

شبیه‌سازی عددی اختلاط درون کانال با استفاده از یک استوانه‌ی دوار

رضا جعفری* و محسن ثقفیان

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۶/۶ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۲/۱۰/۲۱)

چکیده - در کار حاضر اختلاط دو نمونه به‌وسیله‌ی یک استوانه دوار محبوس درون یک کانال با استفاده از روش برهم‌نهادن شبکه‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد و تأثیر تغییرات عدد رینولدز، سرعت دورانی استوانه و نسبت انسداد بر ساختار جریان، گردابه‌ها و مکانیزم اختلاط مطالعه می‌شود. شبیه‌سازی‌های عددی در اعداد رینولدز 10^0 ، 70^0 و 100^0 ، سرعت‌های دورانی بدون بعد 1^0 و 2^0 ، نسبت‌های انسداد $0/1$ ، $0/3$ و $0/5$ و اعداد اشمیت 1 و 4 انجام گرفته است. در جریان ناپایای عبوری از روی استوانه محبوس درون کانال، الگوی ریزش گردابه‌ها متفاوت با الگویی است که در جریان آزاد عبوری از روی استوانه مشاهده می‌شود و گردابه‌ها در پشت استوانه به‌صورت ضربدری حرکت می‌کنند. ریزش گردابه‌ها از استوانه، اختلاط نمونه‌ها درون کانال را بهتر می‌کند. ریزش گردابه‌ها در پشت استوانه با دوران استوانه تضعیف می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش نسبت انسداد، شاخص اختلاط در نزدیکی خروجی کانال کاهش می‌یابد.

واژگان کلیدی: استوانه دوار، کانال، برهم‌نهی شبکه‌ها، ریزش گردابه، اختلاط.

Numerical Simulation of Mixing Induced by a Rotating Cylinder in Channel

R. Jafari* and M. Saghafian

Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology

Abstract: *In the present work, mixing of two species induced by a rotating cylinder confined in a channel is investigated using overset grid method and the effect of variation of Reynolds number, rotational velocity of the cylinder and blockage ratio on the structure of flow and wakes and mixing mechanism is studied. Numerical simulations are performed at Reynolds numbers of 10, 70 and 100, non dimensional rotational rates of 0, 1 and 2, blockage ratios of 0.1, 0.3 and 0.5 and Schmidt numbers of 1 and 4. In unsteady flow past a circular cylinder confined in a channel, the pattern of shed vortices is different from that observed in free stream flow past a cylinder and the vortices behind the cylinder moves criss-cross. The vortex shedding from the cylinder enhances mixing of species in channel. The vortex shedding behind the cylinder is weakened by rotation of the cylinder. The results show that as blockage ratio increases, mixing index near the exit of the channel decreases.*

Keywords: *Rotating cylinder, channel, overset grids, vortex shedding, mixing.*

* : مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: reza_jafari@me.iut.ac.ir

عدد رینولدز	$Re=U_{av}D/\nu$	غلظت، kg/m^3	c
عدد اشمیت	$Sc=\nu/d$	غلظت نیمه پایینی ورودی، kg/m^3	c_d
عدد استروهل	St	غلظت نیمه بالایی ورودی، kg/m^3	c_u
زمان، s	t	ضریب درگ	C_D
زمان بدون بعد	t^*	ضریب درگ اصطکاکی	C_{Df}
سرعت در جهت x، m/s	u	ضریب درگ فشاری	C_{Dp}
سرعت متوسط جریان درون کانال، m/s	U_{av}	ضریب لیفت	C_L
سرعت بدون بعد در جهت x	u^*	ضریب لیفت اصطکاکی	C_{Lf}
سرعت در جهت y، m/s	v	ضریب لیفت فشاری	C_{Lp}
سرعت بدون بعد در جهت y	v^*	ضریب پنخس جرمی، m^2/s	d
سرعت دورانی بدون بعد	$\alpha = \omega D / 2U_{av}$	قطر استوانه، m	D
نسبت انسداد	$\beta = D/H$	فرکانس ریزش گردابه، 1/s	f
غلظت بدون بعد	θ	نیروی درگ، N	F_D
ویسکوزیته دینامیکی سیال، Pa.s	μ	نیروی لیفت، N	F_L
ویسکوزیته سینماتیکی سیال، m^2/s	ν	ارتفاع کانال، m	H
چگالی سیال، kg/m^3	ρ	شاخص اختلاط	M
زاویه از نقطه سکون	ϕ	فشار، Pa	p
سرعت زاویه‌ای دوران استوانه، rad/s	ω	فشار بدون بعد	p^*
		عدد پکلت	Pe

۱- مقدمه

جریان عبوری از روی یک استوانه از مسائل جالب توجه مکانیک سیالات می‌باشد که هم از نظر فیزیکی و هم از نظر کاربردی مورد توجه پژوهشگران مختلف قرار گرفته است. در این جریان، گردابه‌هایی به صورت متناوب و یک در میان از بالا و پایین استوانه ریزش می‌کنند و در پشت استوانه ناحیه‌ای را تشکیل می‌دهند که به خیابان ورتکس کارمن^۱ معروف است. در جریان آزاد عبوری از روی استوانه ساکن، ریزش گردابه‌ها در عدد رینولدز بحرانی در حدود ۴۹ آغاز می‌شود [۱]. یکی از کاربردهای چنین جریان‌هایی، اختلاط نمونه‌های با غلظت مختلف می‌باشد. ریزش گردابه‌ها و ناپایداری ناشی از آن موجب بهبود اختلاط نمونه‌ها می‌شود.

در جریان عبوری از روی استوانه دوار محبوس درون کانال،

می‌توان از اثر ترکیبی تغییر سرعت دورانی استوانه و نسبت انسداد برای کنترل توقف یا آغاز ریزش گردابه‌ها در پشت استوانه استفاده کرد و بدین ترتیب مکانیزم اختلاط را تغییر داد. این جریان علاوه بر عدد رینولدز به دو پارامتر اساسی دیگر وابسته است. این پارامترها نسبت انسداد و سرعت دورانی بدون بعد می‌باشند که به ترتیب تأثیر انسداد کانال و دوران استوانه را بیان می‌کنند. در ادامه چند نمونه از پژوهش‌های شاخص صورت گرفته در زمینه جریان، انتقال حرارت و انتقال جرم پیرامون استوانه محبوس درون کانال معرفی می‌شود.

در سال ۱۹۹۵ چنو همکاران [۲] جریان عبوری از استوانه‌ای که بین صفحات موازی قرار گرفته است را بررسی کردند و به بررسی چگونگی ناپایدار شدن جریان پایای اطراف استوانه با افزایش عدد رینولدز پرداختند.

در سال ۲۰۰۱ زواتو و پدریستی [۳] جریان عبوری از روی استوانه محبوس درون کانال را با روش‌های عددی حل کردند و به این نتیجه رسیدند که با نزدیک شدن استوانه به دیواره‌های کانال، گذار جریان از حالت پایا به ناپایا در اعداد رینولدز بالاتری روی می‌دهد. آنها همچنین الگوی ریزش گردابه‌ها و تغییرات ضرایب درگ و لیفت را برای فواصل مختلف استوانه از دیوار به دست آوردند.

در سال ۲۰۰۴ خان و همکاران [۴] با حل تقریبی انتگرالی لایه مرزی، جریان و انتقال حرارت پیرامون یک استوانه که بین دو صفحه موازی قرار دارد را بررسی کردند و تأثیر تغییرات نسبت انسداد را روی جریان و انتقال حرارت به دست آوردند.

در سال ۲۰۰۴ چاکرابورتی و همکاران [۵] جریان عبوری از روی استوانه محبوس درون کانال را با روش‌های عددی مطالعه نمودند و تأثیر تغییرات عدد رینولدز و نسبت انسداد را بر روی پارامترهای جریان مانند ضرایب نیرو و زاویه‌ی جدایش بررسی کردند.

در سال ۲۰۰۴ کلیف و تاوئر [۶] جریان عبوری از روی استوانه دوار محبوس درون کانال را به صورت عددی مورد مطالعه قرار دادند و تغییرات عدد رینولدز بحرانی با سرعت دورانی را در نسبت انسداد $\beta = 0.7$ گزارش کردند. نتایج آنها نشان داد که برای نسبت انسداد 0.7 با افزایش سرعت دورانی بدون بعد (در محدوده $\alpha \leq 1.2$)، عدد رینولدز بحرانی افزایش می‌یابد.

در سال ۲۰۰۶ متو و همکاران [۷] جریان و انتقال حرارت از یک استوانه ساکن که به صورت نامتقارن درون کانال قرار گرفته است را به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که در یک نسبت انسداد ثابت با افزایش فاصله استوانه از مرکز کانال، ضریب درگ، عدد استروهمال و عدد رینولدز بحرانی افزایش می‌یابند، ولی تغییرات عدد نوسلت ناچیز است.

در سال ۲۰۰۷ بارتی و همکاران [۸] جریان سیال غیرنیوتونی تراکم‌ناپذیر عبوری از روی استوانه محبوس بین دو صفحه موازی را با استفاده از نرم‌افزار فلونت^۲ مورد مطالعه قرار داده و نقش پارامترهای عدد رینولدز و شاخص تابع نمایی

را روی ویژگی‌های جریان بررسی کردند. در کار دیگری در سال ۲۰۰۷ بارتی و همکاران [۹] انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری از استوانه محبوس بین دو صفحه موازی به سیال غیرنیوتونی اطرافش را با استفاده از نرم‌افزار فلونت مورد مطالعه قرار دادند. آنها تأثیر تغییرات پارامترهای نسبت انسداد و شاخص تابع نمایی را بر روی انتقال حرارت از استوانه به سیال اطرافش مورد مطالعه قرار دادند.

در سال ۲۰۰۸ رحیمی و همکاران [۱۰] جریان عبوری از روی استوانه ساکن درون کانال را با روش‌های تجربی مورد بررسی قرار دادند. آزمایش‌ها با استفاده از اندازه‌گیری‌های دوبعدی PIV در نسبت انسداد $\beta = 1.3$ و اعداد رینولدز $30 \leq Re \leq 277$ انجام شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که قرارگیری استوانه درون کانال موجب به تأخیر افتادن ناپایداری اولیه می‌شود، به علاوه ویژگی‌های گردابه‌های ریزش شده متفاوت با چیزی است که در مورد جریان آزاد عبوری از روی استوانه مشاهده می‌شود.

در سال ۲۰۰۸ سلیک و همکاران [۱۱] سینماتیک جریان در یک میکسر را به صورت عددی مورد مطالعه قرار دادند. میکسر پیشنهادی آنها از یک کانال مستقیم تشکیل شده که استوانه‌ای درون آن قرار دارد که دارای نوسانات هارمونیک در جهت عمود بر جریان با دامنه 0.4 برابر قطر استوانه است. یک صفحه جداکننده در ورودی کانال قرار دارد که نمونه‌ها با غلظت‌های مختلف از بالا و پایین صفحه جداکننده وارد کانال می‌شوند و بعد از صفحه جداکننده با هم مخلوط می‌شوند. شبیه‌سازی‌ها برای عدد رینولدز $Re = 100$ ، نسبت انسداد $\beta = 1.3$ و بازه وسیعی از فرکانس‌های نوسان استوانه انجام شده است. آنها مشاهده کردند که ویژگی‌های جریان مانند فاصله گردابه‌ها از یکدیگر، شدت گردابه‌ها و... متفاوت با آن چیزی است که در جریان آزاد مشاهده می‌شود. آنها ویژگی‌های مختلف جریان مانند الگوی گردابه‌ها در پایین دست جریان و نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر استوانه و عدد استروهمال را به دست آوردند. در سال ۲۰۰۹ سلیک و همکاران [۱۲] به بررسی

اختلاط نمونه‌ها در میکسر پیشنهادی خود (که در مقاله قبلی خود آن را معرفی کردند) پرداختند. مقایسه نتایج نشان داد که در عدد پکلت $Pe = 800$ ، در حالتی که فرکانس نوسان استوانه ۲۵ درصد بیشتر از فرکانس طبیعی ریزش گردابه‌ها باشد، بازدهی اختلاط به ترتیب ۶۰ و ۴۶ درصد بهتر از حالت‌های کانال مستقیم بدون استوانه و کانال مستقیم با استوانه ساکن درون کانال است.

