

شبیه سازی عددی الگوی جریان حول یک صفحه مستغرق در کانال مستطیلی

معصومه رستم آبادی¹، سید علی اکبر صالحی نیشابوری²

1- معصومه رستم آبادی، دانشکده فنی دانشگاه تربیت مدرس، بخش مهندسی عمران.

2- سید علی اکبر صالحی نیشابوری، دانشکده فنی دانشگاه تربیت مدرس. تلفن 021-82883316

Rostamabadi@modares.ac.ir

خلاصه

صفحه های مستغرق سازه هایی هستند که به منظور عمیق کردن کانال برای اهداف کشتیرانی، انتقال رسوبات از مقابل دهانه آبگیر و یا جلوگیری از فرسایش قوس خارجی بکار می روند. در این مقاله با شبیه سازی عددی الگوی جریان حول یک صفحه با زوایای مختلف در یک کانال مستطیلی با کف صلب با استفاده از نرم افزار فلونت و مقایسه نتایج آن با نتایج آزمایشگاهی، علاوه بر تعیین زاویه بهینه، الگوی جریان حول صفحه و کارایی مدل های آشفتگی $k-\epsilon$ و RSM در شبیه سازی الگوی جریان مورد بررسی قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: صفحه مستغرق (*Submerged vane*)، زاویه بهینه بر خورد با جریان (*Optimal angle of attack*)، جریان ثانویه (*Secondary flow*)، مدل آشفتگی (*Turbulence model*)، فلونت (*Fluent*).

مقدمه

صفحات مستغرق سازه هایی هستند که در کف رودخانه با زاویه ای نسبت به جریان اصلی نصب میشوند. عملکرد اصلی صفحات ایجاد جریان ثانویه است. لذا سیستم صفحات می تواند در عمیق کردن کانال برای اهداف کشتیرانی، انتقال رسوبات از مقابل دهانه آبگیر و یا جلوگیری از فرسایش قوس خارجی در خم رودخانه بکار رود.

تحقیقات بسیاری در چند دهه اخیر توسط محققین مختلف از جمله ونگ و همکاران (1996) در کاربرد سیستم صفحات، بصورت میدانی در جلوگیری از ورود رسوبات به آبگیر جانبی [1]، نیل و همکاران (1997) در کاربرد ترکیب صفحات با سازه های دیگر به منظور جلوگیری از ورود رسوبات به آبگیرهای جانبی در مسیرهای مستقیم [2]، بارکدال و همکاران (1999) در طراحی آرایش مناسب صفحات برای جلوگیری از ورود رسوبات به آبگیرهای جانبی در مسیرهای مستقیم با بستر آبرفتی [3]، وایزن و تانزند (2002) در تعیین ابعاد و آرایش بهینه صفحه ها در قوس 90° به منظور جلوگیری از فرسایش کناره خارجی قوس [4]، سون کیت و همکاران (2005) در بررسی الگوی جریان حول یک صفحه طویل در رودخانه های عریض با بستر متحرک [5]، گوپتا و همکاران (2007) در طراحی شکل هندسی مناسب صفحه برای عملکرد بهتر در ممانعت از ورود رسوبات به آبگیرهای جانبی در خم رودخانه های آبرفتی [6] و تحقیقات میدانی، آزمایشگاهی و عددی بسیاری صورت گرفته که منجر به ارائه توصیه هایی برای طراحی صفحات مستغرق گردیده است. مریلیوس و سینها (1998 و 2000) به بررسی الگوی جریان حول یک صفحه در مسیر مستقیم با بستر متحرک و تعیین زاویه بهینه برخورد جریان با صفحه و بصورت آزمایشگاهی [7] و سپس عددی با استفاده از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ پرداختند [8].

