نشریه علمی - پژوهشی
روش های عددی در مهندسی

شبیه‌سازی عددی جریان آشفتهٔ کانال نیم‌موج با سطوح آبدوست و آبگریز

محمدرضا راستان* و احمد سوهانکار

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

(دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۱۰/۲۳ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۵/۰۴/۲۰)

چکیده– در بخش نخست، جریان دو بعدی کانال نیم‌موجی در عدد رینولدز $۱۰^۴$ و شرایط بدون لغزش (سطح آبدوست) توسط برخی مدل‌های آشفتگی عدد رینولدز پایین و همچنین مدل رینولدز بالای $k-\varepsilon$ شبیه‌سازی شده و مدل مناسب آشفتگی ($k-\omega$ ۱۹۹۸) معرفی شده است. سپس برای ارزیابی روش حل انتخاب شده و هماهنگی آن با شرط لغزش ناویر (سطح آبگریز)، شبیه‌سازی‌ها در جریان آشفته کانال ساده انجام گرفته و با نتایج سایر محققین مقایسه شده است. درنهایت با درنظر گرفتن مجدد جریان دو بعدی کانال نیم‌موج در عدد رینولدز $۱۰^۴$، شبیه‌سازی این جریان در مجاورت سطوح آبگریز با طول لغزش‌های مختلف انجام شده است. نتایج حاکی از توانایی قابل توجه این روش در کاهش نیروی پسا است به‌نحوی که به‌ازای طول لغزش ۲۰۰ میکرومتر کاهش نیروی پسای قابل توجه ۳۸ درصد به‌دست آمده است. به‌علاوه بررسی اثر طول لغزش روی کاهش نیروی پسا نشانگر آن است که با افزایش این پارامتر، نیروی پسای اصطکاکی و فشاری کاهش بیشتری می‌یابد. همچنین برای دست‌یابی به کاهش نیروی پسای قابل توجه در جریان آشفته، نیاز است تا مقدار طول لغزش بی‌بعد از مقدار حداقلی بزرگ‌تر باشد.

واژه‌های کلیدی: سطح آبدوست، سطح آبگریز، کانال نیم‌موج، مدل‌های آشفتگی.

Numerical Simulation of Turbulent Half-corrugated Channel Flow by Hydrophilic and Hydrophobic Surfaces

M. R. Rastan* and A. Sohankar

Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

Abstract: *In the first part of the present study, a two dimensional half-corrugated channel flow is simulated at Reynolds number of 10^4, in no-slip condition (hydrophilic surfaces) using various low Reynolds turbulence models as well as standard $k-\varepsilon$ model; and an appropriate turbulence model ($k-\omega$ 1998 model) is proposed. Then, in order to evaluate the*

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

proposed solution method in simulation of flow adjacent to hydrophobic surfaces, turbulent flow is simulated in simple channel and the results are compared with the literature. Finally, two dimensional half-corrugated channel flow at Reynolds number of 10^4 is simulated again in vicinity of hydrophobic surfaces for varoius slip lengths. The results show that this method is capable of drag reduction in such a way that an increase of 200 μm in slip length leads to a massive drag reduction up to 38%. In addition, to access a significant drag reduction in turbulent flows, the non-dimensionalized slip length should be larger than the minimum.

Keywords: ***Hydrophilic surface, Hydrophobic surface, Half-corrugated channel, Turbulence modeling.***

فهرست علائم

AM	ارتفاع بی‌بعد موج	$u_\circ$	سرعت لغزشی روی دیوار
H	نصف ارتفاع کانال موجدار	u_τ	سرعت اصطکاکی
k	انرژی جنبشی آشفتگی	y^+	فاصلهٔ بی‌بعد از دیوار
k_s	ارتفاع زبری	β	گرادیان فشار بر مبنای نرخ جریان
L	طول کانال موجدار	ε	نرخ استهلاک انرژی آشفتگی
L_s	طول لغزش	υ	ویسکوزیته سینماتیکی
p	فشار استاتیکی	ρ	چگالی سیال
Pr	عدد پرانتل	$-\rho\overline{u_i'u_j'}$	تنش رینولدز
Re	عدد رینولدز	ω	نرخ استهلاک مخصوص انرژی آشفتگی
u_i	سرعت سیال	$\partial u/\partial y\|_w$	نرخ تغییر شکل سیال بر روی دیوار

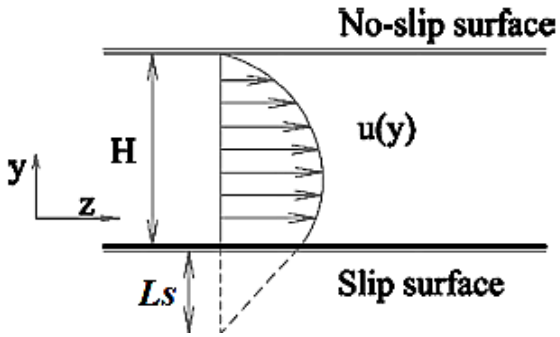
۱- مقدمه

دست‌یابی به اهداف مهندسی همچون کاهش نویز و آلودگی، توقف و یا تضعیف ریزش گردابه و یا کاهش نیروی پسا موجب شده است تا روش‌های متنوع کنترل جریان توسعه یابند. روش‌های کنترل جریان براساس انرژی ورودی مورد نیاز به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند: کنترل فعال و غیرفعال[۱].

روش‌های کنترل فعال به منبع انرژی خارجی نیاز دارند، مکش- دمش[۲] [۱ و ۲] و تزریق میکروحباب[۳] [۳] دو نمونه از این نوع کنترل هستند. در کنترل به‌روش غیرفعال نیازی به انرژی خارجی نبوده و عموماً با اصلاح هندسه این نوع کنترل صورت می‌گیرد. از انواع مختلف این دسته می‌توان به ریبلت[۴] [۴]، مولد گردابه[۵] [۵] و ایجاد سطوح موج دار [۶] اشاره کرد. تحقیقات مختلف نشان می‌دهند که روش‌های غیرفعال در به تعویق انداختن جدایش مؤثر هستند اما اغلب در جریان‌هایی که جدایش ندارند موجب پسای مضاعفی می‌شوند [۷].

این مطالعه از جوانب مختلف کنترل یک جریان، به کاهش نیروی پسای آن توجه دارد. از دیدگاه اقتصادی، استفاده از روش‌های کاهش نیروی پسا در جریان‌های آشفته مزیت‌های زیادی از جمله بهینه‌سازی مصرف سوخت، افزایش سرعت شناورها و کاهش افت فشار در لوله‌ها را دارد. در طی سال‌های سپری شده مطالعات بسیاری در این حوزه انجام شده است و روش‌های مختلفی توسعه پیدا کرده‌اند. بر مبنای نتایج تجربی استفاده از سطوح آبگریز راهی مناسب جهت کاهش نیروی پسا در بازه‌ای وسیع از اعداد رینولدز است. از طرفی این روش کنترل جریان حتی می‌تواند در جریان‌های بدون جدایش مفید باشد.

از آن جهت که بر سطوح آبگریز لغزش وجود دارد لذا به‌کارگیری شرط عدم لغزش برای مدل‌سازی اثر این سطوح بر



شکل ۱- پارامتر طول لغزش بر یک سطح آبگریز[۶] [۸]

جریان ممکن نیست. بنابراین اغلب مطالعات عددی جریان در مجاورت این سطوح از شرط ناویر[۷] استفاده می‌کنند. بر مبنای تئوری ناویر سرعت لغزشی به پارامتری میکروسکوپیک موسوم به طول لغزش[۸] و گرادیان سرعت ارتباط داده می‌شود (رابطه (۱)). چنانچه در شکل (۱) نشان داده شده است، طول لغزش (L_S) به‌صورت فاصلهٔ عمودی از سطحی که سرعت به‌صورت خطی بر آن صفر شود، تعریف می‌شود. طول لغزش تعیین کنندهٔ میزان آبگریزی سطح و به‌عبارت دیگر کاهش نیروی پسا است.

$$u_\circ = L_S \left.\frac{\partial u}{\partial y}\right|_w \qquad (۱)$$

با وجود اینکه بسیاری از محققان نشان دادند که طول لغزش (L_S) به نرخ تغییر شکل سیال بر دیوار ($\partial u/\partial y|_w$) وابسته است [۹]، اما در شبیه‌سازی‌های عددی عدم وابستگی آنها فرض می‌شود. این فرض برای نرخ تغییر شکل‌های متوسط قابل قبول است [۱۰ و ۱۱].

فوکاگاتا و همکاران به‌صورت تحلیلی به بررسی تأثیر شرط مرزی ناویر بر زیرلایه آرام و تغییر کل لایه مرزی جریان آشفته و درنهایت کاهش نیروی پسای اصطکاکی پرداختند [۱۲]. تحقیقات آنها نشان می‌دهد که کاهش نیروی پسای قابل توجهی از این روش در اعداد رینولدز اصطکاکی $Re = ۱۰^۵ - ۱۰^۶$ قابل دست‌یابی است. ترثوی و مینهارت [۱۳] برای اندازه‌گیری پروفیل سرعت در یک میکروکانال با سطوح آبگریز از μPIV استفاده کردند. آنها سرعت لغزش را مقدار تقریبی ۱۰ درصد سرعت جریان آزاد گزارش کردند. هاو و همکاران [۱۴] از پوشش یکسانی روی سطوح آبگریز استفاده کردند و به ۱۰ تا ۳۰ درصد افت فشار در میکروکانال صاف و زبر دست یافتند. آنها همچنین با استفاده از μPIV سرعت لغزشی روی دیوار را ۸ درصد سرعت مرکز کانال گزارش کردند. پنگ و همکاران نیز به بررسی تجربی کاهش پسا بر سطوح تخت و متقارن محوری با پوشش‌دهی سطح پرداختند. نتایج این آزمایش‌ها حاکی از کاهش پسا به مقدار ۸/۷۶ درصد در جریان‌های با رینولدز پایین است [۱۵].

در مطالعه‌ای به‌روش شبیه‌سازی مستقیم[۹] توسط مین و کیم تغییرات کاهش نیروی پسای اصطکاکی بررسی شده است. آنها شبیه‌سازی‌هایی را در جریان آشفته کانال با رینولدز اصطکاکی ۱۸۰ انجام داده و تأثیر اعمال طول لغزش‌های مختلف را در جهت جریان و در راستای عرضی آن بررسی کردند. افزایش مقدار طول لغزش وارده به جریان در راستای حرکت آن موجب کاهش تنش برشی دیوار می‌شود. از طرفی این افزایش در راستای عرضی منجر به افزایش تنش برشی دیوار می‌شود [۱۰]. یو و معین نیز شبیه‌سازی جریان حول سیلندر دایروی در دو عدد رینولدز ۳۰۰ و ۳۹۰۰ را به روش‌های مستقیم عددی و شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ انجام دادند [۱۶]. نتایج آنها حاکی از کاهش نیروی پسا در هر دو عدد رینولدز است.