در سال ۲۰۱۰ سینگها و سینهاماهاپاترا [۱۳] جریان عبوری از روی استوانه محبوس درون کانال را به صورت عددی مورد مطالعه قرار دادند و نشان دادند که افزایش نسبت انسداد موجب به تأخیر افتادن گذار جریان از رژیم پایا به رژیم ناپایا می‌شود و بدین ترتیب ریزش گردابه‌ها در اعداد رینولدز بالاتری روی می‌دهد، به علاوه افزایش نسبت انسداد موجب افزایش ضریب درگ و کاهش نوسانات ضریب لیفت می‌شود.

در سال ۲۰۱۱ پراساد و همکاران [۱۴] جریان عبوری و انتقال حرارت اطراف استوانه دوار محبوس درون کانال را با روش‌های عددی مورد مطالعه قرار دادند. مطالعه آنها در بازه اعداد رینولدز $35 \leq Re \leq 170$ و نسبت‌های انسداد $0 \leq \beta \leq 0.5$ و سرعت‌های دورانی بدون بعد $0 \leq \alpha \leq 2$ انجام گرفته است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که با افزایش نسبت انسداد، نیروی درگ و انتقال حرارت افزایش می‌یابند و در مقابل با افزایش سرعت دورانی، نیروی درگ و انتقال حرارت کاهش می‌یابند. آنها همچنین تغییرات سرعت دورانی بحرانی (سرعت دورانی که در آن ریزش گردابه‌ها متوقف می‌شود) را با عدد رینولدز و نسبت انسداد و همچنین تغییرات عدد رینولدز بحرانی (عدد رینولدزی که در آن ریزش گردابه‌ها آغاز می‌شود) را با سرعت دورانی و نسبت انسداد به دست آوردند.

بیشتر مطالعات صورت گرفته در زمینه جریان عبوری از روی استوانه محبوس درون کانال مربوط به جریان عبوری از روی استوانه ساکن محبوس درون کانال است و مطالعات کمی در مورد جریان عبوری از روی استوانه با حرکت دورانی، نوسانی و... که درون کانال قرار داده شده، انجام شده است،

به خصوص در زمینه انتقال حرارت و انتقال جرم در این جریان کمبود منابع کاملاً احساس می‌شود. در کار پیش‌رو اختلاط دو نمونه با غلظت مختلف درون جریان عبوری از روی استوانه دوار محبوس درون کانال با استفاده از روش عددی برهم‌نهی شبکه‌ها^۳ مورد بررسی قرار می‌گیرد. شبیه‌سازی‌ها در اعداد رینولدز $10 \leq Re \leq 100$ و سرعت‌های دورانی بدون بعد $0 \leq \alpha \leq 2$ و نسبت‌های انسداد $0.1 \leq \beta \leq 0.5$ و اعداد اشمیت $Sc = 1.4$ انجام شده است. در کار حاضر ابتدا به بررسی ویژگی‌های جریان و گردابه‌ها و سپس به بررسی کمی اختلاط دو نمونه درون کانال و تأثیر پارامترهای عدد رینولدز، سرعت دورانی بدون بعد استوانه، نسبت انسداد کانال و عدد اشمیت روی اختلاط نمونه‌ها می‌پردازیم.

۲- توصیف فیزیکی مسأله

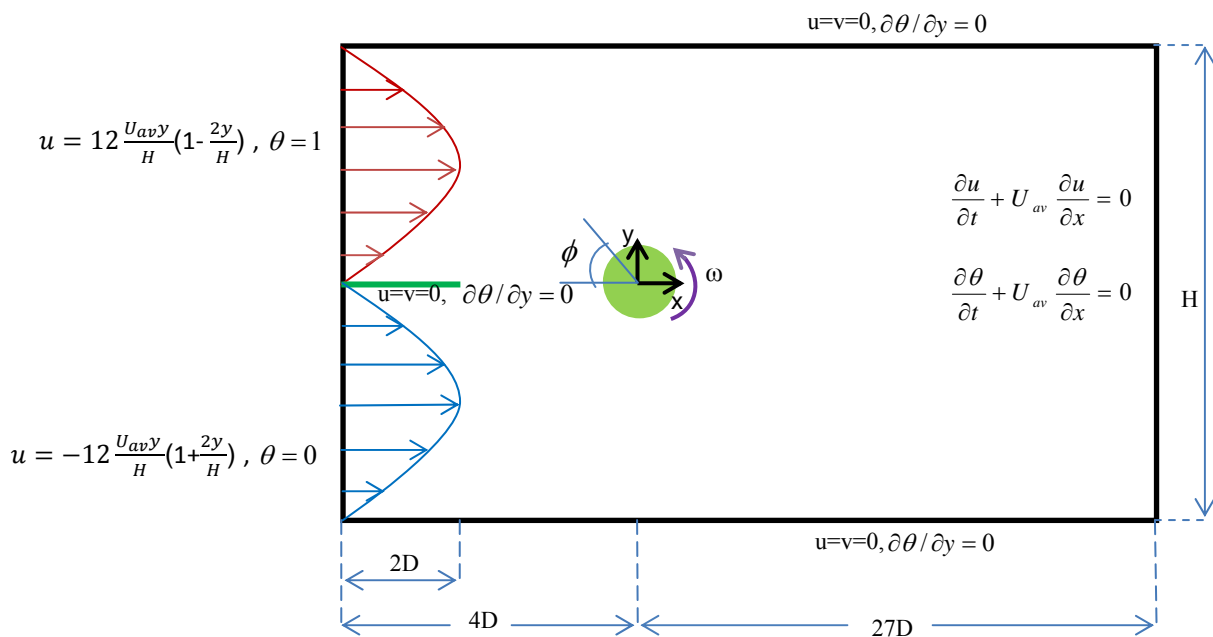
نمایی از مسأله مورد بررسی در شکل (۱) آورده شده است. جریان سیال از روی استوانه دوار به قطر D ، که درون کانال قرار گرفته است، عبور می‌کند. طول صفحه جداکننده برابر $2D$ ، فاصله مرکز استوانه تا ورودی کانال برابر $4D$ و طول کانال برابر $31D$ می‌باشد. فاصله بین دیواره‌های کانال $H = D/\beta$ است، بدین ترتیب با تغییر این فاصله می‌توان نسبت‌های انسداد مختلفی به دست آورد. دو جریان توسعه یافته هیدرودینامیکی در ورودی کانال از بالا و پایین صفحه جداکننده با غلظت‌های مختلف (غلظت بدون بعد سیال در بالای صفحه جداکننده ۱ و در پایین صفحه جداکننده صفر در نظر گرفته می‌شود) وارد کانال می‌شوند. استوانه با سرعت دورانی ثابت ω در جهت خلاف چرخش عقربه‌های ساعت^۴ (CCW) می‌چرخد.

۳- معادلات حاکم و شرایط مرزی و پارامترهای

بدون بعد

۳-۱- معادلات حاکم

معادلات جریان حاکم بر مسأله، معادلات بقای جرم، بقای ممتوم و انتقال جرم هستند. سیال تراکم ناپذیر و با خواص



شکل ۱- پیکربندی مورد مطالعه و شرایط مرزی

در معادلات بالا u و v مؤلفه‌های سرعت سیال هستند، U_{av} سرعت متوسط جریان درون کانال است و به‌عنوان سرعت مشخصه در نظر گرفته می‌شود. U_{av} از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$U_{av} = \frac{1}{H} \int_{-H/2}^{H/2} u dy \quad (5)$$

D قطر استوانه به‌عنوان طول مشخصه در نظر گرفته می‌شود. p فشار، t زمان، ρ چگالی، μ لزجت دینامیکی، ν لزجت سینماتیکی و d ضریب پخش جرم است. c غلظت، c_u غلظت نیمه بالایی جریان ورودی و c_d غلظت نیمه پایینی جریان ورودی و θ غلظت بدون بعد است. Re عدد رینولدز و Sc عدد اشویت است.

۳-۲- شرایط مرزی

شرایط مرزی مسأله در شکل (۱) نشان داده شده است. در مرز سمت چپ (ورودی کانال)، دو جریان توسعه‌یافته از بالا و پایین صفحه جداکننده وارد کانال می‌شوند. پروفیل سرعت سیال در هر دو جریان ورودی، سهمی شکل است. سرعت در بالای صفحه جداکننده از رابطه (۶-الف) و سرعت در پایین

ترمودینامیکی ثابت در نظر گرفته شده است. در ادامه معادلات بی‌بعد شده در حالت دو بعدی ارائه شده است.

معادله بقای جرم:

$$\frac{\partial u^*}{\partial x^*} + \frac{\partial v^*}{\partial y^*} = 0 \quad (1)$$

معادله بقای ممتوم:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u^*}{\partial t^*} + \frac{\partial (u^{*2})}{\partial x^*} + \frac{\partial (u^* v^*)}{\partial y^*} &= -\frac{\partial p^*}{\partial x^*} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 u^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 u^*}{\partial y^{*2}} \right) \\ \frac{\partial v^*}{\partial t^*} + \frac{\partial (u^* v^*)}{\partial x^*} + \frac{\partial (v^{*2})}{\partial y^*} &= -\frac{\partial p^*}{\partial y^*} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 v^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 v^*}{\partial y^{*2}} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

معادله انتقال جرم:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t^*} + \frac{\partial (u^* \theta)}{\partial x^*} + \frac{\partial (v^* \theta)}{\partial y^*} = \frac{1}{Re Sc} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^{*2}} \right) \quad (3)$$

متغیرهای بی‌بعد به کار رفته در معادلات بالا به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\begin{aligned} u^* &= \frac{u}{U_{av}}, \quad v^* = \frac{v}{U_{av}}, \quad x^* = \frac{x}{D}, \quad y^* = \frac{y}{D}, \quad p^* = \frac{p}{\rho U_{av}^2} \\ t^* &= \frac{U_{av} t}{D}, \quad \theta = \frac{c - c_d}{c_u - c_d}, \quad Re = \frac{U_{av} D}{\nu}, \quad Sc = \frac{\nu}{d} \end{aligned} \quad (4)$$

صفحه جداکننده از رابطه (۶-ب) به دست می آید:

$$u = 12U_{av} \frac{y}{H} \left(1 - \frac{2y}{H}\right) \quad (۶-الف)$$

$$u = -12U_{av} \frac{y}{H} \left(1 + \frac{2y}{H}\right) \quad (۶-ب)$$

U_{av} سرعت متوسط سیال درون کانال می باشد. بالای صفحه جداکننده غلظت بدون بعد سیال $\theta=1$ و پایین صفحه جداکننده غلظت بدون بعد سیال $\theta=0$ است. همچنین در ورودی کانال $v=0$ است.

در مرزهای بالا و پایین (دیواره های کانال) و صفحه جداکننده شرط عدم لغزش ($u=v=0$) برقرار است و دیواره ها به صورت نفوذناپذیر در نظر گرفته شده اند و به عبارتی در این مرزها $\partial\theta/\partial y = 0$ است. در مرز سمت راست (خروجی) نیز از شرط مرزی جابه جایی^۵ (CBC) به صورت معادلات (۷) استفاده می شود:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + U_{av} \frac{\partial u}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + U_{av} \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (۷)$$

شرط مرزی جابه جایی از معادلات ممتوم و انرژئی و با حذف عبارات ناچیز در نواحی دور دست به دست می آید و نسبت به اعمال شرط مرزی نیومن ارجحیت دارد زیرا برگرفته از معادلات حاکم بر مسأله است. بر روی سطح استوانه شرط عدم لغزش برقرار است. بنابراین:

$$u = -\frac{D\omega}{2} \sin\phi \quad (۸)$$

$$v = -\frac{D\omega}{2} \cos\phi$$

زاویه ϕ روی شکل (۱) زاویه موقعیت روی سطح با محور x است. ضمناً برای سطح استوانه $\partial\theta/\partial n = 0$ است که n بردار عمود بر سطح استوانه است.

