nu=2$  تغییر کرده است. در نهایت، در  $\tau=10$  که دو ورتکس از قطره دور شده‌اند، مقادیر محلی عدد ناسلت در نیمکره جلویی قطره کاهش می‌یابد ولی تغییرات زیادی در ناحیه بالایی نیمکره عقبی آن ایجاد نمی‌شود. لازم به ذکر است که دو شکل ۳ (الف) و ۳ (ب) مربوط به توزیع سطحی عدد ناسلت بر روی قطره با چرخش ساعتگرد و بدون تعامل با ورتکس می‌باشد.

#### ۵-۵- اثر تبخیر سطحی قطره در تعامل با دو ورتکس

هندسه اولیه جریان، شرایط اولیه ورتکس‌ها و قطره و نیز جهت چرخش دو ورتکس همانند بخش قبلی ا در نظر گرفتن می‌باشند. تبخیر سطحی با رابطه  $V_{surf}/U_{\infty}=C(1+K\cos\theta)$  معرفی شده است که  $\theta$  از نقطه سکون جلویی قطره اندازه‌گیری می‌شود. ضریب  $C$  در بازه  $0.01 \leq C \leq 0.04$  نشان‌دهنده قدرت تبخیر سطحی از قطره می‌باشد که در بسیاری از فرآیندهای تبخیر قطره،  $C$  در این بازه قرار می‌گیرد. ضریب  $K$  در حالتی که تبخیر سطحی به صورت یکنواخت و غیر یکنواخت در نظر گرفته شود، به ترتیب برابر صفر و یک می‌باشد. در این مطالعه،  $C=0.04$  و  $K$  برابر با یک انتخاب شده که منجر به تبخیر سطحی بیشتر از نیمکره جلویی قطره می‌شود.

در شکل ۷، اثر تبخیر سطحی بر تغییرات مقدار متوسط زمانی  $Nu$  در طی تعامل یک جفت ورتکس مشابه با قطره نشان داده شده است. همان طور که انتظار می‌رفت، تبخیر سطحی که منجر به ضخیم شدن لایه مرزی حرارتی می‌شود، نرخ انتقال حرارت از قطره را کاهش می‌دهد.



شکل ۷- رفتار حالت گذرای ضریب انتقال حرارت قطره با و بدون تبخیر سطحی



## ۶- نتیجه گیری

در مقاله حاضر، جریان تراکم‌ناپذیر و لزج در  $Re=100$  حول یک قطره سوخت در تعامل با یک جفت ورتکس که توسط جریان آزاد یکنواخت جابجا می‌شوند، با شبیه‌سازی عددی بررسی شد. دو ورتکس با فاصله اولیه  $\varepsilon=\pm 3$  از محور اصلی جریان و ماکزیمم سرعت مماسی  $V_{max}=0.3$  در لبه هسته‌ای با شعاع برابر با شعاع قطره و با در نظر گرفتن بیشترین نرخ انتقال حرارت از قطره، بیشترین تأثیر را بر روی قطره می‌گذارند. هم‌چنین با توجه به نتایج مربوط به تغییر جهت چرخش دو ورتکس بر عدد ناسلت، به ترتیب، چرخش پادساعتگرد و ساعتگرد ورتکس بالایی و پایینی باعث افزایش اثرات جابجایی از نیمکره سمت چپ قطره می‌شود که در نتیجه آن، مقدار متوسط زمانی ضریب انتقال حرارت قطره در مقایسه با دیگر حالت‌ها بیشترین مقدار را دارد.

در بررسی اثر تبخیر سطحی قطره، مشاهده شده است که وجود تبخیر سطحی بر روی قطره منجر به افزایش ضخامت لایه مرزی حرارتی می‌شود که نرخ انتقال حرارت از قطره را به شدت کاهش می‌دهد.

## مراجع

- ۱- رجیبی متین، ز، "مدلسازی عددی تبخیر قطره‌ی سوخت در محیط گازی با شرایط فوق بحرانی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی هوافضا (پیش‌رانش)، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۸۸.
- 2- Faeth, G.M., "Mixing, transport and combustion in sprays", Progress Energy Combust. Sci. 13, 293-345, 1987.
- 3- Chorin, A.J., *Vorticity and Turbulence*, Springer-Verlag, Berlin, 1994.
- 4- Niazmand, H., and Renksizbulut, M., "Heat transfer from a rotating sphere interacting with a vortex", International Journal of Heat and Mass Transfer 47, 2269-2281, 2004.
- 5- Biswal, L.D., Datta, A., and Som, S.K., "Transport coefficients and life history of a vaporizing liquid fuel droplet subject to retardation in a convective ambience", Int. J. Heat and Fluid Flow, vol. 20, pp. 68-73, 1999.
- 6- Sazhin, S.S., "Advanced models of fuel droplet heating and evaporation", Progress in Energy and Combustion Science, vol. 32, pp. 162-214, 2006.
- 7- Wang, F., Sayma, A.I., Peng, Z.J. and Huang, Y., "A multi-section droplet combustion model for spray combustion simulation", Combustion, Fuels and Emissions, vol. 2, pp. 7-16, 2011.
- ۸- عنبرسوز، م، و نیازمند، ح، "بررسی اثر انتقال حرارت تشعشعی بر نرخ گرم شدن یک قطره سوخت در حضور چرخش داخلی قطره"، نشریه علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک، سال بیست و سوم، شماره ۱، آذر ۱۳۹۰.
- 9- Al Qubeissi, M., Sazhin, S.S., Turnur, J., Begg, S., Crua, C. and Heikal, M.R., "Modelling of gasoline fuel droplets heating and evaporation", Fuel, vol. 159, pp. 373-384, 2015
- 10- Dwyer, H. A., "Calculations of droplet dynamics in high temperature environments", Progress in Energy & Combustion Science, vol. 15, pp. 131-158, 1989.
- 11- Kim, I., Elghobashi, S., and Sirignano, W.A., "Unsteady flow interaction between a pair of advected vortex tubes and a rigid sphere", Int. J. Multiphase flow, Vol. 23, No. 1, pp. 1-23, 1997.
- 12- Chorin, A.J., "Numerical solution of Navier-Stokes equations", Math, Computation, vol. 22, pp. 745-762, 1968.
- 13- Masoudi, M., and Sirignano, W.A., "The influence of an advecting vortex on the heat transfer to a liquid droplet", Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 40, No. 15, pp. 3663-3673, 1997.
- 14- Faeth, G.M., "Mixing, transport and combustion in sprays", Progress Energy Combust. Sci., vol. 13, pp. 293-345, 1987.
- 15- Bejan, A., *Convection Heat Transfer*, 4th Edition, Wiley, 2013.