نوری و همکاران [۱۱] نیز در شبیه‌سازی‌های خود به‌روش شبیه‌سازی گردابه‌هایی بزرگ، با به‌کارگیری طول لغزش‌های مختلف، توانایی سطوح آبگریز را در کاهش پسا مورد ارزیابی قرار دادند. آنها نتیجه گرفتند که برای دست‌یابی به کاهش

نیروی پسای قابل توجه از این روش نیاز است تا طول لغزش از حداقل مقداری بزرگ‌تر باشد. آنها همچنین به بررسی اثر طول لغزش روی ساختارهای جریان پرداخته و تضعیف آنها در مجاورت دیوار را تأیید کردند. در تحقیق دیگری از نوری و همکاران [۱۷]، اثر نرخ تنش بر کاهش نیروی پسا به‌روش آبگریزی سطح بررسی شده است. آنها شبیه‌سازی‌هایی را به‌روش گردابه‌های بزرگ و در اعداد رینولدز اصطکاکی ۱۸۰، ۳۹۵ و ۵۹۰ انجام داده و از طول لغزش‌های ۲ و ۱۰ میکرومتر برای شرط مرزی ناویر استفاده کردند. در این تحقیق کاهش نیروی پسا تا ۲۵ درصد گزارش شده و ساختارهای منسجم[۱۱] مجاور دیوار آبگریز تحلیل شده است. محققان در این تحقیق به توانایی بالای سطوح آبگریز در کاهش نیروی پسا اذعان کرده و بیان می‌کنند که این روش می‌تواند برای کاربردهای صنعتی که اعداد رینولدز و تنش‌های برشی بالایی را تجربه می‌کنند مورد استفاده قرار گیرد.

در تحقیقی عددی توسط جفز و همکاران [۱۸]، جریان آشفتهٔ کانال به‌روش متوسط‌گیری رینولدز از معادلات ناویر-استوکس[۱۲] شبیه‌سازی شده است. آنها برای اعمال شرایط آبگریزی سطح از روشی بر مبنای شبیه‌سازی هوای به دام افتاده روی سطح آبگریز و تعامل آن با آب استفاده کردند. در این تحقیق جهت بررسی اثر آبگریزی سطح، جریان آشفتهٔ کانال در اعداد رینولدز ۴×۱۰^{۳} تا $۱۰^{۴}$ و به‌وسیلهٔ مدل آشفتگی $k-\omega$ شبیه‌سازی و مطابقت مناسب نتایج با نتایج حاصل از حل به‌روش عددی مستقیم گزارش شده است. مطالعهٔ عددی دیگری نیز در سال ۲۰۱۳ توسط گرانسل و همکاران [۱۹] انجام شده است که به شبیه‌سازی جریان حول کرهٔ آبگریز شده پرداخته و کاهش ۱۹ درصدی نیروی پسا را گزارش می‌دهد. با افزایش عدد رینولدز تا ۱۰۰ مشاهده شده است که اثر آبگریزی بیشتر شده و کاهش نیروی پسای ۵۰ درصد نیز به‌دست آمده است. گرانسل و همکاران در این تحقیق از روشی مشابه با روش به‌کار رفته در تحقیق جفز و همکاران [۱۸] برای اعمال اثر آبگریزی استفاده کردند.

مرور تحقیقات پیشین نشان از آن دارد که مطالعات منتشر شدهٔ معدودی اثرات سطوح آبگریز را بر اجسام جریان‌بند و یا هندسه‌های صنعتی بررسی کرده‌اند. آن دسته از مطالعات انجام شده در این راستا، همچون تحقیق یو و معین [۱۶] یا گرانسل و همکاران [۱۹]، نیز بر اعداد رینولدز پایین معطوف است. علاوه بر این در اکثر تحقیقات عددی در این زمینه از روش عددی مستقیم [۱۰ و ۱۶] یا شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ [۱۱ و ۱۷] استفاده شده است. اما روش‌های مذکور، با توجه به امکانات سخت افزاری موجود کنونی، از بعد محاسباتی بسیار پرهزینه بوده و از این رو برای استفاده در شبیه‌سازی هندسه‌های صنعتی و بازه اعداد رینولدز بالا دارای محدودیت هستند. لذا برای غلبه بر این محدودیت همچنان استفاده از معادلات متوسط‌گیری شدهٔ رینولدز و مدل‌های آشفتگی ترجیح داده می‌شود. محدودیت‌های مدل‌های آشفتگی و عدم ارائهٔ مدلی جامع برای مسائل مختلف منجر به توسعهٔ مدل‌های متنوع آشفتگی شده است. اگرچه نقاط قوت و ضعفی برای هر یک از مدل‌ها می‌توان متصور بود اما همچنان تحقیق در مورد توانایی و کاستی‌های مدل‌های آشفتگی ادامه دارد.

از طرف دیگر تحقیقات زیادی بر هندسهٔ دیوار موجدار[۱۳] انجام شده است. از جنبهٔ کاربردی این نوع هندسه، با وجود سادگی ساخت، توانایی افزایش قابل ملاحظهٔ عملکرد مبدل‌های حرارتی را داراست. کانال مورد نظر می‌تواند هم به‌صورت کامل موجی و یا نصف موجدار استفاده شود. در هندسه کامل موجدار تمام طول کانال موجدار ساخته می‌شود این در حالی است که در هندسه نیم‌موجدار بخشی از طول کانال موجدار و بخش دیگر بدون انحنا خواهد بود.

تحقیق‌های عددی و تجربی فراوانی بر جریان آشفته کانال موجدار با ارتفاع‌های موج مختلف گزارش شده است [۲۰-۲۳]. در این راستا برای بیان ارتفاع موج به‌صورت بی‌بعد از علامت AM استفاده شده که به‌صورت اندازه ارتفاع موج به طول موج تعریف می‌شود. هودسن و همکاران [۲۰] اندازه‌گیری‌های وسیع روی مشخصات آشفتگی همچون

تنش‌های رینولدز، شدت و تولید آشفتگی روی کانال کاملاً موجدار انجام دادند. در کار آنها AM = ۰/۰۵ و عدد رینولدز ۶۷۶۰ انتخاب شد. چروکات و همکاران در سال ۱۹۹۸ شبیه‌سازی عددی جامعی را به‌روش شبیه‌سازی مستقیم برای جریان آشفته کانال با سطح موج سینوسی انجام دادند. در شبیه‌سازی آنها AM = ۰/۰۵ و عدد رینولدز ۳۴۵۰ استفاده شده است [۲۱].

تی‌سنگ و فرزیگر [۲۲] و همچنین چوی و سوزوکی [۲۳] نیز تحقیقات عددی و تجربی برای کانال موجدار انجام دادند. در هر دو مطالعهٔ ذکر شده تنها یک موج درنظر گرفته شده است. تعدادی از محققان مطالعات خود را به اثر ارتفاع موج معطوف کرده‌اند. از آن جمله می‌توان به‌کار دلیل و همکاران [۲۴] اشاره کرد. آنها شبیه‌سازی عددی جریان آشفته و انتقال حرارت جابه‌جایی روی دیوار موجدار را با استفاده از مدل $k-\varepsilon$ انجام دادند.

میرزایی و همکاران [۶] در سال ۲۰۱۳ با استفاده از روش‌های شبیه‌سازی عددی مستقیم و شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ به مطالعهٔ جریان آشفته و میدان حرارتی در کانال موجدار پرداختند. در این کار AM = ۰/۰۸ و دو عدد پرانتل ۰/۷۱ و ۳/۵ در عدد رینولدز $۱۰^۴$ درنظر گرفته شده است. توجه این مطالعه به رفتار جریان و لایه مرزی دمایی بوده است.

در کار دیگری از میرزایی و همکاران [۲۵] در سال ۲۰۱۴، جریان آشفته و انتقال حرارت روی کانال نیم‌موجی به‌روش گردابه‌های بزرگ بررسی شده است. هدف از مطالعهٔ آنها بررسی ارتفاع‌های مختلف و یافتن مقدار بهینهٔ این پارامتر بوده است به‌نحوی که بهترین عملکرد حرارتی و هیدرولیکی برای AM برابر با ۰/۱ گزارش شد. در این تحقیق عدد رینولدز $Re = ۱۰^۴$ و عدد پرانتل Pr = ۰/۷۱ درنظر گرفته شده است.

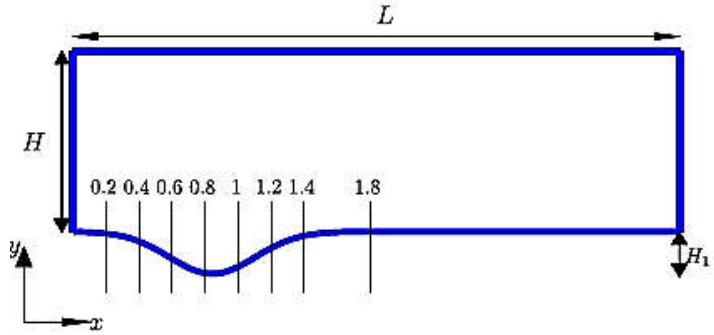
هدف از انجام تحقیق حاضر بررسی اثرات آبگریزی روی جریان دو بعدی کانال نیم‌موج در عدد رینولدز $۱۰^۴$ به‌روش متوسط‌گیری رینولدز است. جریان مورد نظر به‌علت وجود لایه مرزی، جدایش و بازچسبندگی مسئله‌ای مناسب برای ارزیابی توانایی روش متوسط‌گیری رینولدز در مجاورت سطوح آبگریز است. در بخش نخست از این مطالعه، جریان دو بعدی کانال نیم‌موج در شرایط بدون لغزش و با استفاده از مدل‌های آشفتگی رینولدز پایین شبیه‌سازی شده و مدل مناسب برای مراحل بعد انتخاب می‌شود. سپس در مرحلهٔ بعد با استفاده از مدل آشفتگی انتخاب شده و شرط مرزی ناویر، جریان آشفتهٔ کانال ساده شبیه‌سازی می‌شود. هدف بخش دوم ارزیابی روش عددی اتخاذ شده و هماهنگی آن با شرط لغزش است. در مرحلهٔ آخر تحقیق، مجدداً جریان دو بعدی کانال نیم‌موج درنظر گرفته شده و اثر اعمال شرط مرزی لغزش با طول لغزش‌های مختلف بر آن مطالعه می‌شود.