به دست می آیند:

$$C_D = \frac{F_x}{0.5\rho U_{av}^2 D} \quad (۹)$$

$$C_L = \frac{F_y}{0.5\rho U_{av}^2 D}$$

در این روابط F_x و F_y به ترتیب مؤلفه های نیروی وارد بر استوانه در جهت های x و y را نشان می دهند. نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر استوانه شامل دو مؤلفه فشاری و اصطکاکی هستند و بدین ترتیب ضرایب درگ و لیفت نیز به دو مؤلفه فشاری و اصطکاکی تقسیم می شوند که براساس روابط زیر محاسبه می شوند:

$$C_D = C_{Dp} + C_{Df} = 2 \iint -p^* dy^* + \frac{2}{Re} \iint \frac{\partial V_t}{\partial r} dx^* \quad (۱۰)$$

$$C_L = C_{Lp} + C_{Lf} = 2 \iint -p^* dx^* + \frac{2}{Re} \iint \frac{\partial V_t}{\partial r} dy^*$$

V_t سرعت مماسی بدون بعد روی سطح استوانه و r فاصله شعاعی بدون بعد از مرکز استوانه است. عدد استروهمال فرکانس بدون بعد ریزش گردابه ها است که به صورت رابطه (۱۱) تعریف می شود:

$$St = \frac{fD}{U_{av}} \quad (۱۱)$$

شاخص اختلاط براساس رابطه زیر محاسبه می شود:

$$M = 2\sqrt{\frac{1}{H} \int_{-H/2}^{+H/2} (\theta - 0.5)^2 dy} \quad (۱۲)$$

در این رابطه H ارتفاع کانال و θ غلظت بدون بعد سیال است. شاخص اختلاط از صفر تا ۱ تغییر می کند. هنگامی که شاخص اختلاط برابر ۱ باشد، یعنی هیچ اختلاطی صورت نگرفته است و وقتی شاخص اختلاط برابر صفر باشد، یعنی دو نمونه به طور کامل با هم مخلوط شده و در همه جای مقطع مورد نظر غلظت سیال عبوری ۰/۵ است.

۴- روش عددی و اعتبار سنجی

در مطالعه حاضر برای حل جریان از روش برهم نهی شبکه ها استفاده می شود. در روش برهم نهی شبکه ها، یک شبکه اصلی^۶

۳-۳- پارامترهای بدون بعد

ضرایب درگ و لیفت استوانه براساس روابط زیر

جدول ۱- ابعاد شبکه‌های اصلی و فرعی و Δt های مربوط به مطالعه شبکه برای $\beta = 1/3$

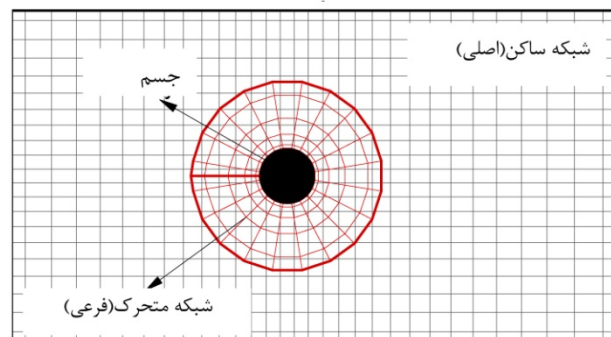
Case	H Grid	O Grid	Δt^*
A	۲۰۲×۷۲	۸۲×۶۲	۰/۰۱
B	۲۰۲×۷۲	۸۲×۶۲	۰/۰۰۵
C	۲۵۲×۱۰۲	۱۲۲×۹۲	۰/۰۱
D	۲۵۲×۱۰۲	۱۰۲×۷۲	۰/۰۲
E	۲۵۲×۱۰۲	۱۰۲×۷۲	۰/۰۱
F	۲۵۲×۱۰۲	۱۰۲×۷۲	۰/۰۰۵
G	۳۰۲×۱۳۲	۱۲۲×۸۲	۰/۰۱
H	۳۰۲×۱۳۲	۱۲۲×۸۲	۰/۰۰۵

شبکه فرعی هستند. بخش مهمی از روش به کار رفته برای حل جریان به کمک روش برهم نهی شبکه‌ها از کارهای نیرشل [۱۵] و تانسر [۱۶] اقتباس شده است.

در این مطالعه، از روش حجم محدود برای گسسته سازی معادلات دیفرانسیل و از الگوریتم سیمپل سی^۹ برای حل میدان جریان استفاده می‌شود. برای محاسبه جملات جابه‌جایی از روش کوپیک^{۱۰} [۱۷] و برای محاسبه تغییرات زمانی از روش کرانک نیکلسون استفاده می‌شود. برای اجتناب از نوسانات غیرفیزیکی در میدان سرعت و فشار از الگوریتم رای-چاو استفاده شده است.

برای حل مسأله، ابتدا باید شبکه محاسباتی و گام زمانی مناسب که در آن نتایج حل عددی مستقل از کیفیت شبکه باشد را به دست آورد. مسأله در $\alpha=0$ و $Re=100$ و $\beta=1.3$ در اندازه‌های مختلف شبکه و گام‌های زمانی مختلف حل شده است و با نتایج عددی مطالعه سلیک و همکاران [۱۱] مقایسه شده است. در جدول ۱ ابعاد شبکه‌های اصلی و فرعی و گام‌های زمانی مربوط به هر کدام از مطالعات آورده شده است. در جدول ۲ نتایج به دست آمده و نتایج مربوط به مطالعه سلیک و همکاران [۱۱] نشان داده شده است.

مطالعه حاضر برای نسبت‌های انسداد $\beta=0.1, 0.3, 0.5$ صورت گرفته است، در حالیکه مطالعه شبکه به دلیل نبود مطالعات مشابه در نسبت‌های انسداد ذکر شده، در نسبت انسداد



شکل ۲- شبکه های اصلی و فرعی

برای پوشاندن تمام ناحیه حل به کار می‌رود که در مورد مسأله حاضر شبکه اصلی یک شبکه ساده مستطیلی از نوع H است. شبکه اصلی ساکن است. یک شبکه فرعی^۷ منطبق بر بدنه^۸ حول جسم در ناحیه‌ای که گرادیان فشار، سرعت و دما زیاد است، ایجاد می‌شود که روی شبکه اصلی قرار می‌گیرد. در مسأله حاضر شبکه فرعی از نوع O می‌باشد. شبکه فرعی همراه با جسم حرکت می‌کند. شبکه های اصلی و فرعی به کار رفته در این مطالعه در شکل (۲) نشان داده شده‌اند. معادلات جریان در هر دو شبکه اصلی و فرعی به صورت جداگانه حل می‌شوند و اطلاعات بین شبکه‌های اصلی و فرعی در نقاطی خاص با میانبازی منتقل می‌شود. برای شبکه اصلی، نقاط دریافت کننده اطلاعات از شبکه فرعی نقاط مجاور جسم صلب هستند که بیرون از جسم قرار می‌گیرند و در مورد شبکه فرعی، نقاط دریافت کننده اطلاعات از شبکه اصلی، نقاط روی مرز بیرونی

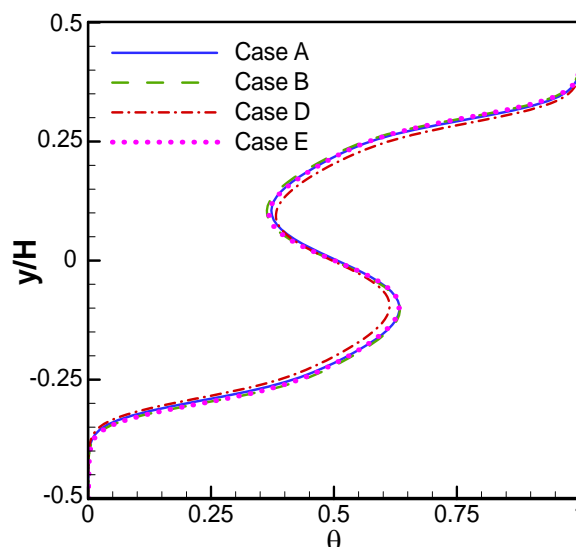
جدول ۲- نتایج به دست آمده از مطالعه شبکه برای $\beta=1/3$

Case	CD	$\pm CL$	CDp	Cdf	$\pm CLp$	$\pm CLf$	St
A	۲/۵۰۷	۰/۲۶۶	۱/۹۶۷	۰/۵۴۰	۰/۲۴۶	۰/۰۲۷	۰/۳۴۸۴
B	۲/۵۰۷	۰/۲۸۲	۱/۹۶۷	۰/۵۴۰	۰/۲۵۹	۰/۰۲۹	۰/۳۴۹۶
C	۲/۵۲۸	۰/۲۶۳	۱/۹۸۴	۰/۵۴۴	۰/۲۴۶	۰/۰۲۶	۰/۳۴۸۴
D	۲/۵۲۳	۰/۲۳۰	۱/۹۸۰	۰/۵۴۳	۰/۲۱۹	۰/۰۲۰	۰/۳۴۴۸
E	۲/۵۲۶	۰/۲۶۶	۱/۹۸۲	۰/۵۴۳	۰/۲۴۷	۰/۰۲۶	۰/۳۴۸۴
F	۲/۵۲۶	۰/۲۸۴	۱/۹۸۲	۰/۵۴۳	۰/۲۶۱	۰/۰۲۹	۰/۳۴۹۶
G	۲/۵۳۰	۰/۲۶۲	۱/۹۸۶	۰/۵۴۴	۰/۲۴۴	۰/۰۲۵	۰/۳۴۷۲
H	۲/۵۳۱	۰/۲۸۲	۱/۹۸۷	۰/۵۴۴	۰/۲۶۰	۰/۰۲۹	۰/۳۴۹۶
Celik et al.	-	-	۲/۰۳	۰/۵۶	۰/۲۸	۰/۰۳	۰/۳۴۷

حل عددی مستقل از کیفیت شبکه باشد، به دست آمده است. در نسبت انسداد $\beta=0.1$ از شبکه اصلی با تعداد 252×152 گره و شبکه فرعی با تعداد 102×92 گره استفاده شده است و $\Delta t^* = 0.005$ به عنوان گام زمانی در نظر گرفته شده است. در نسبت انسداد $\beta=0.5$ از شبکه اصلی با تعداد 252×42 گره و شبکه فرعی با تعداد 102×52 گره استفاده شده است و $\Delta t^* = 0.005$ به عنوان گام زمانی در نظر گرفته شده است. شکل (۳) در $\beta=0.3$ تغییرات غلظت بی بعد را در یک مقطع از مجرا در موقعیت $x=10D$ یا $3H$ (مقطعی که به اندازه سه برابر عرض مجرا از مرکز استوانه فاصله دارد) با کمک چند شبکه مختلف که اطلاعات آنها در جدول ۱ منعکس شده است را نشان می دهد. غلظت نشان داده شده در یک بازه زمانی وسیع میانگیری شده است.

۵- بررسی ویژگی های هیدرودینامیکی جریان

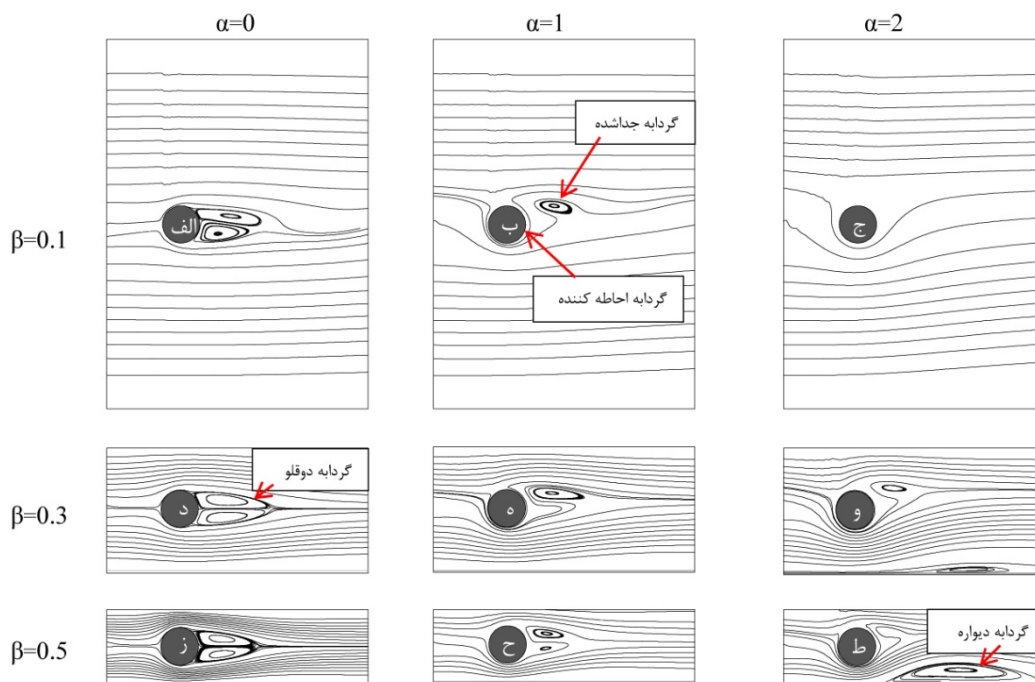
در جریان گذرنده از روی استوانه ای که درون کانال قرار داده شده است، لایه های برشی دیواره های کانال گردابه هایی را تشکیل می دهند که در اثر برهم کنش میان این گردابه ها و گردابه های ریزش شده در پشت استوانه، ویژگی هایی متفاوت با جریان آزاد عبوری از روی استوانه مشاهده می شود. برای نمایش اثر دوران استوانه و قرارگیری استوانه درون کانال بر



شکل ۳- تغییرات غلظت بی بعد میانگیری شده زمانی در عرض مجرا در موقعیت $x=10D$

$\beta=1.3$ انجام گرفته است و نتایج آن برای نسبت انسداد $\beta=0.3$ استفاده شده است. در نسبت انسداد $\beta=0.3$ از شبکه اصلی با تعداد 252×102 گره و شبکه فرعی با تعداد 102×72 گره استفاده شده است و $\Delta t^* = 0.005$ به عنوان گام زمانی در نظر گرفته شده است.

برای نسبت های انسداد $\beta=0.1, 0.5$ نیز، شبکه های با ابعاد مختلف در گام های زمانی متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است و شبکه محاسباتی و گام زمانی مناسب که در آن نتایج



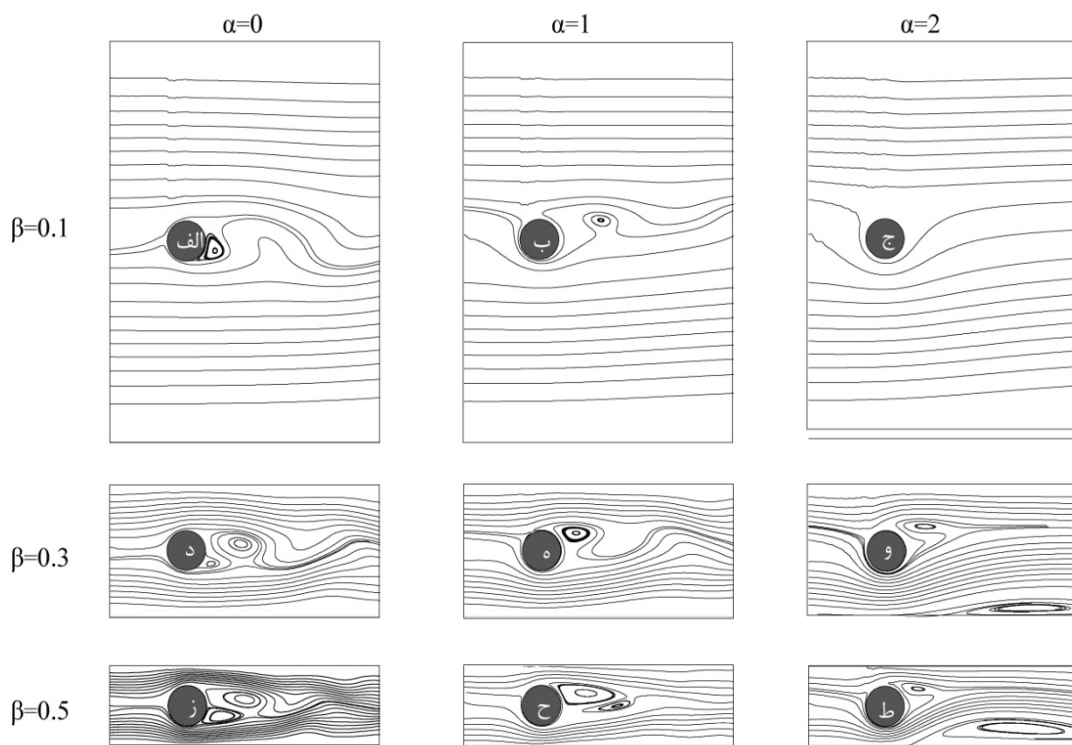
شکل ۴- خطوط جریان در نزدیکی سطح استوانه برای $Re = 70$ در سرعت‌های دورانی و نسبت‌های انسداد مختلف

می‌گیرد که در شکل (۴-ب) نشان داده شده است. سیال درون گردابه احاطه‌کننده در خلاف جهت چرخش عقربه‌های ساعت و درون گردابه جدا شده در جهت چرخش عقربه‌های ساعت حرکت می‌کند. همان‌طور که در شکل مشخص است با افزایش سرعت دورانی اندازه گردابه جدا شده کاهش می‌یابد و به سمت بالا حرکت می‌کند، ناحیه کم فشار نزدیک گردابه موجب می‌شود سیال زیر استوانه به سمت بالا حرکت کند و بدین ترتیب اینرسی سیال در زیر استوانه و نزدیک دیواره پایینی کاهش می‌یابد، با افزایش بیشتر سرعت دورانی و نسبت انسداد، جدایش جریان روی دیواره پایینی کانال روی می‌دهد و گردابه‌ای موسوم به گردابه دیواره^۴ روی دیواره پایینی تشکیل می‌شود که در شکل (۴-ط) نشان داده شده است.

شکل (۵)، خطوط جریان را در نزدیکی سطح استوانه برای $Re = 100$ در حالات مختلف نشان می‌دهد. با توجه به شکل مشخص است که جریان در $Re = 100$ به جز سه حالت ($\beta = 0.1, 0.3, 0.5, \alpha = 2$) در بقیه حالات ناپایا است. در مورد جریان عبوری از روی استوانه ساکن ($\alpha = 0$) گردابه‌های

روی ویژگی‌های جریان، خطوط جریان و کانتورهای ورتیسیتیه برای حالات مختلف رسم شده است.

شکل (۴)، خطوط جریان را در نزدیکی سطح استوانه برای $Re = 70$ در حالات مختلف نشان می‌دهد. با توجه به شکل مشخص است که جریان در $Re = 70$ به جز دو حالت ($\beta = 0.1, \alpha = 0, 1$) در بقیه حالات پایا است. در جریان پایای عبوری از روی استوانه ساکن، جدایش جریان روی سطوح بالایی و پایینی استوانه منجر به شکل‌گیری گردابه دوقلو^{۱۱} در پشت استوانه می‌شود، این گردابه در شکل (۴-د) نشان داده شده است. گردابه دوقلو روی سطح استوانه تشکیل می‌شود و سیال درون گردابه بالایی در جهت چرخش عقربه‌های ساعت و درون گردابه پایینی در خلاف جهت چرخش عقربه‌های ساعت حرکت می‌کند. دوران استوانه منجر به شکل‌گیری گردابه‌ای حول استوانه موسوم به گردابه احاطه‌کننده^{۱۲} می‌شود که در شکل (۴-ب) نشان داده شده است، به علاوه به واسطه ناحیه کم فشاری که در پشت گردابه احاطه‌کننده به وجود آمده، گردابه دیگری موسوم به گردابه جدا شده^{۱۳} در پشت استوانه شکل

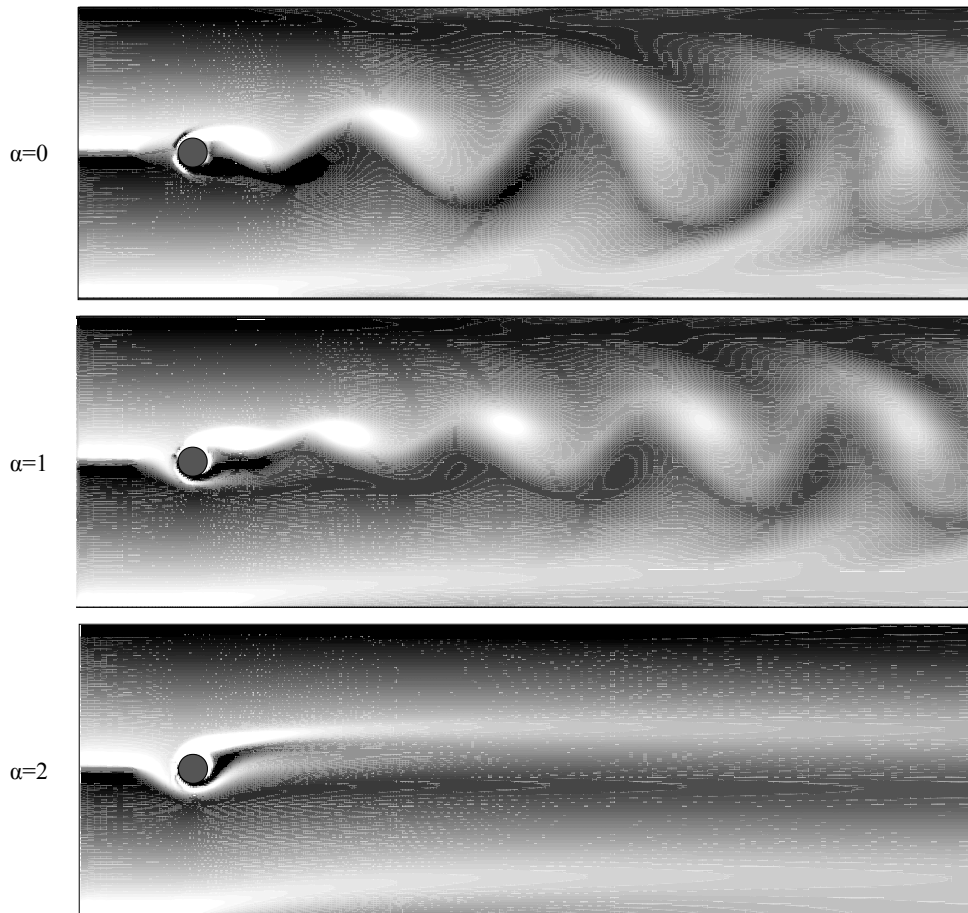


شکل ۵- خطوط جریان در نزدیکی سطح استوانه برای $Re = 100$ در سرعت‌های دورانی و نسبت‌های انسداد مختلف