۲- هندسه، معادلات حاکم و جزئیات عددی

هندسه تحت بررسی این تحقیق مطابق با شکل (۲)، مشابه با هندسه بهینه شده (AM = ۰/۱) مرجع [۲۵] است با این تفاوت که مسئله به‌صورت دو بعدی در صفحه xy و به‌وسیله نرم‌افزار فلوئنت[۱۴] شبیه‌سازی شده است. چون هدف مرحلهٔ نخست مقایسه نتایج این تحقیق با نتایج مرجع [۲۵] است لذا ابعاد و شرایط مرزی مشابه با این مرجع انتخاب شده است. لازم به ذکر است هندسه مرجع [۲۵] به‌صورت سه بعدی است که در حل آن از روش شبیه‌سازی ادی‌های بزرگ استفاده شده است. همچنین در این مرجع برای ارزیابی نتایج عددی مقایسه‌ای با نتایج حاصل از روش شبیه‌سازی مستقیم انجام شده است.

شکل (۲) بخشی از یک کانال طویل است که شکل موج در آن تکرار می‌شود، از این‌رو با انتخاب یک المان از آن و استفاده از شرط مرزی پریودیک در مرزهای ورودی و خروجی شبیه‌سازی انجام شده است تا فیزیک مورد بحث به‌نحو صحیحی مدل شود. همچنین برای مرز بالایی میدان حل از شرط تقارن و مرز پایین از شرط عدم لغزش و یا لغزش ناویر (مطابق با رابطه (۱)) استفاده شده است.

جهت کاهش هزینهٔ محاسباتی مطابق مرجع [۲۵] نیمی از کانال مدل شده است که نصف ارتفاع کانال در شکل (۲) با



شکل ۲- شماتیک دو بعدی کانال نیم‌موج با تعیین مقاطع مختلف آن در جهت جریان [۲۵]

H نشان داده شده است. همچنین طول کانال برابر با $L = ۳/۶۸\,H$ است. همان‌گونه که ذکر شد از شکل بهینهٔ این هندسه که به‌صورت $AM = ۲H_۱/L = ۰/۱$ است، استفاده شده است. معادله موج دیوار پایین هندسه مطابق با رابطهٔ (۲) است:

$$y = -\left(AM.(L/۲)\right)\exp\left(-\left(۷x - x_۰\right)^۲ / ۲\delta^۲\right) \qquad (۲)$$

که $\delta = ۱/۸۲۱۹$ و $x_۰ = ۵/۹۰۷$ است. لازم به ذکر است که همهٔ ابعاد هندسی نسبت به H و سرعت‌ها نسبت به سرعت متوسط بی‌بعد شده‌اند. عدد رینولدز جریان بر مبنای نصف ارتفاع کانال و سرعت متوسط برابر با $Re_b = u_b H/\upsilon = ۱۰^۴$ است.

معادلات حاکم شامل معادله پیوستگی و معادلات ممنتم متوسط‌گیری شدهٔ رینولدز برای حالت دائم و غیرقابل تراکم با روابط (۳) و (۴) نشان داده شده‌اند:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = ۰ \qquad (۳)$$

$$\rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) - \rho\overline{u_i' u_j'}\right] + \beta\delta_{۱i} \qquad (۴)$$

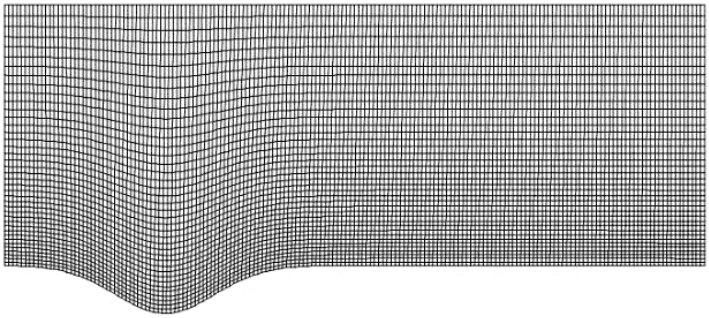
در روابط فوق کمیت‌های p, u_i و ρ به‌ترتیب سرعت، فشار و چگالی را نشان می‌دهند. به‌کارگیری شرط مرزی پریودیک برای سرعت در جهت جریان مستلزم آن است تا اصلاح ویژه‌ای در معادلات انجام شود. این اصلاح به‌وسیلهٔ آخرین جمله در رابطهٔ (۴) صورت می‌پذیرد. این جمله گرادیان فشاری است که به معادلات اضافه شده و دبی را ثابت نگه می‌دارد. جهت دست‌یابی به عدد رینولدز مورد نظر، β بر مبنای نرخ جریان در هر گام زمانی اصلاح می‌شود.

جملهٔ تنش رینولدز $(-\rho\overline{u_i' u_j'})$ در رابطهٔ (۴) بسته به مدل آشفتگی به‌کار گرفته شده به صورت متفاوتی مدل خواهد شد. در این تحقیق از مدل‌های آشفتگی رینولدز پایین استفاده شده و با مدل $k-\varepsilon$، نیز مقایسه شده است. لازم به ذکر است که مدل‌های آشفتگی رینولدز پایین به آن دسته از مدل‌های آشفتگی اطلاق می‌شود که تمهیدات لازم برای حل جریان آشفته در مجاورت دیوار، در روابط آنها لحاظ شده باشد. پس برای انجام حل‌هایی مناسب و همچنین عدم درگیری با توابع دیواره، به‌خصوص در زمان اعمال شرط لغزش، استفاده از مدل‌های رینولدز پایین ترجیح داده می‌شود. به عنوان شناخته شده‌ترین این مدل‌ها می‌توان از مدل‌های اسپالارت- آلماراس[۱۵]، تنش رینولدز در رینولدز پایین[۱۶] و $k-\omega$ نام برد. نسخهٔ اخیر از مدل $k-\omega$ که در سال ۲۰۰۶ توسط ویلکوکس ارائه شد، دارای جملاتی اضافه به نسبت نسخهٔ قبل‌تر از آن است. جملات جدید جهت بهبود نتایج این مدل در جریان‌هایی همچون جریان مافوق صوت و جریان برشی آزاد اضافه شده‌اند [۲۶].

چنانچه پیش‌تر بیان شد، برای حل معادلات (۳) و (۴) از کد تجاری حجم محدود فلوئنت استفاده شده است. اما برای گسسته‌سازی جمله‌های جابه‌جایی و دیفیوژن به‌ترتیب از الگوهای آپ‌ویند[۱۷] مرتبه دو و تفاضل مرکزی استفاده شده است. همچنین برای جداسازی سرعت و فشار از روش

جدول ۱- ضرایب نیروی پسا حاصل از شبکه‌های محاسباتی مختلف

شبکه	تعداد سلول‌های محاسباتی	ضریب نیروی پسای اصطکاکی ($\bar{C}_f \times 10^3$)
I	۱۲۰× ۴۰	۳/۰۳
II	۱۷۰× ۴۰	۳/۷۹
III	۱۲۰× ۶۰	۴/۲۹
IV	۱۷۰× ۸۰	۴/۴۵



شکل ۳- شبکه استفاده شده در حل مسئله

سیمپل[18] بهره گرفته شده است. برای بررسی استقلال شبکه در نتایج حاصل، شبکه‌های سازمان یافتهٔ متعددی به‌کار گرفته شد. در جدول (۱) مقدار متوسط ضریب نیروی پسای اصطکاکی به‌دست آمده از شبکه‌های مختلف نشان داده شده است. از آنجا که بیشینهٔ اختلاف نتایج به دست آمده از شبکه ۳ و شبکهٔ با تعداد نقاط بیشتر (شبکهٔ ۴) کمتر از ۴ درصد است لذا این شبکه برای ادامهٔ تحقیق مناسب تشخیص داده شد. شکل (۳) شبکهٔ منتخب برای حل مسئله را نشان می‌دهد.

۳- بررسی نتایج

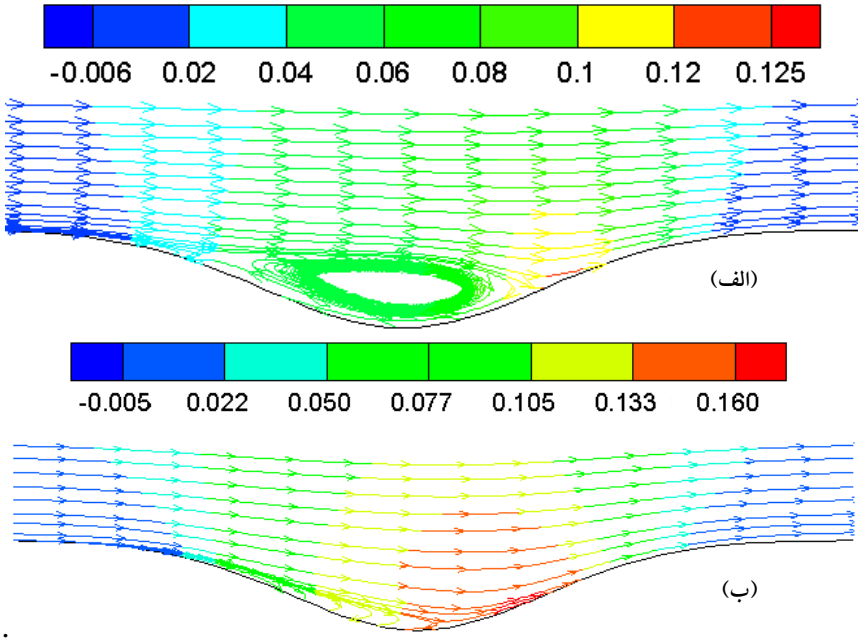
۳-۱- جریان آشفته کانال نیم‌موج در مجاورت سطح آبدوست[19] (بدون لغزش)

در این بخش نتایج حاصل از شبیه‌سازی جریان کانال نیم‌موج در مجاورت دیوار آبدوست (شرایط عدم لغزش) و با استفاده از مدل‌های مختلف آشفتگی ارائه شده است. برای مسئله حاضر میزان توانایی یک مدل آشفتگی نسبت به مدل دیگر، به توانایی بیشتر آن مدل در پیش‌بینی ناحیهٔ برگشت جریان وابسته است.

در شکل (۴) خطوط جریان به‌صورت مقایسه‌ای برای حل‌های به‌دست آمده از مدل $k-\omega$ ۱۹۹۸ و مدل $k-\varepsilon$ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که رنگ این خطوط جریان برحسب فشار آنها تنظیم شده است.

الگوی جریان پیش‌بینی شده از مدل $k-\omega$ ۱۹۹۸ مطابقت مناسبی با الگوی ارائه شده در مرجع [۲۵] (به‌روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ) دارد، در حالی که خطوط جریان به‌دست آمده از مدل $k-\varepsilon$ تطابق مناسبی ندارد. این مدل ناحیهٔ برگشت جریان را کوچک پیش‌بینی می‌کند لذا انتظار می‌رود سایر نتایج آن نیز مناسب نباشد. دیگر مدل‌های رینولدز پایین نیز همچون مدل $k-\omega$ ۱۹۹۸ الگوی جریان را به‌خوبی پیش‌بینی می‌کنند اما به‌ترتیب مطابقت با حل به‌روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ به‌صورت مدل $k-\omega$ ۲۰۰۶، تنش رینولدز- رینولدز پایین و اسپالارت- آلماراس هستند.