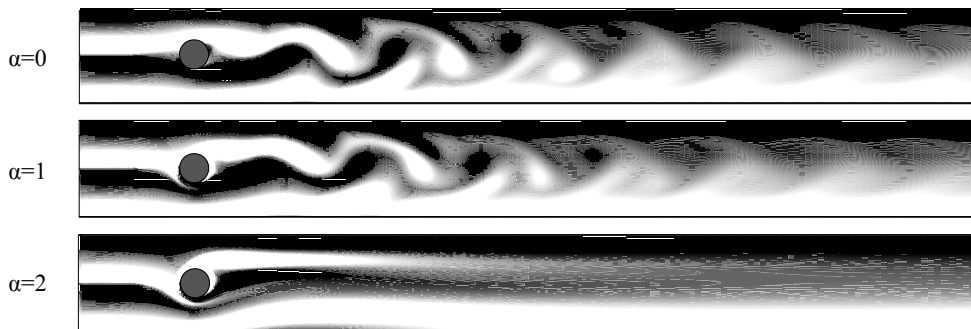
گردابه‌هایی با علامت مخالف روی سطوح بالایی و پایینی استوانه شکل می‌گیرند که وارد جریان شده و در پایین دست جریان در فاصله‌ای نسبتاً ثابت از یکدیگر به دنبال هم حرکت می‌کنند و الگویی تکراری از گردابه‌ها را در پشت استوانه ایجاد می‌کنند که به خیابان ورتکس کارمن مشهور است. در جریان ناپایای عبوری از روی استوانه محبوس درون کانال، لایه‌های برشی دیواره‌های کانال گردابه‌هایی را ایجاد می‌کنند که بر هم کنش میان این گردابه‌ها و گردابه‌های ریزش شده در پشت استوانه ویژگی‌هایی جدید به جریان می‌دهد. در این جریان گردابه‌های CCW بر روی سطح پایینی استوانه و دیواره بالایی کانال و در مقابل گردابه‌های CW بر روی سطح بالایی استوانه و دیواره پایینی کانال تشکیل می‌شوند. برای گردابه‌های ریزش شده در پشت استوانه حرکت ضربدری مشاهده می‌شود، بدین ترتیب که گردابه‌های ریزش شده از بالا و پایین استوانه همزمان با حرکت در پایین دست جریان به ترتیب به طرف دیواره‌های پایینی و بالایی کانال حرکت می‌کنند و در آنجا با

ریزش شده در پشت استوانه روی سطح استوانه تشکیل می‌شوند در حالیکه در استوانه دوار این گردابه‌ها در ناحیه جریان پشت استوانه شکل می‌گیرند. با دوران استوانه گردابه احاطه‌کننده استوانه را دربرمی‌گیرد. به علاوه انحراف خطوط جریان در جهت دوران استوانه مشاهده می‌شود و سیال زیر استوانه به سمت بالا حرکت می‌کند که در نتیجه اینرسی سیال در نزدیکی دیواره پایینی کاهش می‌یابد و با افزایش بیشتر سرعت دورانی و نسبت انسداد، جدایش جریان روی دیواره پایینی روی می‌دهد و گردابه دیواره روی دیواره پایینی تشکیل می‌شود که در شکل‌های (ط و و-۵) مشاهده می‌شود.

در ادامه کانتورهای ورتیسیتیه برای حالات مختلف رسم شده است. رنگ سفید نشان‌دهنده گردابه‌های منفی است که سیال در آنجا در جهت چرخش عقربه‌های ساعت (CW) می‌چرخد و رنگ سیاه نشان‌دهنده گردابه‌های مثبت است که سیال در آنجا خلاف جهت چرخش عقربه‌های ساعت (CCW) می‌چرخد. در جریان آزاد ناپایای عبوری از روی استوانه،



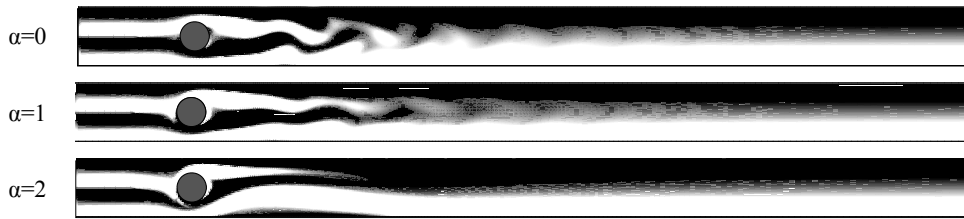
شکل ۶- کانتورهای ورتیسسته در $Re = 100$ و $\beta = 0.1$ و سرعت‌های دورانی مختلف



شکل ۷- کانتورهای ورتیسسته در $Re = 100$ و $\beta = 0.3$ و سرعت‌های دورانی مختلف

جریان به سمت بالا منحرف می‌شوند و شدت گردابه‌های مثبت بیشتر و شدت گردابه‌های منفی کمتر می‌شود. در $\alpha = 2$ جریان پایا شده است و ریزش گردابه‌ها مشاهده نمی‌شود. شکل (۷) کانتورهای ورتیسسته را برای $Re = 100$ و $\beta = 0.3$ در سرعت‌های دورانی مختلف نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود

گردابه‌های هم علامت خود که توسط دیواره‌های کانال تشکیل شده‌اند، ترکیب می‌شوند. در شکل (۶) کانتورهای ورتیسسته برای $Re = 100$ و $\beta = 0.1$ در سرعت‌های دورانی مختلف نشان داده شده است. با افزایش سرعت دورانی گردابه‌های ریزش شده در حرکت خود به سمت پایین دست



شکل ۸- کانتورهای ورتیسسته در $Re = 100$ و $\beta = 0.5$ و سرعت‌های دورانی مختلف

۶- بررسی اختلاط دو نمونه با غلظت‌های مختلف

درون کانال با استفاده از استوانه دوار

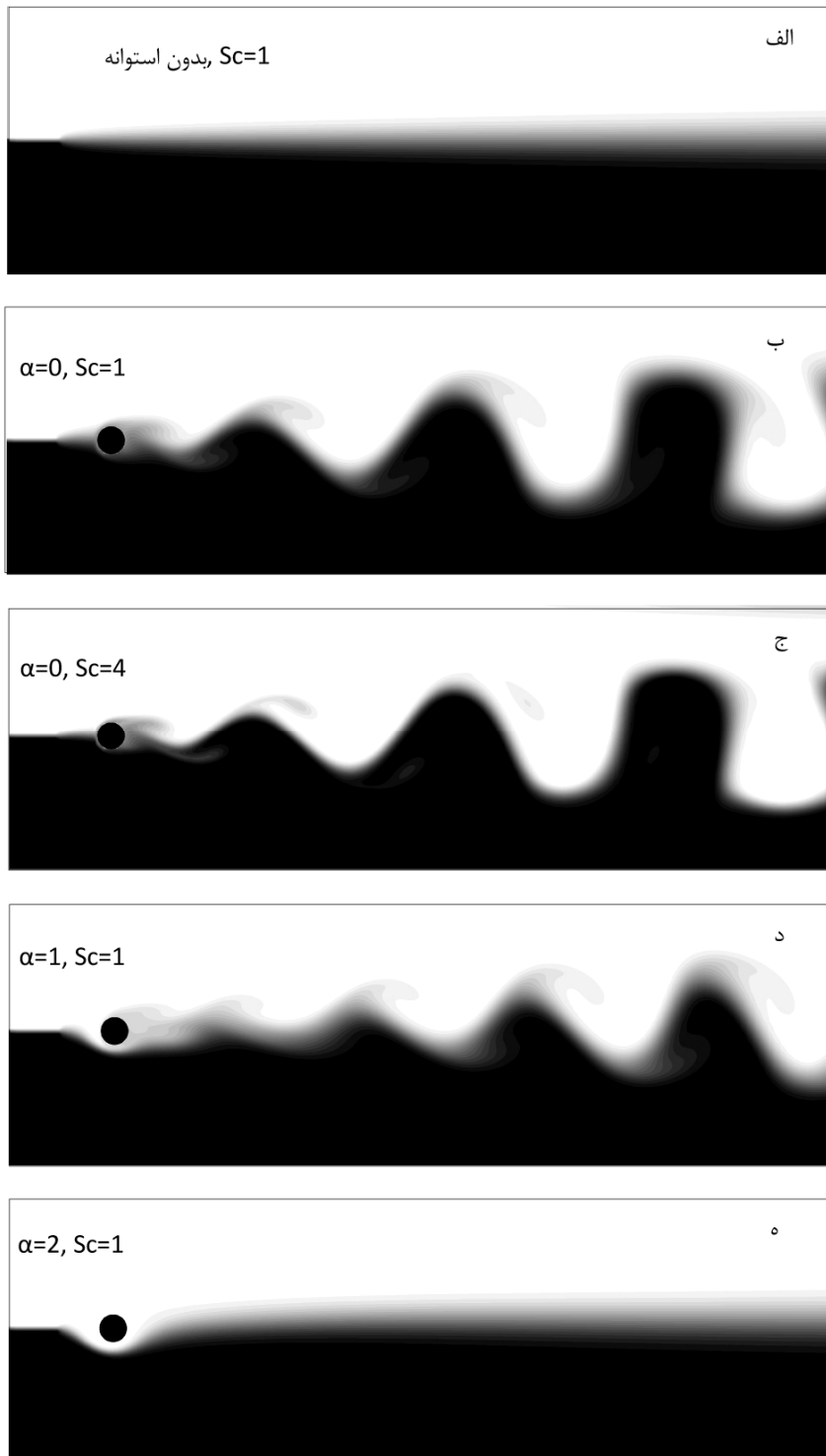
در این قسمت به بررسی اختلاط دو نمونه در جریان می‌پردازیم که با غلظت‌های مختلف وارد کانال می‌شوند و بعد از صفحه جداکننده با کمک استوانه با هم مخلوط می‌شوند. اختلاط نمونه‌هایی که به وسیله دو جریان آرام درون یک کانال مستقیم جابه‌جا می‌شوند، به پخش مولکولی در امتداد سطح مشترک نمونه‌ها در جهت عمود بر جریان بستگی دارد [۱۸]. اختلاط با به هم زدن و تکان دادن جریان‌های لایه‌ای آرام بیشتر می‌شود چرا که سطح مشترک نمونه‌ها کشیده می‌شود. ریزش گردابه در پشت استوانه به‌عنوان یک مکانیزم تکان دهنده مطرح می‌شود که قابلیت افزایش اختلاط نمونه‌های جابه‌جا شونده به وسیله جریان آرام درون کانال را دارد.

در شکل (۹) کانتورهای غلظت در $Re = 100$ و $\beta = 0.1$ برای چند حالت مختلف رسم شده‌اند. به دلیل آنکه امکان مقایسه بین حالتی که استوانه‌ای درون کانال قرار داده نشده با حالتی که استوانه درون کانال است، وجود داشته باشد، عدد رینولدز و نسبت انسداد در حالتی که استوانه‌ای درون کانال قرار داده نشده نیز با در نظر گرفتن قطر استوانه به‌عنوان طول مشخصه تعریف می‌شوند. در شکل (۹-الف) استوانه‌ای درون کانال قرار داده نشده و عدد اشمیت $Sc = 1$ است. عامل اختلاط پخش نمونه‌ها در امتداد سطح مشترکشان است. در شکل (۹-ب) استوانه ساکن درون کانال قرار داده شده و عدد اشمیت $Sc = 1$ است. پدیده ریزش گردابه‌ها در پشت استوانه روی می‌دهد که موجب اختلاط بیشتر نمونه‌ها درون کانال می‌شود. در شکل (۹-ج)

که با افزایش نسبت انسداد از $\beta = 0.1$ به $\beta = 0.3$ گردابه‌های ریزش شده از استوانه و گردابه‌های تشکیل شده توسط دیواره‌های کانال در فاصله کوتاهتری در پایین دست جریان با هم ترکیب می‌شوند. در $\alpha = 2$ جریان پایا شده است و ریزش گردابه‌ها مشاهده نمی‌شود.

شکل (۸) کانتورهای ورتیسسته را برای $Re = 100$ و $\beta = 0.5$ در سرعت‌های دورانی مختلف نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش نسبت انسداد از $\beta = 0.3$ به $\beta = 0.5$ گردابه‌های ریزش شده از استوانه و گردابه‌های تشکیل شده توسط دیواره‌های کانال باز هم در فاصله کوتاهتری در پایین دست جریان ترکیب می‌شوند، در نتیجه می‌توان گفت با افزایش نسبت انسداد پخش^{۱۵} گردابه‌ها افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که در $\alpha = 2$ جریان پایا شده است و ریزش گردابه‌ها قطع شده است.

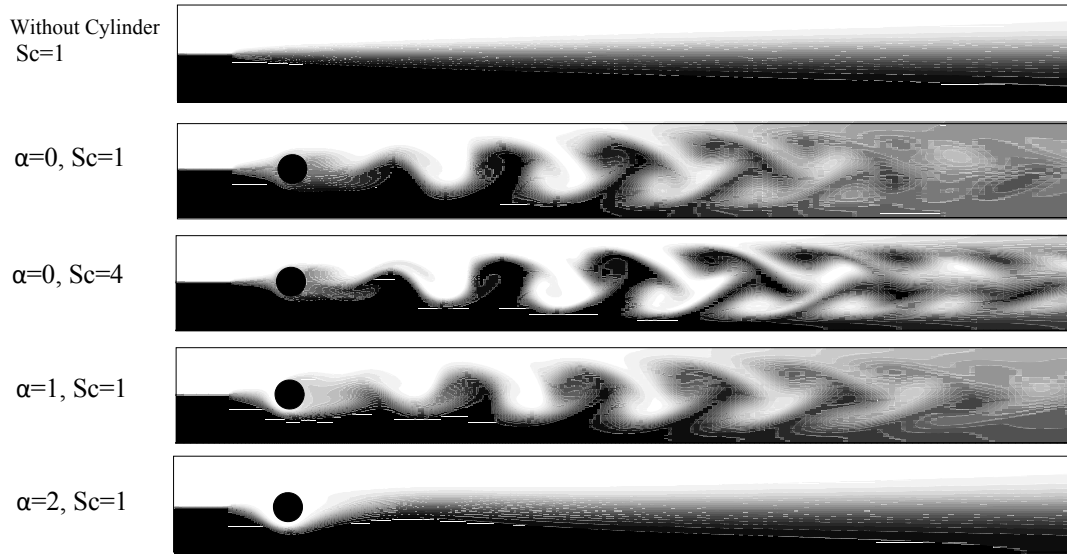
جریان در $Re = 10, 70$ ، به‌غیر از دو مورد $Re = 70, \beta = 0.1, \alpha = 0, 1$ در بقیه موارد پایا است و ریزش گردابه فقط برای این موارد مشاهده می‌شود (کانتورهای ورتیسسته نشان داده نشده است). با افزایش نسبت انسداد گردابه‌های تشکیل شده توسط دیواره و استوانه هر دو قویتر می‌شوند و از طرفی گردابه‌های تشکیل شده توسط استوانه در فاصله کوتاهتری در پایین دست جریان محو می‌شود. همچنین نتایج نشان می‌دهد با افزایش عدد رینولدز گردابه‌های تشکیل شده توسط استوانه در فاصله بیشتری در پایین دست جریان باقی می‌مانند.



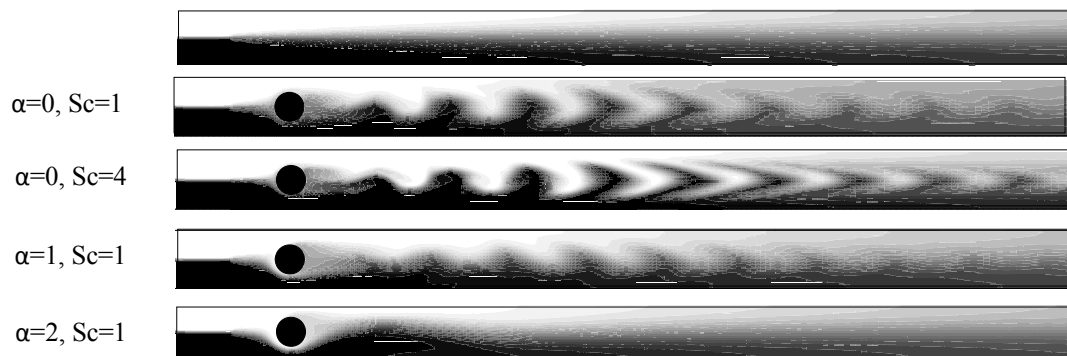
شکل ۹- کانتورهای غلظت در $Re = 100$ و $\beta = 0.1$

مورد قبل شکل (۹-ب) در پشت استوانه روی می‌دهد زیرا که پدیده ریزش گردابه‌ها مستقل از عدد اشمیت است ولی

استوانه ساکن ($\alpha = 0$) درون کانال قرار داده شده و عدد اشمیت $Sc = 4$ است. پدیده ریزش گردابه‌ها با همان کیفیت



شکل ۱۰- کانتورهای غلظت در $Re = 100$ و $\beta = 0.3$



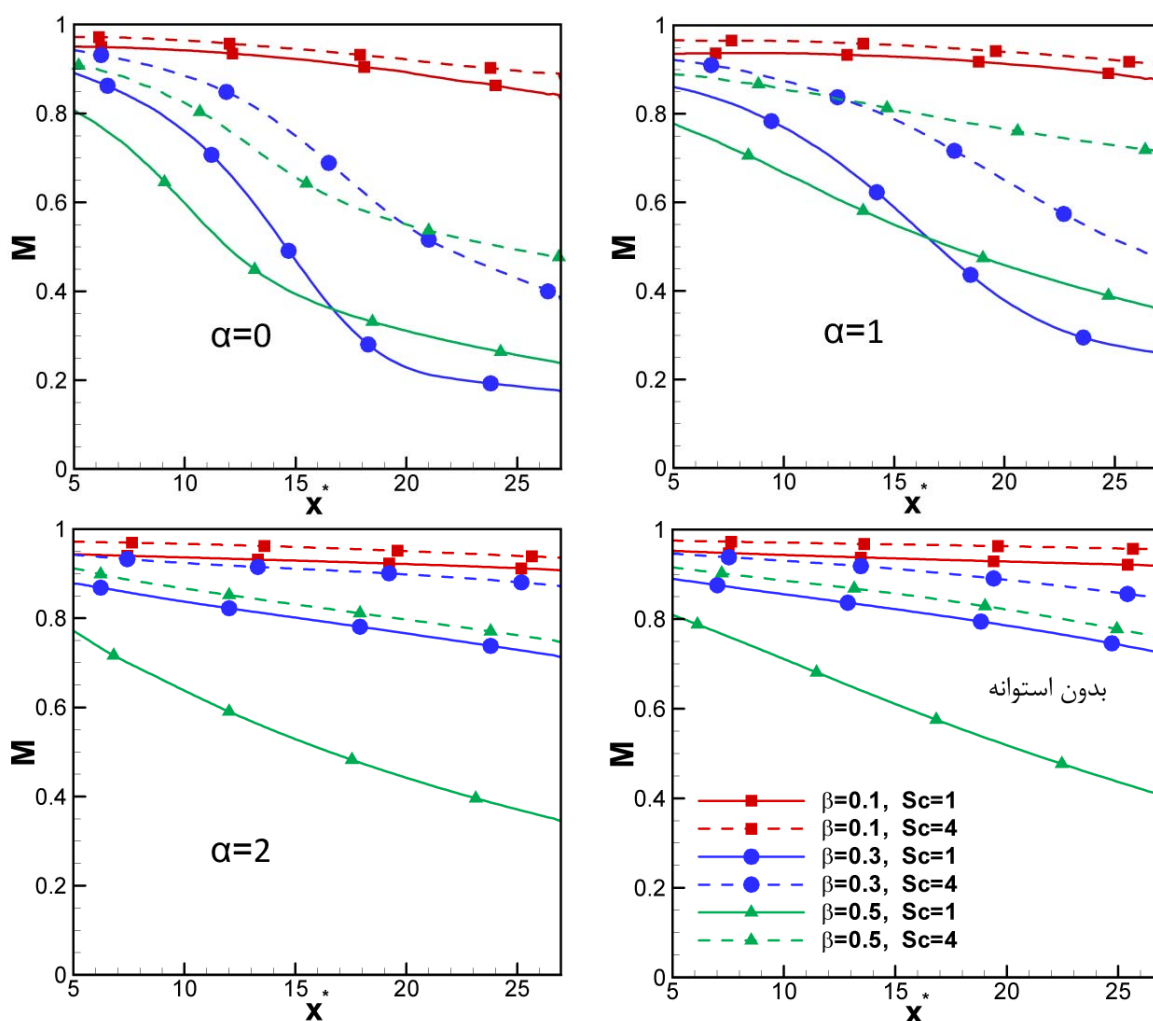
شکل ۱۱- کانتورهای غلظت در $Re = 100$ و $\beta = 0.5$

نمونه‌ها درون کانال در مقایسه با شکل (۹-ب) و (۹-د) کمتر است.

شکل‌های (۱۰) و (۱۱) کانتورهای غلظت در $Re = 100$ را به ترتیب برای نسبت‌های انسداد $\beta = 0.3$ و $\beta = 0.5$ در چند حالت مختلف نشان می‌دهند. تمام مطالب گفته شده در مورد نسبت انسداد $\beta = 0.1$ (شکل ۹) در مورد این نسبت‌های انسداد نیز صدق می‌کند. همچنین با مقایسه شکل‌های (۹)، (۱۰) و (۱۱) مشاهده می‌شود که افزایش نسبت انسداد موجب اختلاط بیشتر نمونه‌ها درون کانال می‌شود، به این دلیل با افزایش نسبت انسداد، پخش و نفوذ جرمی نمونه‌ها درون کانال افزایش می‌یابد.

همان‌طور که در بخش پارامترهای بدون بعد گفته شد،

به واسطه افزایش عدد اشمیت، پخش و نفوذ جرمی نمونه‌ها کاهش می‌یابد و در نتیجه اختلاط کمتر نمونه‌ها درون کانال مشاهده می‌شود. در شکل (۹-د) استوانه محبوس درون کانال با سرعت دورانی بدون بعد $\alpha = 1$ دوران می‌کند و عدد اشمیت $Sc = 1$ است، همچنان ریزش گردابه‌ها در پشت استوانه مشاهده می‌شود ولی به دلیل دوران استوانه، شدت ریزش گردابه‌ها در پشت استوانه کاهش می‌یابد و اختلاط نمونه‌ها درون کانال در مقایسه با شکل (۹-ب) کمتر می‌شود. در شکل (۹-ه) استوانه قرار داده شده درون کانال با سرعت دورانی بدون بعد $\alpha = 2$ دوران می‌کند و عدد اشمیت $Sc = 1$ است، در این مورد به واسطه افزایش سرعت دورانی استوانه ریزش گردابه‌ها در پشت استوانه قطع شده و اختلاط