پارامترهای مهم در ارزیابی یک مدل آشفتگی در مسئله حاضر، توانایی پیش‌بینی صحیح محل‌های جدایش و بازچسبندگی (که معرف اندازه گردابه نیز هست) است.



شکل ۴- خطوط جریان رنگی شده با فشار در قسمت موجدار کانال، الف) مدل ۱۹۹۸ $k-\omega$، ب) مدل $k-\varepsilon$

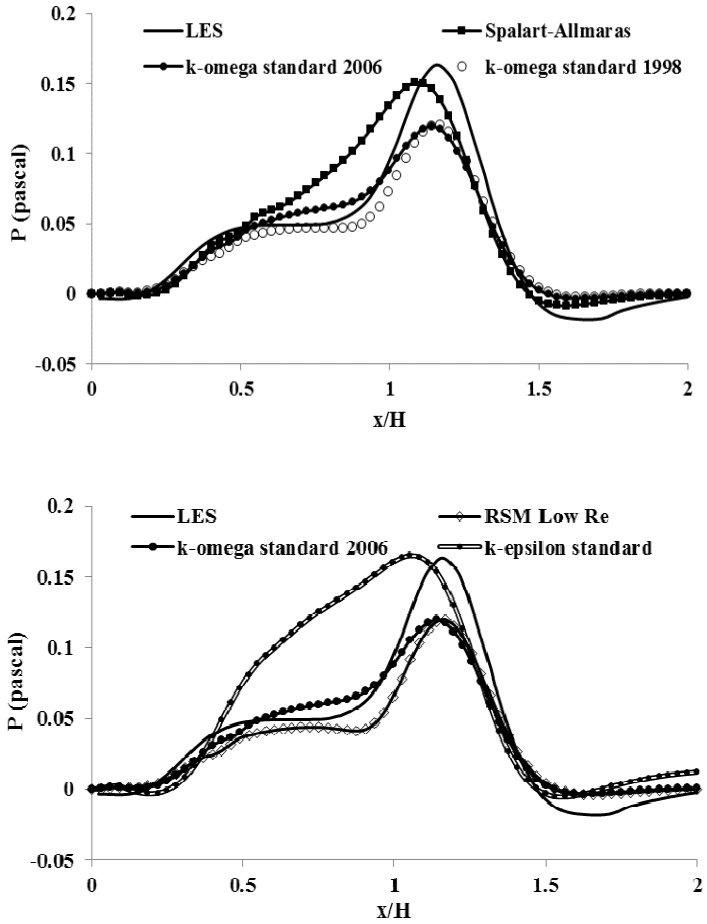
جدول ۲- موقعیت جدایش و بازچسبندگی و درصد اختلاف آنها با نتایج حل به‌روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ [۲۵]

مدل	نقطه جدایش (x/H)	خطا (٪)	نقطهٔ بازچسبندگی (x/H)	خطا (٪)
شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ	۰/۳۳۹	-	۱/۱۰۴	-
اسپالارت- آلماراس	۰/۴۶۱	۳۶	۰/۹۹۶	۹
تنش رینولدز	۰/۴۰۱	۱۸	۱/۱۱۱	۰/۶
$k-\omega$ ۱۹۹۸	۰/۴۰۱	۱۸	۱/۱۱۱	۰/۶
$k-\omega$ ۲۰۰۶	۰/۴۳۱	۲۷	۱/۰۸	۲
$k-\varepsilon$	۰/۶۰۴	۷۸	۰/۹۰۶	۱۸

جدول (۲) مقادیر نقاط پیش‌بینی شده از مدل‌های آشفتگی مورد استفاده در این تحقیق را در مقایسه با مرجع [۲۵] ارائه و خطای ناشی از هر یک را مشخص کرده است.

در شکل (۵) تغییرات فشار متوسط در ناحیهٔ موجدار دیوار، برای مدل‌های آشفتگی مختلف در مقایسه با نتایج شبیه‌سازی ادی‌های بزرگ مرجع [۲۵] ارائه شده است (به دلیل وضوح بیشتر و ایجاد امکان مقایسه، نمودارها در دو شکل ترسیم شده‌اند). در این شکل مشاهده می‌شود که همهٔ مدل‌های رینولدز پایین مقدار بیشینه را کم پیش‌بینی می‌کنند. اگرچه مدل $k-\varepsilon$ پیش‌بینی مناسب‌تری از بیشینه فشار متوسط را ارائه می‌کند اما در بیان روند کلی تغییرات نتایج ضعیفی را ارائه می‌دهد.

در شکل (۶) تغییرات ضریب پسای اصطکاکی در طول بخش موجدار دیوار، برای مدل‌های آشفتگی مختلف نشان داده شده و نتایج حاصله با نتایج شبیه‌سازی ادی‌های بزرگ مرجع [۲۵] مقایسه شده است (همانند شکل (۵)، در شکل (۶) نیز برای وضوح بیشتر از دو شکل استفاده شده است). نتایج حاکی از توانایی مدل‌های $k-\omega$ و تنش رینولدز در پیش‌بینی مناسب تغییرات ضریب پسای اصطکاکی است، همچنین ضعف

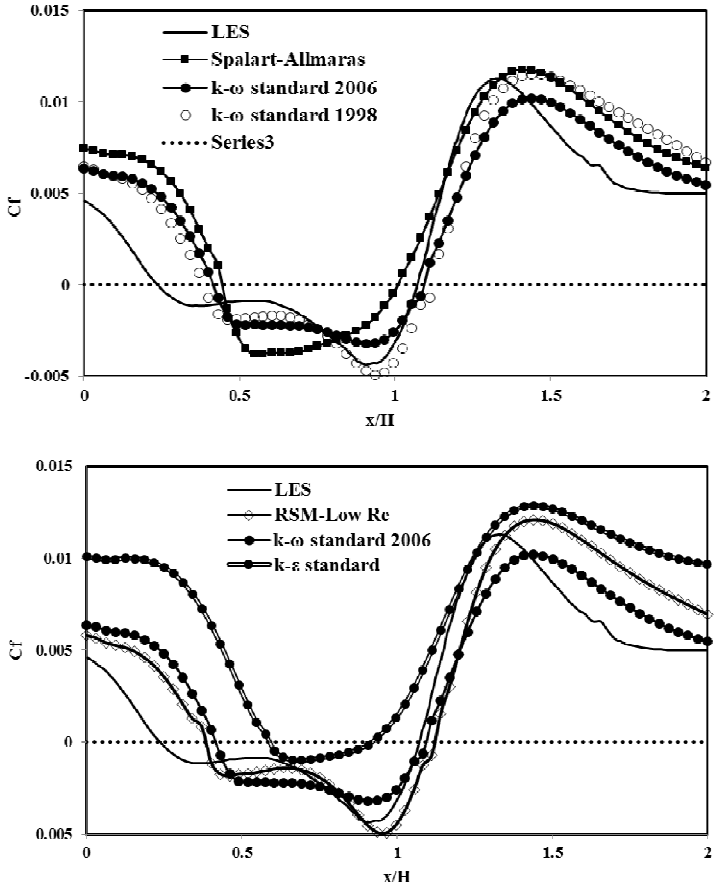


شکل ۵- توزیع فشار متوسط در قسمت موجدار کانال با مدل‌های آشفتگی متفاوت

مدل $k-\varepsilon$ در پیش‌بینی ناحیهٔ برگشتی جریان موجب پیش‌بینی نامناسب این کمیت شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که مدل اسپالارت- آلماراس با وجود پیش‌بینی بهتر بیشینهٔ فشار و ضریب پسا اصطکاکی، نقاط جدایش و بازچسبندگی را با خطای بیشتری پیش‌بینی می‌کند که علت آن عدم توانایی مدل در پیش‌بینی تغییرات ناگهانی است. پیش‌بینی مدل‌های $k-\omega$ و تنش رینولدز- رینولدز پایین برای کمیت‌های متوسط تا حدودی مشابه است. اما نتایج به‌دست آمده گویای آن است که جملات اضافه شده به مدل $k-\omega$ ۲۰۰۶ نقشی استهلاکی دارند، زیرا که مقادیر بیشینه و کمینهٔ ضریب پسای اصطکاکی پیش‌بینی شده از این نسخه به نسبت نسخهٔ قبل‌تر کاهش یافته است. از این‌رو برای مسئلهٔ حاضر مدل $k-\omega$ ۱۹۹۸ نسبت به مدل ۲۰۰۶ آن دارای مزیت است.

برای بررسی دقیق‌تر مدل لازم است تا جدا از کمیت‌های متوسط، سایر پارامترهای جریان از جمله توزیع سرعت نیز مقایسه شود. در شکل (۷) توزیع سرعت در دو مقطع (مطابق با شکل (۲)) نشان داده شده است. در هر دو شکل توزیع سرعت عمود بر دیوار با سرعت متوسط بی‌بعد شده است. همچنین y_w در شکل (۷) بیانگر فاصلهٔ عمودی بخش موجدار دیوار از بخش بدون انحنای کانال است. مشاهده می‌شود که توزیع سرعت به‌دست آمده از مدل تنش رینولدز- رینولدز پایین نامناسب است این در حالی است که کمیت‌های متوسط توسط این مدل تا حدی مناسب پیش‌بینی شده است.

با توجه به بررسی‌های انجام شده در این بخش می‌توان مشاهده کرد که مناسب‌ترین پیش‌بینی‌ها در بین مدل‌های مورد



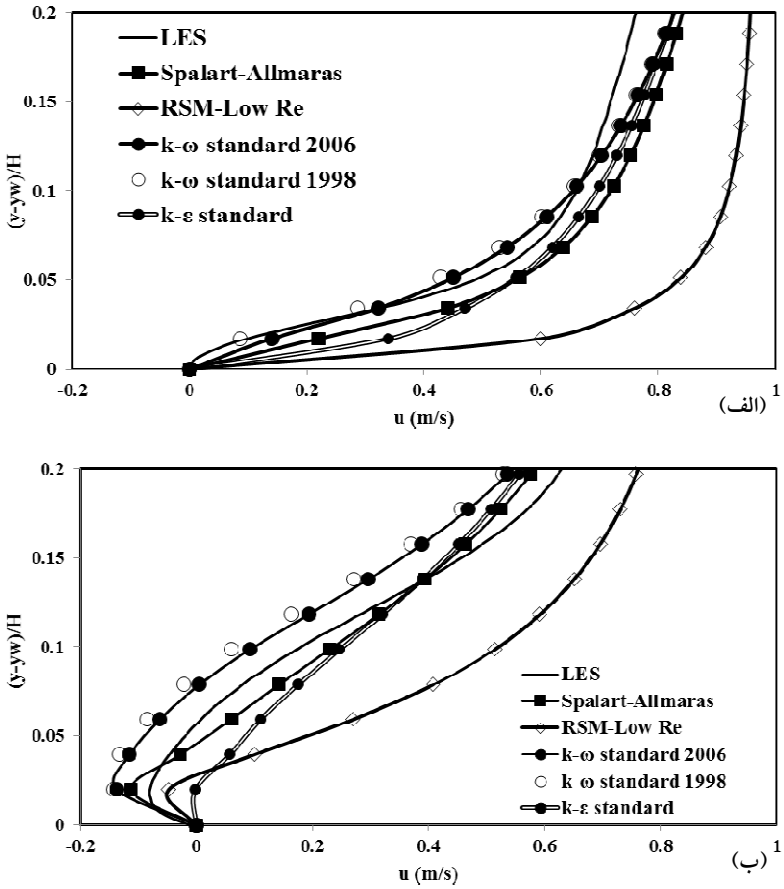
شکل ۶- تغییرات ضریب پسا اصطکاکی در قسمت موجدار کانال برای مدل‌های آشفتگی متفاوت

آزمایش متعلق به مدل $k-\omega$ ۱۹۹۸ است و پیش‌بینی نتایج برای هر دو نسخهٔ این مدل نزدیک به هم هستند. بنابر نتایج حاصل از این بخش، در بخش‌های بعد از مدل $k-\omega$ ۱۹۹۸ برای شبیه‌سازی استفاده شده است.

۳-۲- جریان آشفتهٔ کانال در مجاورت سطح آبگریز (لغزش)

چنانچه در بخش ۲ بیان شد، شبیه‌سازی‌ها به‌وسیلهٔ نرم‌افزار فلوئنت انجام شده است. شرط مرزی لغزش ناویر به این نرم‌افزار تجاری اضافه شده است و نیاز است تا برای ارزیابی روش حل اتخاذ شده و دقت برنامه نتایج حاصل از آن مورد بررسی قرار گیرد. برای نیل به این هدف، شبیه‌سازی جریان آشفتهٔ کانال ساده (بدون انحنا) انجام شده و نتایج با حل‌هایی به‌روش مستقیم عددی [۱۰] و شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ [۱۱] مقایسه شده است. محققان برای ارزیابی نتایج در مرجع [۱۰]، پروفیل سرعت متوسط و کمیت‌های آشفتگی را با حل‌های عددی پیشین به‌روش شبیه‌سازی مستقیم جریان در حالت عدم لغزش مقایسه کرده‌اند. همچنین نتایج حاصل از شبیه‌سازی به‌روش گردابه‌های بزرگ در مرجع [۱۱]، در حالت آبدوست و آبگریز با حل به‌روش شبیه‌سازی مستقیم مقایسه شده است.

ابعاد کانال دو بعدی شبیه‌سازی شده در این بخش به‌صورت $۴\pi\delta\times۲\delta$ است که δ نصف ارتفاع کانال را نشان می‌دهد. پس از بررسی استقلال نتایج از شبکه، شبکه‌ای متشکل از ۸۰×۱۰۰ در راستای جریان و عمود بر دیوار انتخاب شد. شبکهٔ مورد استفاده در جهت جریان یکنواخت است درحالی که در جهت عمود بر دیوارها غیریکنواخت است. غیریکنواختی اندازهٔ شبکه در جهت عمود بر دیوار به‌نحوی است که



شکل ۷- توزیع سرعت در راستای عمود بر دیوار، الف) $x/H = ۰/۴$ و ب) $x/H = ۰/۸$ (شکل (۲) نیز مشاهده شود)

کوچک‌ترین شبکه نزدیک دیوار است و فاصلهٔ اولین مرکز شبکه از دیوار برابر با $y^+ = yu_\tau/\upsilon \approx ۱/۴$ است.

مشابه با شبیه‌سازی مین و کیم [۱۰] به‌روش مستقیم عددی و شبیه‌سازی به‌روش گردابه‌های بزرگ توسط نوری و همکاران [۱۱]، در این تحقیق نیز عدد رینولدز بر مبنای نصف ارتفاع کانال و سرعت اصطکاکی برابر ۱۸۰ انتخاب شده است. در اعمال شرایط مرزی از شرط مرزی پریودیک در ورود و خروج و لغزش ناویر روی دیوارها استفاده شده است. روش عددی و گسسته‌سازی مورد استفاده در این بخش مطابق آنچه در بخش ۲ بیان شد، اعمال شده است.

با توجه به نتیجهٔ به‌دست آمده از بخش ۳-۱، در شبیه‌سازی جریان آشفتهٔ کانال از مدل آشفتگی $k-\omega$ ۱۹۹۸ استفاده شده است. در صورت استفاده از شبکهٔ به اندازهٔ کافی کوچک در مجاورت دیوار، کمیت‌های مرتبط با این مدل آشفتگی همچون سایر کمیت‌های جریان تا مجاورت دیوار حل می‌شوند. به‌عبارت دیگر، در زمان استفاده از شبکه‌ای مشابه با شبکهٔ به‌کار رفته در این تحقیق، کمیت‌های انرژی جنبشی آشفتگی (k) و نرخ استهلاک مخصوص (ω) با استفاده از شرایط مرزی مناسب تا مجاورت دیوار حل می‌شوند [۲۶ و ۲۷]. از این‌رو استفاده از مدل آشفتگی رینولدز پایین موجب می‌شود تا از به‌کارگیری توابع دیواره (که عموماً مناسب برای دیوارهای آبدوست هستند) پرهیز شود. شرایط مرزی مورد استفاده برای کمیت‌های آشفتگی بر سطح (آبدوست و آبگریز) مشابه با تحقیق جفز و همکاران [۱۸] انتخاب شده است، به‌نحوی که انرژی جنبشی آشفتگی برابر با صفر ($k = ۰$) و نرخ استهلاک مخصوص مطابق با روابط (۵) تا (۸) اعمال می‌شود:

$$\omega = \frac{\rho\left(u_\tau\right)^{۲}}{\mu}\omega^{+} \tag{۵}$$

$$\omega^{+} = \min\left(\omega^{+}, \frac{۶}{\beta_i\left(y^{+}\right)^{۲}}\right) \tag{۶}$$

$$\omega^{+} = \begin{cases} \left(\frac{۵۰}{k_s^{+}}\right)^{۲} & k_s^{+} < ۲۵ \\ \frac{۱۰۰}{k_s^{+}} & k_s^{+} \geq ۲۵ \end{cases} \tag{۷}$$

$$k_s^{+} = \max\left(۱/۰, \frac{\rho k_s u_\tau}{\mu}\right) \tag{۸}$$

در روابط فوق k_s برابر با ارتفاع زبری، u_τ سرعت اصطکاکی و β_i ضریب ثابت تجربی و برابر با ۰/۰۷۲ است. با مشاهدهٔ روابط فوق می‌توان دریافت که تعداد ضرایب ثابت و تجربی اندک است لذا بررسی این بخش نشان خواهد داد که ضرایب موجود در این شرایط مرزی تا چه اندازه برای شرایط لغزشی حاکم بر سطوح آبگریز مناسب بوده و قابلیت شبیه‌سازی جریان در مجاورت آن را داراست.

شکل (۸) مطابقت مناسب سرعت متوسط محاسبه شده از کار حاضر و نتایج گزارش شده از روش عددی مستقیم [۱۰] و شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ [۱۱] را نشان می‌دهد. در این شکل پروفیل سرعت درحالت عدم لغزش (الف) و لغزشی (ب و ج) مورد مقایسه قرار گرفته است. همچنین با مقایسهٔ مقدار سرعت لغزشی محاسبه شده از روش‌های متوسط‌گیری رینولدز و شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ مشاهده می‌شود که اختلاف کمتر از ۵ درصد است (جدول ۳).

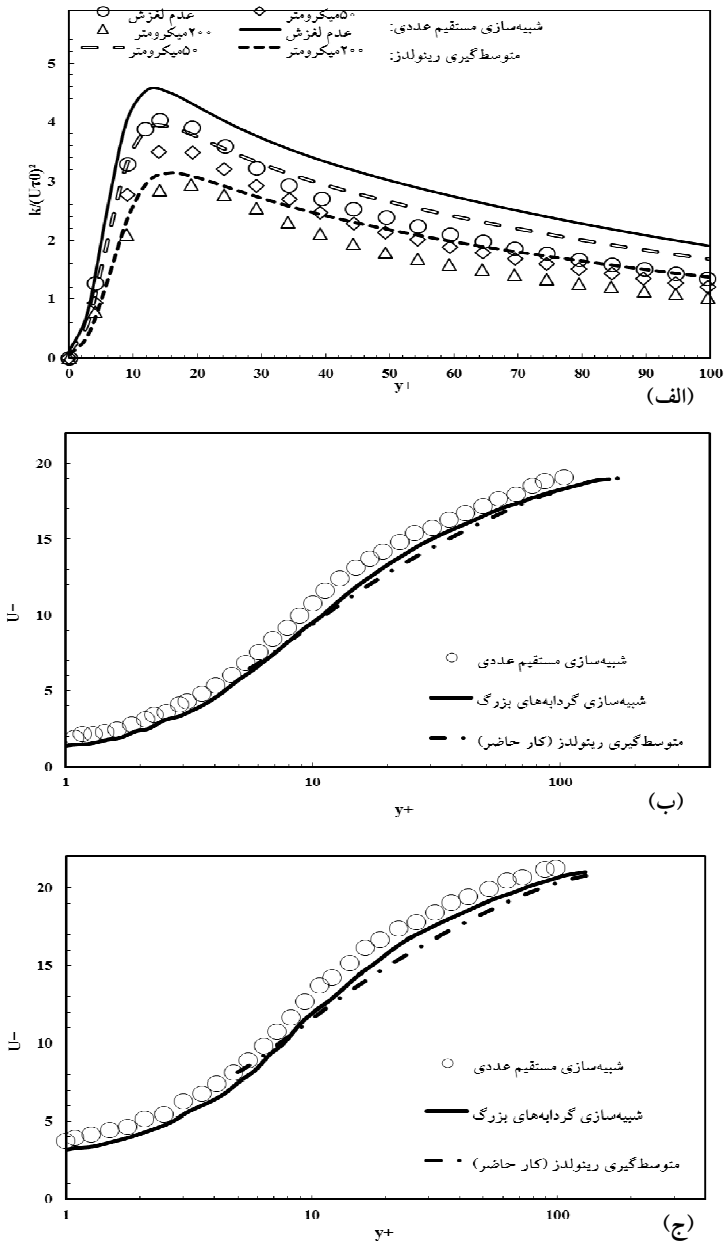
برای مطالعهٔ اثرات آبگریزی روی مشخصات آشفتگی جریان و همچنین بررسی توانایی روش اتخاذ شده در پیش‌بینی پارامترهای آشفتگی، تغییرات انرژی جنبشی آشفتگی برای طول لغزش‌های مختلف در شکل (۹) ترسیم شده است. در شکل (۹) تغییرات انرژی جنبشی آشفتگی پیش‌بینی شده در کار حاضر با حل به‌روش مستقیم عددی [۱۰] مقایسه شده است. چنانچه مشاهده می‌شود، در تمامی حالات (لغزشی و غیرلغزشی) مقدار پیش‌بینی شدهٔ توسط روش معادلات متوسط‌گیری شده بیشتر از روش عددی مستقیم است، با این وجود نحوهٔ تغییرات به درستی پیش‌بینی شده است. همچنین از بررسی شکل (۹) می‌توان دریافت که با افزایش طول لغزش، اختلاف مقادیر پیش‌بینی شده از دو روش کاهش یافته است.