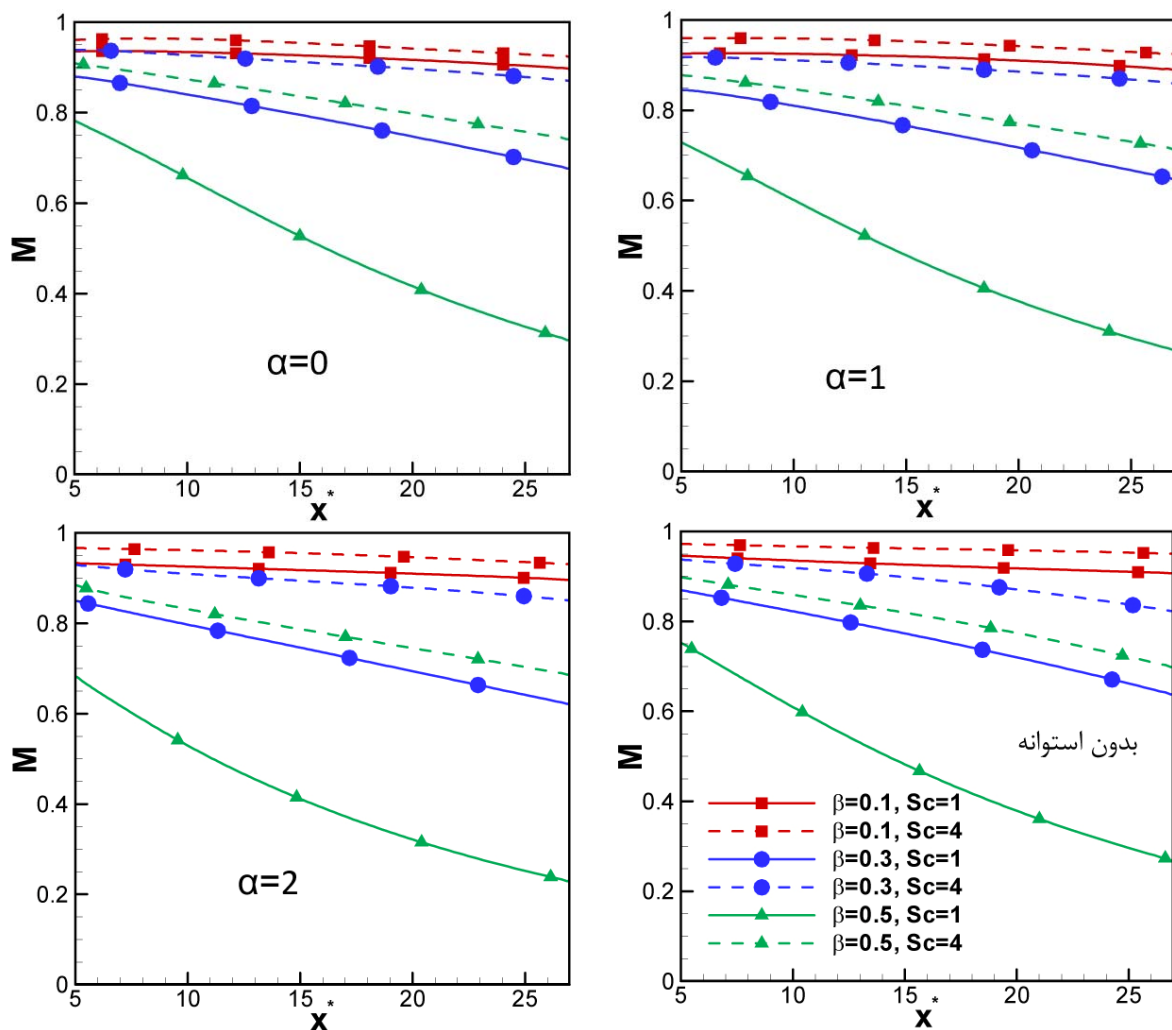


شکل ۱۲- شاخص اختلاط در طول کانال برای $Re=100$ و $Sc=1,4$ و نسبت‌های انسداد مختلف

سرعت دورانی و افزایش عدد اشمیت زیاد و با افزایش نسبت انسداد کم می‌شود. تنها استثنا در $\alpha=0,1$ است که با افزایش نسبت انسداد از $\beta=0.3$ به $\beta=0.5$ شاخص اختلاط در نزدیکی خروجی کانال بیشتر می‌شود که این به دلیل تضعیف ریزش گردابه‌ها با افزایش نسبت انسداد از $\beta=0.3$ به $\beta=0.5$ است. شاخص اختلاط در حالتی که استوانه‌ای درون کانال قرار ندارد از بقیه حالات بیشتر است و این مطلب نشان می‌دهد که در $Re=100$ قرارگیری استوانه درون کانال موجب بهتر شدن اختلاط نمونه‌ها می‌شود.

شکل (۱۳) تغییرات شاخص اختلاط در طول کانال برای عدد رینولدز $Re=70$ و اعداد اشمیت $Sc=1,4$ در

برای آنکه بتوان اختلاط نمونه‌ها در طول کانال را به صورت کمی بیان کرد شاخص اختلاط (M) در طول کانال معرفی شد. شاخص اختلاط از صفر تا ۱ تغییر می‌کند. هنگامیکه شاخص اختلاط در یک مقطع کانال برابر ۱ باشد، یعنی هیچ اختلاطی صورت نگرفته است و وقتی شاخص اختلاط برابر صفر باشد، یعنی دو نمونه به طور کامل با هم مخلوط شده و در همه جای مقطع مورد نظر غلظت بدون بعد سیال عبوری ۰/۵ است. شکل (۱۲) تغییرات شاخص اختلاط در طول کانال را برای عدد رینولدز $Re=100$ و اعداد اشمیت $Sc=1,4$ در سرعت‌های دورانی و نسبت‌های انسداد مختلف نشان می‌دهد. مشخص است که شاخص اختلاط در نزدیکی خروجی کانال با افزایش

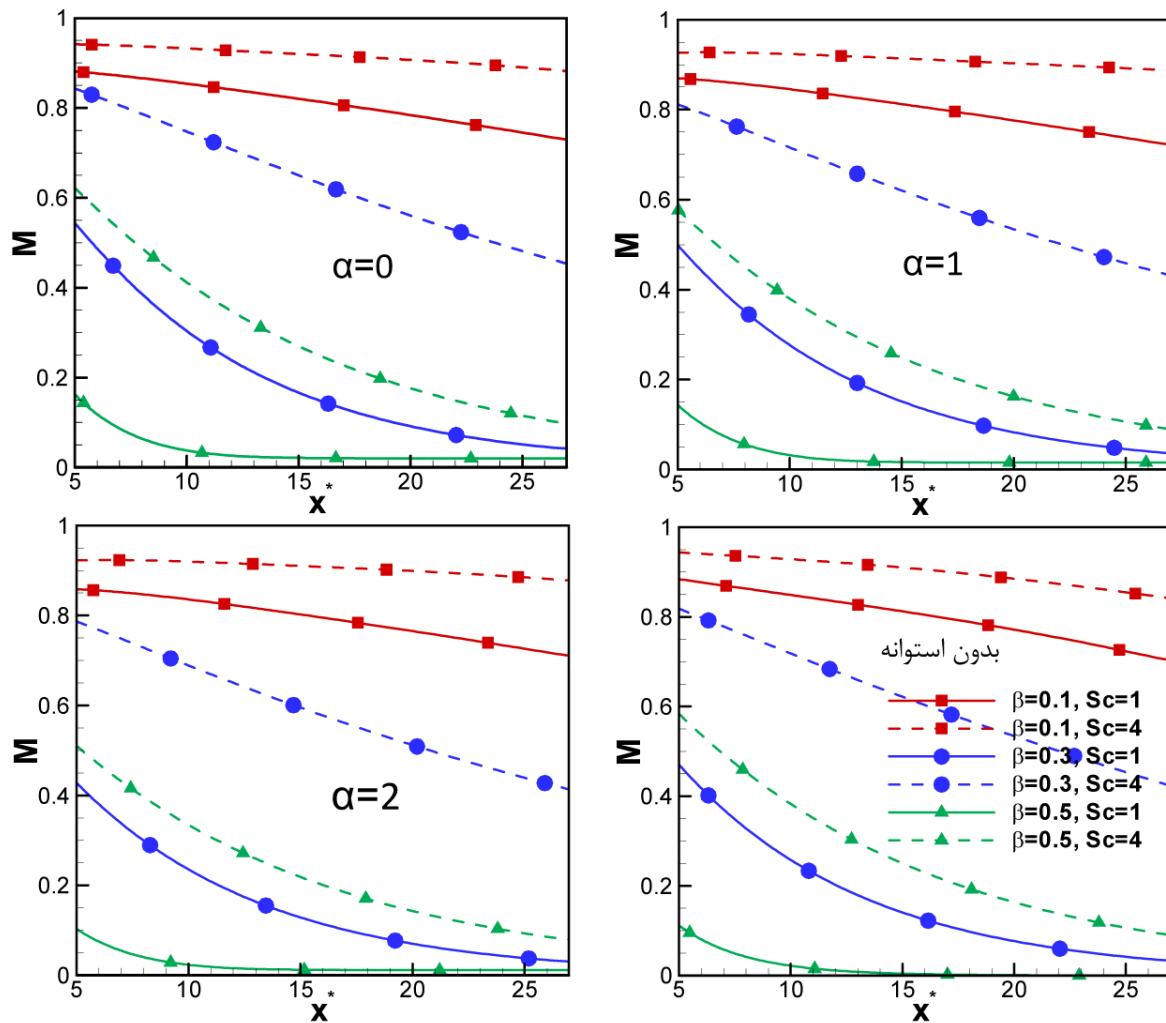


شکل ۱۳- شاخص اختلاط در طول کانال برای $Re=70$ و $Sc=1.4$ و سرعت‌های دورانی و نسبت‌های انسداد مختلف

کانال قرار نگرفته ندارد. شاخص اختلاط در نزدیکی خروجی کانال با افزایش عدد اشمیت زیاد و با افزایش نسبت انسداد کم می‌شود. در مجموع می‌توان گفت در عدد رینولدز $Re=70$ قرار گیری استوانه درون کانال و دوران استوانه تأثیر چندانی روی کیفیت اختلاط نمونه‌ها ندارد.

شکل (۱۴) تغییرات شاخص اختلاط در طول کانال را برای عدد رینولدز $Re=10$ و اعداد اشمیت $Sc=1,4$ در سرعت‌های دورانی و نسبت‌های انسداد مختلف نشان می‌دهد. از روی شکل می‌توان فهمید که شاخص اختلاط در نزدیکی خروجی کانال با افزایش عدد اشمیت زیاد و با افزایش نسبت انسداد کم می‌شود. همچنین شاخص اختلاط در نزدیکی

سرعت‌های دورانی و نسبت‌های انسداد مختلف را نشان می‌دهد. برای $\beta=0.1$ شاخص اختلاط در نزدیکی خروجی کانال با تغییر سرعت دورانی تغییر چندانی نمی‌کند ولی مقدار آن در سرعت‌های دورانی مختلف نسبت به حالتی که استوانه‌ای درون کانال قرار ندارد، به میزان ناچیزی کمتر است. در $\beta=0.3$ و $\beta=0.5$ با افزایش سرعت دورانی کاهش ناچیز شاخص اختلاط در نزدیکی خروجی کانال مشاهده می‌شود و این مطلب نشان می‌دهد که در جریان پایا که ریزش گردابه‌ها در پشت استوانه وجود ندارد، دوران استوانه موجب اختلاط بهتر نمونه‌ها درون کانال می‌شود، همچنین شاخص اختلاط در نزدیکی خروجی کانال تفاوت چندانی با حالتی که استوانه‌ای درون



شکل ۱۴- شاخص اختلاط در طول کانال برای $Re=10$ و $Sc=1,4$ و سرعت‌های دورانی و نسبت‌های انسداد مختلف

با افزایش عدد رینولدز افزایش می‌یابد و به عبارتی با افزایش عدد رینولدز، اختلاط نمونه‌های درون کانال کمتر می‌شود. این افزایش شاخص اختلاط به خصوص با افزایش عدد رینولدز از 10 به 70 قابل توجه است. از طرفی جریان در $Re=100$ و $\alpha=0.1$ در همه نسبت‌های انسداد مورد بررسی ناپایا است و ریزش گردابه در پشت استوانه مشاهده می‌شود. در سرعت‌های دورانی بدون بعد $\alpha=0.1$ شاخص اختلاط در طول کانال در $Re=100$ در مقایسه با $Re=70$ کمتر می‌باشد (تنها استثنا این قاعده $\alpha=1$ و $\beta=0.5$ است). در $Re=70$ و $\alpha=0.1$ جریان تنها در نسبت انسداد $\beta=0.1$ ناپایا است که در این حالت هم شدت ریزش گردابه‌ها در پشت استوانه در مقایسه با $Re=100$

خروجی کانال با افزایش سرعت دورانی به میزان ناچیزی کم می‌شود و به عبارتی افزایش سرعت دورانی موجب بهتر شدن اختلاط نمونه‌ها درون کانال می‌شود. با توجه به شکل می‌توان گفت در عدد رینولدز $Re=10$ قرارگیری استوانه درون کانال تأثیر چندانی روی کیفیت اختلاط نمونه‌ها ندارد.