شکل (۹) نشان می‌دهد که ساختارهای جریان آشفته در کانال به‌وسیلهٔ سطوح آبگریز دستخوش تغییر می‌شوند به‌نحوی که با افزایش آبگریزی سطح، از میزان انرژی جنبشی آشفتگی کاسته می‌شود که به معنی تضعیف این ساختارها است. با توجه به موفقیت مدل آشفتگی انتخابی در پیش‌بینی نتایج مناسب برای سطوح آبگریز در مقایسه با نتایج حل مستقیم و همچنین روش گردابه‌های بزرگ، در ادامه از روش حل مشابهی برای شبیه‌سازی جریان کانال نیم‌موج استفاده شده است.

۳-۳- جریان آشفته کانال نیم‌موج در مجاورت سطح آبگریز

در بخش ۳-۱ برخی مدل‌های آشفتگی رینولدز پایین مورد ارزیابی قرار گرفتند و با توجه به نتایج به‌دست آمده مدل آشفتگی $k-\omega$ ۱۹۹۸ برای ادامهٔ شبیه‌سازی‌ها مناسب تشخیص داده شد. از آن جهت که هدف اصلی تحقیق حاضر بررسی اثرات سطح آبگریز است، در بخش ۳-۲ مناسب بودن مدل $k-\omega$ ۱۹۹۸ در شبیه‌سازی سطح آبگریز مورد تحقیق قرار گرفت و توانایی این مدل آشفتگی در شبیه‌سازی جریان آشفتهٔ کانال مجاور با سطح آبگریز تأیید شد. لذا در این بخش با درنظر گرفتن پوشش‌های مختلف بر سطح کانال نیم‌موج، جریان آشفته درون آن با عدد رینولدز $۱۰^{۴}$ بررسی شده است.

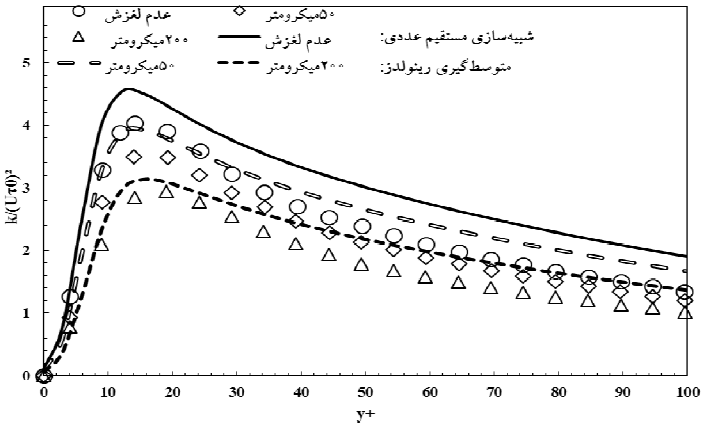
بررسی اثر پوشش‌های مختلف از طریق اعمال طول لغزش‌های متفاوت در شرط مرزی ناویر امکان‌پذیر است. مقادیر انتخاب شده برای طول لغزش ۲، ۵۰ و ۲۰۰ میکرومتر است که در مطالعات دیگر محققان نیز مورد استفاده قرار گرفته است [۱۰، ۱۱ و ۱۷]. جدول (۴) نتایج حاصل از شبیه‌سازی کانال نیم‌موج به‌ازای مقادیر مختلف طول لغزش (و مقدار بی‌بعد آن (L_S^{+})) را نشان می‌دهد. این جدول درصد کاهش نیروی پسای فشاری،



شکل ۸- مقایسهٔ پروفیل سرعت بین نتایج حل به‌روش عددی مستقیم [۱۰]، شبیه‌سازی به‌روش گردابه‌های بزرگ [۱۱] و روش متوسط‌گیری رینولدز (کار حاضر) در: الف) شرایط عدم لغزش و لغزش با طول لغزش، ب) ۵۰ میکرومتر و ج) ۲۰۰ میکرومتر

جدول ۳- مقایسهٔ سرعت لغزشی بی‌بعد شده (با سرعت اصطکاکی در حالت عدم لغزش) از روش‌های شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ [۱۱] و متوسط‌گیری رینولدز (مطالعه حاضر)

روش	طول لغزش ۵۰ میکرومتر	طول لغزش ۲۰۰ میکرومتر
شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ	۰/۹۷۸	۳/۲۶
متوسط‌گیری رینولدز (مدل ۱۹۹۸ $k-\omega$)	۱/۰۲۳	۳/۲۹
خطا (درصد)	۴/۶	۰/۹۲



شکل ۹- مقایسهٔ تغییرات انرژی جنبشی آشفتگی در راستای عمود بر دیوار با حل به‌روش عددی مستقیم [۱۰] برای طول لغزش‌های مختلف

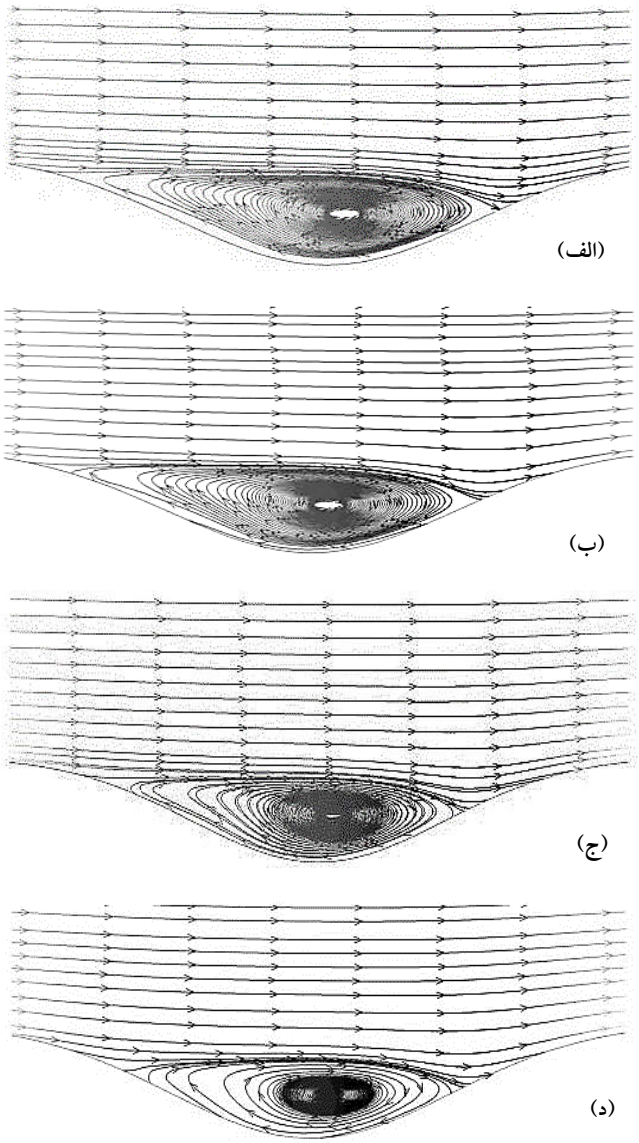
جدول ۴- ضرایب نیروی پسای فشاری، اصطکاکی و کل و درصد کاهش نیروی پسا برای طول لغزش‌های مختلف

طول لغزش (μm)	طول لغزش بی‌بعد ($L_S^+ = u_\tau L_S/\upsilon$)	کاهش نیروی پسای فشاری (٪)	کاهش نیروی پسای اصطکاکی (٪)	سهم نیروی پسای فشاری از کل نیروی پسا (٪)	کاهش نیروی پسای کل (٪)
۲	۰/۰۷	۰/۵۱	۰/۶۵	۳۸/۸۸	۰/۶
۵۰	۱/۶۳	۱۲/۷۶	۱۳/۵	۳۹/۰۵	۱۳/۱۹
۲۰۰	۵/۵۷	۴۱/۶۸	۳۶	۳۶/۶۶	۳۸/۲۱

اصطکاکی و کل را ارائه کند. لازم به ذکر است که برای بی بعد کردن طول لغزش مطابق با رابطهٔ $L_S^+ = u_\tau L_S/\upsilon$، از سرعت اصطکاکی در بخش هموار و بدون انحنای انتهای کانال استفاده شده است.

نتایج جدول (۴) توانایی قابل توجه سطوح آبگریز در کاهش نیروی پسا را در مقایسه با سطوح آبدوست نمایان می‌سازد، به‌نحوی که بیش از ۳۸ درصد کاهش در نیروی پسا به‌ازای طول لغزش ۲۰۰ میکرومتر ایجاد شده است. اما برخلاف جریان آرام، که هر طول لغزشی در جهت جریان موجب دست‌یابی به میزان کاهش نیروی پسای قابل قبولی می‌شود [۱۰]، مشاهده می‌شود که به‌ازای طول لغزش ۲ میکرومتر مقدار کاهش نیروی پسای به‌دست آمده بسیار کم است. برای دست‌یابی به کاهش نیروی پسای قابل توجه ضرورت دارد تا مقدار طول لغزش از مقدار حداقلی بزرگ‌تر باشد. در تحقیقات پیشین به این امر (تعیین حداقل طول لغزش مورد نیاز جهت مؤثر بودن روش آبگریزی سطح) توجه شده است، به‌نحوی که کمینه مقدار لازم برای طول لغزش بی‌بعد (L_S^+) جهت دست‌یابی به کاهش نیروی پسای بیش از ۲ درصد درجریان آشفتهٔ کانال ساده برابر با ۰/۲ گزارش شده است [۱۰ و ۱۱]. اگرچه به‌علت محدود بودن تعداد طول لغزش‌های مورد بررسی در کار حاضر، ارائه مقدار کمینهٔ طول لغزش بی‌بعد جهت دست‌یابی به کاهش نیروی پسای قابل توجه میسر نیست، اما نتیجهٔ این بخش از تحقیق مؤید نتایج تحقیقات پیشین است.

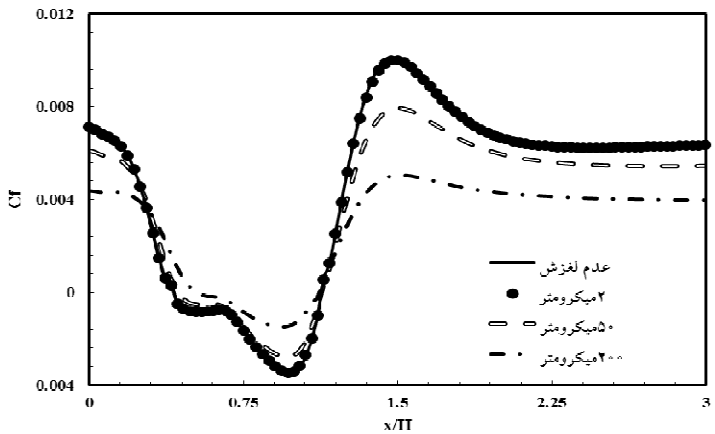
از جدول (۴) مشاهده می‌شود که با افزایش طول لغزش درصد کاهش نیروی پسای فشاری و اصطکاکی افزایش پیدا کرده است. علت کاهش نیروی پسای فشاری قابل توجه ناشی از تغییر مکان جدایش جریان در ناحیه موجدار کانال است. زیرا با افزایش طول لغزش مقدار سرعت لغزشی نیز افزایش یافته و این امر به معنی افزایش ممنتم ذرات سیال در مجاورت دیوار است. در راستای بررسی اثر آبگریزی بر تغییر مکان جدایش و بازچسبندگی، شکل (۱۰) به‌صورت کیفی الگوی جریان و جدول (۵) به‌صورت کمی موقعیت جدایش و بازچسبندگی را



شکل ۱۰- خطوط جریان در قسمت موجدار کانال برای حالت‌های: الف) آبدوست و آبگریز با طول لغزش‌های، ب) ۲ میکرومتر، ج) ۵۰ میکرومتر و د) ۲۰۰ میکرومتر

جدول ۵- موقعیت جدایش و بازچسبندگی به‌ازای طول لغزش‌های مختلف

طول لغزش (μm)	نقطه جدایش (x/H)	نقطهٔ بازچسبندگی (x/H)
۰	۰/۴۰۱۹	۱/۱۱۱
۲	۰/۴۰۲۲	۱/۱۱۱
۵۰	۰/۴۴۴	۱/۱۱
۲۰۰	۰/۵۳۱	۱/۱۱



شکل ۱۱- تغییرات ضریب اصطکاک بر دیوار کانال نیم‌موج به‌ازای طول لغزش‌های مختلف

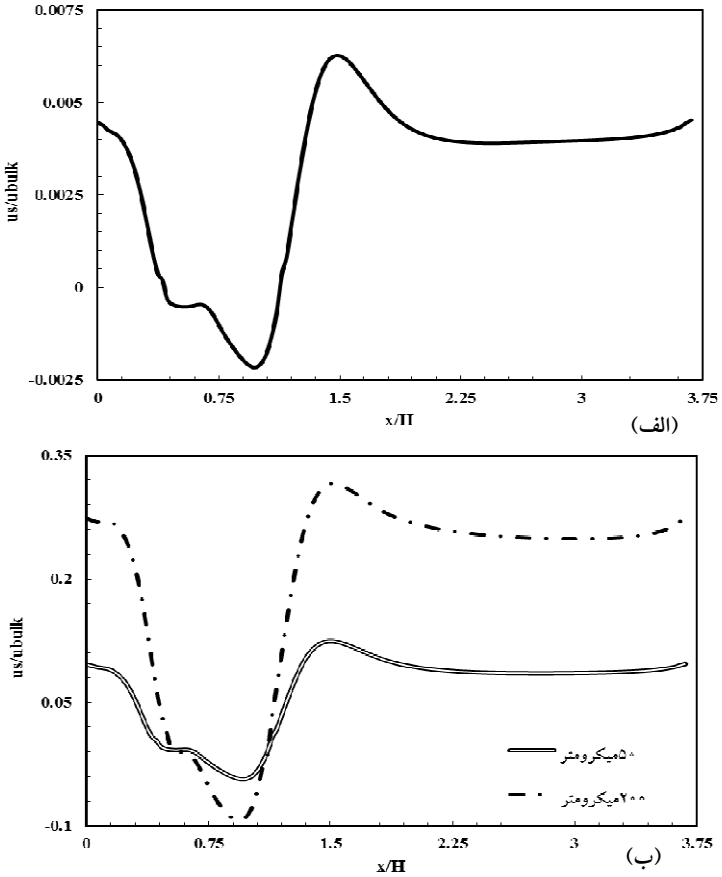
برای پوشش‌های مختلف و به‌ازای طول لغزش‌های آنها نشان می‌دهد.

در شکل (۱۰) الگوی جریان در بخش انحنادار کانال به‌ازای طول لغزش‌های مختلف نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش آبگریزی سطح گردابه کوچک‌تر شده و همچنین جدایش به تعویق افتاده است که این عوامل کاهش نیروی پسای فشاری را منجر می‌شوند. اما با توجه به شکل (۱۰) می‌توان دریافت که تغییر عمده‌ای در مکان بازچسبندگی رخ نمی‌دهد. از این‌رو بررسی کمی موقعیت جدایش و بازچسبندگی جدول (۵) ضروری به نظر می‌رسد. جدول (۵) نتایج برشمرده شده از شکل (۱۰) را تأیید کند.

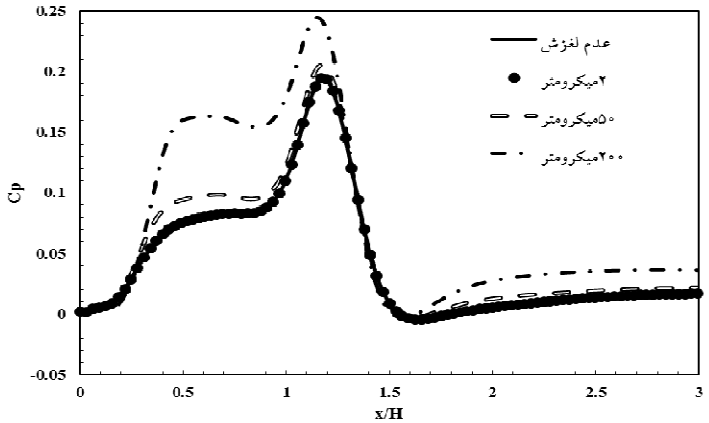
از آنجایی که سهم عمدهٔ نیروی پسا را نیروی پسای اصطکاکی تشکیل می‌دهد، بررسی نحوهٔ تغییرات ضریب اصطکاک پوسته‌ای ضروری به نظر می‌رسد. شکل (۱۱) این تغییرات را برای پوشش‌های مختلف نمایش می‌دهد و گویای آن است که با افزایش طول لغزش نیروی پسای اصطکاکی کاهش می‌یابد. برای تعمق در اثر آبگریزی روی کاهش نیروی پسای اصطکاکی، توجه به چگونگی تغییرات سرعت لغزشی در امتداد کاانال نیز مفید خواهد بود. شکل (۱۲) تغییرات سرعت لغزشی بی‌بعد به‌ازای طول لغزش‌های مختلف را در امتداد سطح کانال نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که به‌دلیل خاصیت ذاتی شرط مرزی ناویر تغییرات سرعت و ضریب اصطکاک پوسته‌ای روند مشابهی را نشان می‌دهند. اما با مشاهدهٔ شکل‌های (۱۱) و (۱۲) می‌توان دریافت که در نقاطی با گرادیان سرعت بیشتر، سرعت لغزشی افزایش یافته و به تبع آن کاهش نیروی پسای پوسته‌ای شدت می‌یابد. به‌عبارت دیگر سطوح آبگریز برای تنش‌های برشی بزرگ‌تر لغزش و کاهش نیروی پسای پوسته‌ای مؤثرتری را نتیجه می‌دهند.

اثر سطح آبگریز کاهش نیروی پسای اصطکاکی است و به این امر در تحقیقات گذشته اذعان شده است. اما کاهش نیروی پسای فشاری به‌واسطهٔ آبگریزی سطح، اثری ضمنی است که کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است. چنانچه در جدول (۴) مشخص شده است برای جریان کانال نیم‌موج در رینولدز $۱۰^۴$، نیروی پسای فشاری سهمی حدوداً ۴۰ درصدی در نیروی پسای کل دارد. از این‌رو بررسی چگونگی تغییرات فشار، کمکی شایان توجه به روشن‌تر شدن نقش آبگریزی سطح در کاهش نیروی پسای فشاری خواهد داشت. بدین منظور در شکل (۱۳) تغییرات ضریب فشار بر دیوارهٔ کانال نیم‌موج و به‌ازای طول لغزش‌های متفاوت نشان داده شده است.

قلهٔ اول و دوم نمودارها در شکل (۱۳) به‌ترتیب بیانگر فشار در نقطهٔ جدایش و بازچسبندگی است. چنانچه از شکل (۱۳) مشخص است با وجود افزایش ضریب فشار با افزایش



شکل ۱۲- پروفیل سرعت لغزشی بی‌بعد شده با سرعت متوسط کانال برای طول لغزش‌های: الف) ۲ میکرومتر و ب) ۵۰ و ۲۰۰ میکرومتر



شکل ۱۳- تغییرات ضریب فشار بر دیوار کانال نیم‌موج به‌ازای طول لغزش‌های مختلف

طول لغزش، افزوده شدن بر مقدار لغزش اختلاف فشار بین دو قله را می‌کاهد که این امر نیز به نوبهٔ خود کاهش نیروی پسای فشاری را منجر می‌شود. نکتهٔ دیگر آن که، هرچند در شکل (۱۲- الف) سرعت لغزشی برای پوششی با طول لغزش ۲ میکرومتر گزارش شده است اما مطابق با شکل‌های (۱۱) و (۱۳) تغییرات ضریب فشار و اصطکاک پوسته‌ای تفاوتی را با

حالت بدون لغزش نشان نمی‌دهد و این مطلب علت کاهش ناچیز نیروی پسای گزارش شده در جدول (۴) را بیش از پیش مشخص کند.