در جدول ۳ مقادیر شاخص اختلاط در خروجی کانال برای حالات مختلف آورده شده است. در همه اعداد رینولدز مورد بررسی، جریان در حالتی که استوانه‌ای درون کانال قرار ندارد و همچنین حالتی که استوانه دوار با سرعت دورانی بدون بعد $\alpha=2$ درون کانال قرار گرفته، در همه نسبت‌های انسداد مورد بررسی پایا است. در این موارد شاخص اختلاط در طول کانال

جدول ۳- مقادیر شاخص اختلاط در خروجی کانال

$\beta=0.1$		$\alpha=0$	$\alpha=1$	$\alpha=2$	Without Cylinder
Re=10	Sc=1	۰/۷۳	۰/۷۲	۰/۷۱	۰/۷۰
	Sc=4	۰/۸۸	۰/۸۹	۰/۸۷	۰/۸۴
Re=70	Sc=1	۰/۹۰	۰/۸۸	۰/۸۹	۰/۹۱
	Sc=4	۰/۹۲	۰/۹۱	۰/۹۳	۰/۹۵
Re=100	Sc=1	۰/۸۳	۰/۸۶	۰/۹۱	۰/۹۲
	Sc=4	۰/۸۷	۰/۹۰	۰/۹۴	۰/۹۶
$\beta=0.3$		$\alpha=0$	$\alpha=1$	$\alpha=2$	Without Cylinder
Re=10	Sc=1	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۰۳
	Sc=4	۰/۴۶	۰/۴۳	۰/۴۲	۰/۰۴
Re=70	Sc=1	۰/۶۷	۰/۶۵	۰/۶۲	۰/۶۴
	Sc=4	۰/۸۷	۰/۸۶	۰/۸۵	۰/۸۲
Re=100	Sc=1	۰/۱۷	۰/۲۶	۰/۷۲	۰/۷۳
	Sc=4	۰/۳۸	۰/۴۷	۰/۸۷	۰/۸۵
$\beta=0.5$		$\alpha=0$	$\alpha=1$	$\alpha=2$	Without Cylinder
Re=10	Sc=1	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۰
	Sc=4	۰/۱۰	۰/۰۹	۰/۰۸	۰/۰۹
Re=70	Sc=1	۰/۳۰	۰/۲۷	۰/۲۳	۰/۲۷
	Sc=4	۰/۷۴	۰/۷۱	۰/۶۹	۰/۷۰
Re=100	Sc=1	۰/۲۴	۰/۳۶	۰/۳۵	۰/۴۱
	Sc=4	۰/۴۷	۰/۷۱	۰/۷۵	۰/۷۶

استوانه است و از طرفی پدیده ریزش گردابه‌ها در پشت استوانه درمیزان اختلاط نمونه‌ها مؤثر است، در نتیجه ترجیح داده شد که مقایسه‌ها بر مبنای اعداد رینولدز و اشمیت انجام شوند.

۷- نتیجه گیری

در مطالعه حاضر به بررسی ویژگی‌های هیدرودینامیکی جریان و اختلاط دو نمونه با غلظت‌های مختلف که به وسیله دو جریان آرام جابه‌جا می‌شوند و پس از عبور از روی صفحه جداکننده‌ای که در ورودی کانال قرار دارد از روی یک استوانه محبوس درون کانال عبور می‌کنند، پرداخته شده است. مطالعه به صورت عددی و با استفاده از روش برهم نهادن شبکه‌ها انجام

کمتر می‌باشد. در $Re=10$ شاخص اختلاط در طول کانال به غیر از یک مورد ($Re=100, \alpha=0, \beta=0.3, Sc=4$) در همه سرعت‌های دورانی و نسبت‌های انسداد در مقایسه با $Re=70, 100$ بیشتر است که به دلیل پخش و نفوذ جرمی بالای نمونه‌ها در این حالت است.

پخش جرمی نمونه‌ها درون کانال به عدد پکلت (حاصلضرب عدد رینولدز در عدد اشمیت) مربوط می‌شود که هر چقدر این عدد کمتر باشد، پخش و نفوذ جرمی نمونه‌ها بیشتر می‌شود. برای مقایسه مقادیر شاخص اختلاط می‌توان از عدد پکلت نیز استفاده کرد، البته با توجه به اینکه شروع یا قطع ریزش گردابه‌ها مستقل از عدد اشمیت و وابسته به عدد رینولدز، نسبت انسداد کانال و سرعت دورانی

برای گردابه‌های ریزش شده از استوانه حرکت ضربدری مشاهده می‌شود، گردابه‌های ریزش شده از بالا و پایین استوانه همزمان با حرکت در پایین دست جریان در پشت استوانه به ترتیب به طرف دیواره‌های پایینی و بالایی کانال حرکت می‌کنند و در آنجا با گردابه‌های هم علامت خود که توسط دیواره‌های کانال تشکیل شده‌اند، ترکیب می‌شوند.

اختلاط نمونه‌های با غلظت مختلف درون کانال با افزایش نسبت انسداد، بیشتر و با افزایش عدد اشمیت، کمتر می‌شود. در اعداد رینولدز مختلف، تأثیر دوران استوانه روی کیفیت اختلاط نمونه‌ها متفاوت بود. به‌طور کلی افزایش عدد رینولدز موجب کاهش پخش و نفوذ جرمی نمونه‌ها می‌شود ولی در $Re = 100, \alpha = 0,1$ پدیده ریزش گردابه‌ها در پشت استوانه مشاهده می‌شود که موجب بهبود اختلاط نمونه‌ها درون کانال می‌شود. مقایسه نتایج به دست آمده برای شاخص اختلاط در نزدیکی خروجی کانال نشان داد که تنها در $Re = 100$ قرار گرفتن استوانه درون کانال موجب افزایش قابل توجه اختلاط در مقایسه با حالتی که استوانه‌ای درون کانال قرار داده نشده، می‌شود.

گرفته است. شبیه‌سازی‌های عددی در اعداد رینولدز $Re = 10, 70, 100$ ، سرعت‌های دورانی بدون بعد $\alpha = 0, 1, 2$ ، نسبت‌های انسداد $\beta = 0.1, 0.3, 0.5$ و اعداد اشمیت $Sc = 1, 4$ انجام شده است.

در جریان ناپایای آزاد عبوری از روی استوانه، گردابه‌هایی با علامت مخالف یکدیگر بر روی سطوح بالایی و پایینی استوانه تشکیل می‌شوند و در پایین دست جریان به دنبال هم حرکت می‌کنند و الگویی تکراری از گردابه‌ها را پدید می‌آورند که به خیابان گردابه کارمن مشهور است. در جریان ناپایای عبوری از روی استوانه قرار داده شده درون کانال، لایه‌های برشی دیواره‌های کانال گردابه‌هایی را تشکیل می‌دهند که در اثر برهم‌کنش میان این گردابه‌ها و گردابه‌های ریزش شده در پشت استوانه ویژگی‌هایی متفاوت با جریان آزاد عبوری از روی استوانه مشاهده می‌شود. در این جریان گردابه‌های پادساعتگرد بر روی دیواره بالایی کانال و سطح پایینی استوانه تشکیل می‌شوند و در مقابل گردابه‌های ساعتگرد بر روی دیواره پایینی کانال و سطح بالایی استوانه تشکیل می‌شوند. البته گردابه‌هایی نیز به واسطه دیواره جداکننده‌ای که در ورودی کانال قرار داده شده تشکیل می‌شوند که موجب پایداری بیشتر جریان می‌شود.

واژه‌نامه

- | | | |
|----------------------------------|----------------|-----------------------|
| 1. Karman vortex street | 6. major grid | 11. twin-vortex |
| 2. fluent | 7. minor grid | 12. enveloping-vortex |
| 3. over set grids | 8. body fitted | 13. detached-vortex |
| 4. counter clock wise | 9. SIMPLEC | 14. wall-vortex |
| 5. convective boundary condition | 10. QUICK | 15. diffusion |

مراجع

- Williamson, C. H. K., "Vortex Dynamics in the Cylinder Wake", *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 28(1), pp. 477-539, 1996.
- Chen, J. H., Pritchard, W. G., and Tavener, S. J., "Bifurcation for Flow Past a Cylinder between Parallel Planes", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 284(5), pp. 23-41, 1995.
- Zovatto, L., and Pedrizzetti, G., "Flow About a Circular Cylinder between Parallel Walls", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 440(1), pp. 1-25, 2001.
- Khan, W. A., Culham, J. R., and Yovanovich, M. M., "Fluid Flow and Heat Transfer from a Cylinder between Parallel Planes", *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 18(3), pp. 395-403, 2004.
- Chakraborty, J. P., Verma, N., and Chhabra, R. P., "Wall Effects in Flow Past a Circular Cylinder in a Plane Channel: a Numerical Study", *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, Vol. 43(12), pp. 1529-1537, 2004.
- Cliffe, K. A., and Tavener, S. J., "The Effect of Cylinder Rotation and Blockage Ratio on the Onset of Periodic Flows", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 501, pp. 125-133, 2004.
- Mettu, S., Verma, N., and Chhabra, R. P.,

- “Momentum and Heat Transfer from an Asymmetrically Confined Circular Cylinder in a Plane Channel”, *Heat and Mass Transfer*, Vol. 42(11), pp. 1037-1048, 2006.
8. Bharti, R. P., Chhabra, R. P., and Eswaran, V., “Two-Dimensional Steady Poiseuille Flow of Power-Law Fluids Across a Circular Cylinder in a Plane Confined Channel: Wall Effects and Drag Coefficients”, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 46(11), pp. 3820-3840, 2007.
 9. Bharti, R. P., Chhabra, R. P., and Eswaran, V., “Effect of Blockage on Heat Transfer from a Cylinder to Power Law Liquids”, *Chemical Engineering Science*, Vol. 62(17), pp. 4729-4741, 2007.
 10. Rehim, F., Aloui, F., Ben Nasrallah, S., Doubiez, L., and Legrand, J., “Experimental Investigation of a Confined Flow Downstream of a Circular Cylinder Centred Between two Parallel Walls”, *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 24(6), pp. 855-882, 2008.
 11. Celik, B., Akdag, U., Gunes, S., and Beskok, A., “Flow Past an Oscillating Circular Cylinder in a Channel with an Upstream Splitter Plate”, *Physics of Fluids*, Vol. 20, pp. 103603, 2008.
 12. Celik, B., and Beskok, A., “Mixing Induced by a Transversely Oscillating Circular Cylinder in a Straight Channel”, *Physics of Fluids*, Vol. 21, pp. 073601, 2009.
 13. Singha, S., and Sinhamahapatra, K. P., “Flow Past a Circular Cylinder between Parallel Walls at Low Reynolds Numbers”, *Ocean Engineering*, Vol. 37(8), pp. 757-769, 2010.
 14. Prasad, K., Paramane, S. B., Agrawal, A., and Sharma, Atul., “Effect of Channel-Confinement and Rotation on the Two-Dimensional Laminar Flow and Heat Transfer across a Cylinder”, *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, Vol. 60(8), pp. 699-726, 2011.
 15. Nirschl, H., Dwyer, H. A., and Denk, V., “Three-Dimensional Calculations of the Simple Shear Flow Around a Single Particle between two Moving Walls”, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol 283, pp. 273-286, 1995.
 16. Tuncer, I. H., “Two-Dimensional Unsteady Navier-Stokes Solution Method,” *AIAA journal*, Vol 35(3), pp. 471-476, 1997.
 17. Leonard, B. P., “A Stable and Accurate Convective Modelling Procedure Based on Quadratic Upstream Interpolation”, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 19(1), pp. 59-98, 1979.
 18. Holden, A., Matthew A., Saurabh Kumar, Edward T. Castellana, A., Beskok, A., and Cremer, P. S., “Generating Fixed Concentration Arrays in a Microfluidic Device”, *Sensors and Actuators B: Chemical*, Vol. 92(1), pp. 199-207, 2003..