۴- نتیجه‌گیری کلی

هدف اصلی این تحقیق بررسی جریان دو بعدی و آشفتهٔ کانال نیم‌موجی در مجاورت سطح آبگریز عنوان شد. برخلاف غالب مطالعات عددی انجام شدهٔ پیشین در حوزهٔ کاهش نیروی پسا به‌واسطهٔ آبگریزی سطح، در این تحقیق استفاده از روش متوسط‌گیری رینولدز و به‌کارگیری مدل آشفتگی مورد نظر قرار گرفت. از این رو در بخش نخست از این تحقیق برخی از مدل‌های آشفتگی رینولدز پایین مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج به‌دست آمده از آنها با نتایج گزارش شده از مرجع [۲۵] (که به‌روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ انجام شده است) مقایسه شد. درنهایت با مقایسهٔ کمیت‌هایی همچون توزیع فشار، ضریب اصطکاک پوسته‌ای و پروفیل سرعت مدل آشفتگی $k-\omega$ ۱۹۹۸ مناسب تشخیص داده شد.

در بخش دوم از این تحقیق جریان آشفتهٔ کانال در مجاورت سطح آبگریز به کمک مدل آشفتگی $k-\omega$ ۱۹۹۸ شبیه‌سازی شد و نتایج آن با سایر تحقیقات پیشین مقایسه شد. نتایج این بخش حاکی از دقت مناسب مدل آشفتگی $k-\omega$ ۱۹۹۸ در محاسبهٔ سرعت متوسط و انرژی جنبشی آشفتگی برای حالت‌های لغزشی و غیرلغزشی است. لذا ضرایب ثابت و تجربی موجود در این مدل برای شبیه‌سازی جریان لغزشی نیز مناسب تشخیص داده شد.

با توجه به نتایج به‌دست آمده از دو بخش قبل، در بخش سوم شبیه‌سازی جریان آشفتهٔ کانال نیم‌موج در مجاورت سطوح آبگریز با طول لغزش‌های مختلف انجام شد. شبیه‌سازی‌های انجام شده در عدد رینولدز $۱۰^۴$ و برای طول لغزش‌های ۲، ۵۰ و ۲۰۰ میکرومتر صورت گرفت. نتایج حاصل کاهش نیروی پسا تا ۳۸ درصد را نشان می‌دهند و این نتایج به گونه‌ای است که افزایش کاهش نیروی پسای فشاری و اصطکاکی را با افزایش طول لغزش نشان می‌دهد. اما برای طول لغزش ۲ میکرومتر درصد کاهش پسای محاسبه شده بسیار ناچیز است و این نتیجه نشان از آن دارد که برای دست‌یابی به کاهش نیروی پسای قابل توجه در جریان آشفته، نیاز است تا مقدار طول لغزش بی‌بعد از مقداری حداقلی بزرگ‌تر باشد. اگرچه به‌علت محدود بودن تعداد طول لغزش‌های مورد بررسی در کار حاضر، ارائهٔ مقدار کمینهٔ طول لغزش بی‌بعد جهت دست‌یابی به کاهش نیروی پسای قابل توجه میسر نیست، اما نتیجهٔ این بخش از تحقیق مؤید نتایج تحقیقات پیشین است.

در هندسهٔ مورد بررسی نیروی پسای فشاری سهم قابل توجه حدود ۴۰ درصدی را در پسای کل دارد و آبگریزی سطح امکان کاهش آن را تا ۴۲ درصد (با استفاده از طول لغزش ۲۰۰ میکرومتر) ممکن می‌سازد. علت رخ دادن کاهش نیروی پسای فشاری قابل توجه، ریشه در تعویق جدایش جریان و کاسته شدن اختلاف فشار در ناحیهٔ برگشتی دارد. همچنین با بررسی تغییرات ضریب اصطکاک پوسته‌ای مشاهده شد که افزایش آبگریزی سطح موجب افزایش درصد کاهش نیروی پسای پوسته‌ای می‌شود و همچنین در نواحی از جریان که گرادیان سرعت بیشتری وجود داشته باشد، بر میزان کاهش نیروی پسای اصطکاکی افزوده می‌شود.

واژه‌نامه

1. passive and active flow control
2. blowing and suction
3. micro bubble injection
4. riblet
5. vortex generator
6. hydrophobic
7. Navier
8. slip length
9. direct numerical simulation (DNS)
10. large eddy simulation (LES)
11. coherent structures
12. Reynolds average Navier-Stokes
13. wavy (corrugated) wall
14. Fluent software
15. Spalart-Allmaras

16. Reynolds stress model-Low Re
17. Upwind
18. SIMPLE
19. hydrophilic

مراجع

1. Muralidharan, K., Muddada, S., and Patnaik, B. S. V., "Numerical Simulation of Vortex Induced Vibrations and its Control by Suction and Blowing", *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 37, pp. 284-307, 2013.
2. Sohankar, A., Khodadadi, M., and Rangraz, E., "Control of Fluid Flow and Heat Transfer Around a Square Cylinder by Uniform Suction and Blowing at Low Reynolds Numbers", *Computers & Fluids*, Vol. 109, pp. 155-167, 2015.
3. Nouri, N. M., Yekani Motlagh, S., Navidbakhsh, M., Dalilhaghi, M., and Moltani, A. A., "Bubble Effect on Pressure Drop Reduction in Upward Pipe Flow", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 44, pp. 592-598, 2013.
4. Boomsma, A., and Sotiropoulos, F., "Riblet Drag Reduction in Mild Adverse Pressure Gradients: A Numerical Investigation", *International Journal of Heat and Fluid Flows*, Vol. 56, pp. 251-260, 2015.
5. Fouatih, O. M., Medale, M., Imine, O., and Imine, B., "Design Optimization of the Aerodynamic Passive Flow Control on NACA 4415 Airfoil using Vortex Generators", *European Journal of Mechanics B/Fluids,* Vol. 56, pp. 82-96, 2016.
6. Mirzaei, M., Davidson, L., Sohankar, A., and Innings, F., "The Effect of Corrugation on Heat Transfer and Pressure Drop in Channel Flow with Different Prandtl Numbers", *International Journal of Heat and Mass Transfer,* Vol. 66, pp. 164-176, 2013.
7. Catalano, P., Wang, M., Iaccarino, G., Sbalzariniz, I. F., and Koumoutsakos, P., "Optimization of Cylinder Flow Control via Actuator with Zero Net Mass Flux", *Proceedings of the Summer Program*, Center of Turbulence Research, pp. 297-303, 2002.
8. Ou, J., Perot, B., and Rothstein, J. P., "Laminar Drag Reduction in Microchannels using Ultrahydrophobic Surfaces", *Physics of Fluids*, Vol. 16, No. 12, pp. 4635-4643, 2004.
9. Choi, C. H., Johan, K., Westin, A., and Breuer, K. S., "Apparent Slip Flows in Hydrophilic and Hydrophobic Microchannels", *Physics of Fluids*, Vol. 15, No. 10, pp. 2897-2902, 2003.
10. Min, T., and Kim, J., "Effects of Hydrophobic Surface on Skin-Friction Drag", *Physics of Fluids*, Vol. 16, No. 7, pp. 55-58, 2004.
11. Nouri, M. N., Sekhavat, S., and Mofidi, A., "Drag Reduction in a Turbulent Channel Flow with Hydrophobic Wall", *Journal of Hydrodynamics*, Vol. 24, No. 3, pp. 458-466, 2012.
12. Fukagata, K., Kasagi, N., and Koumoutsakos, P., "A Theoretical Prediction of Friction Drag Reduction in Turbulent Flow by Superhydrophobic Surfaces", *Physics of Fluids*, Vol. 18, No. 5, pp. 051703-1-8, 2006.
13. Tretheway, D. C., and Meinhart, C. D., "Apparent Fluid Slip at Hydrophobic Microchannel Walls", *Physics of Fluids*, Vol. 14, No. 3, pp. 9-12, 2002.
14. Hao, P. F., Wong, C., Yao, Z. H., and Zhu, K. Q., "Laminar Drag Reduction in Hydrophobic Microchannels", *Chemical Engineering and Technology*, Vol. 32, No. 6, pp. 912-918, 2009.
15. Jia-peng, Z., Xiang-dang, D., and Xiu-hua, S., "Experimental Research on Friction-Reduction with Superhydrophobic Surfaces", *Journal of Marine Science and Application*, Vol. 6, No. 3, pp. 58-61, 2007.
16. You, D., and Moin, P., "Effects of Hydrophobic Surfaces on the Drag and Lift of a Circular Cylinder", *Physics of Fluids*, Vol. 19, No. 8, pp. 081701-1-4, 2007.
17. Nouri, M. N., Saadat bakhsh, M., and Sekhavat, S., "Analysis of Shear Rate Effects on Drag Reduction in Turbulent Channel Flow with Superhydrophobic Wall", *Journal of Hydrodynamics*, Vol. 25, No. 6, pp. 944-953, 2013.
18. Jeffs, K., Maynes, D., and Webb, B. W., "Prediction of Turbulent Channel Flow with Superhydrophobic Walls Consisting of Micro-Ribs and Cavities Oriented Parallel to the Flow Direction", *International Journal of Heat and Mass Transfer,* Vol. 53, No. 4, pp. 786-796, 2010.
19. Gruncell, B. R. K., Sandham, N. D., and McHale, G., "Simulations of Laminar Flow Past a Superhydrophobic Sphere with Drag Reduction and Separation Delay", *Physics of Fluids*, Vol. 25, No. 4, pp. 043601, 2013.
20. Hudson, J. D., Dykhno, L., and Hanratty, T. J., "Turbulence Production in Flow Over a Wavy Wall", *Experiments in Fluids*, Vol. 20, pp. 257-265, 1996.
21. Cherukat, Y. N., and Hanratty, T. J., "Direct Numerical Simulation of a Fully Developed Turbulent Flow Over a Wavy Wall", *Theoretical and Computational Fluid Dyn*amics, Vol. 11, pp. 109-134, 1998.
22. Tseng, Y. H., and Ferziger, J. H., "Large-Eddy Simulation of Turbulent Wavy Boundary Flow Illustration of Vortex Dynamics", *Journal of Turbulence,* Vol. 5, pp. 775-789, 2004.
23. Choi, H. S., and Suzuki, K., "Large Eddy Simulation

of Turbulent Flow and Heat Transfer in a Channel with One Wavy Wall", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 26, pp. 681-694, 2005.
24. Dellil, A. Z., Azzi, A., and Jubran, B. A., "Turbulent Flow and Convective Heat Transfer in a Wavy Wall Channel", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 40, pp. 793-799, 2004.
25. Mirzaei, M., Sohankar, A., Davidson, L., and Innings, F., "Large Eddy Simulation of the Flow and Heat Transfer in a Half-Corrugated Channel with Various Wave Amplitudes", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 76, pp. 432-446, 2014.
26. Wilcox, D. C., *Turbulence Modeling for CFD*, Third Edition, pp. 124-128, DCW Industries Inc., 5354 Palm Drive, La Canada, California 91011, 2006.
27. FLUENT (V 6.4) and GAMBIT (V 2.1.6) *User's Guides*, Fluent Inc., Lebanon, New Hampshire, USA, 2007.