الگوی جریان حول صفحه مستغرق کاملاً سه بعدی و غیریکنواخت بوده و شناخت آن به کاربرد بهتر این سیستم کارآمد منجر خواهد شد. از طرفی استفاده از مدل های عددی از صرف کردن هزینه های زیاد مدل های آزمایشگاهی می کاهد و امکان اعمال شرایط ایده ال در آنها فراهم است. در این مقاله با استفاده از نرم افزار فلونت با شبیه سازی عددی الگوی جریان حول یک صفحه با زوایای مختلف در بستر صلب یک کانال مستطیلی مستقیم، به

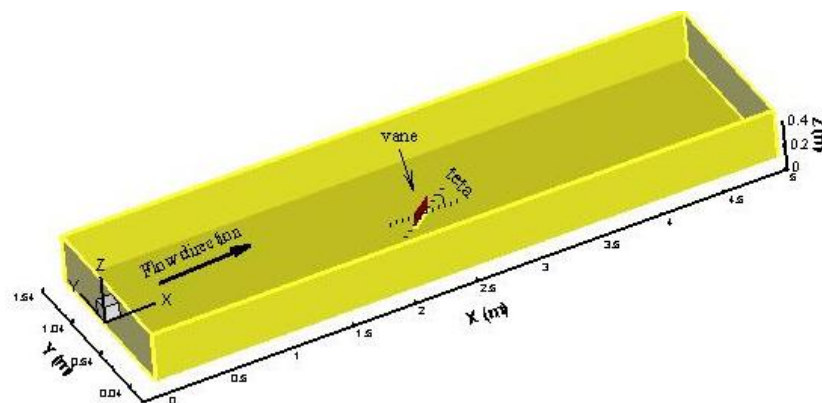
¹ دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه تربیت مدرس

² استاد دانشگاه تربیت مدرس

تعیین زاویه بهینه برخورد با جریان و شناخت الگوی جریان حول صفحه با زاویه بهینه پرداخته شده است. همچنین الگوی جریان شبیه سازی شده با استفاده از دو مدل آشفتگی $k-\epsilon$ و RSM مورد مقایسه قرار گرفته است. لازم بذکر است که بدلیل عدم دسترسی به داده های آزمایشگاهی امکان صحت سنجی پروفیل سرعت نتایج مدل عددی فراهم نبوده است، اما مقایسه الگوی جریان پیش بینی شده در مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی [7] و تطابق نتایج باهم صحت مدل عددی تأیید شده است.

مشخصات میدان حل

میدان حل (مشابه مدل آزمایشگاهی [7]) عبارت است از یک کانال مستطیلی مستقیم به طول 5 متر، عمق 0/4 متر و عرض 1/54 متر با دیوارها و کف صلب و یک صفحه مستغرق نصب شده در کف کانال با زاویه q نسبت به جهت جریان به ارتفاع 0/12 متر، طول 0/24 متر و ضخامت 0/003 متر که مرکز آن در فاصله حدود 2/5 متری از ورودی کانال قرار دارد. در شکل (1) مشخصات مهندسی میدان حل نشان داده شده است.



شکل 1- مشخصات هندسی کانال

قوانین و معادلات حاکم بر میدان جریان

قوانین حاکم عبارتند از قانون بقای جرم و بقای مومنتم که در حالت جریان آشفته و بصورت متوسط گیری شده در زمان، معادلات پیوستگی (1) و رینولدز (2) از آنها استخراج می شود.

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(m \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial(-\rho u_i' u_j')}{\partial x_j} \quad (2)$$

که در آن u_i مؤلفه سرعت در جهت x_i ، فشار، p ، چگالی، m ویسکوزیته دینامیکی و جملات $-\rho u_i' u_j'$ به عنوان تنشهای رینولدز شناخته می شوند. این معادلات شامل چهار مجهول مؤلفه های سرعت در سه جهت (u, v, w) و فشار می باشند. از طرفی معادله مومنتم حاوی شش مؤلفه مجهول تنش رینولدز است، لذا سیستم معادلات فوق بسته نیست و بایستی با استفاده از مدل آشفتگی مناسب تنشهای رینولدز محاسبه شوند. در این مقاله از مدل های آشفتگی $k-\epsilon$ و RSM استفاده شده است. مدل RSM شش معادله انتقال برای شش مؤلفه تنش رینولدز و یک معادله انتقال برای نرخ استهلاك انرژی جنبشی حل می کند. اما مدل $k-\epsilon$ مدل دو معادله ایست و با این استدلال که انرژی جنبشی آشفتگی (k) سنجش مستقیمی برای نوسانهای تلاطمی در سه جهت است، جذر k به عنوان مقیاس سرعت مورد استفاده قرار می گیرد و معادله انتقال برای k و یک معادله انتقال برای میزان اتلاف انرژی جنبشی آشفتگی (e) حل می شود. (برای رعایت اختصار از ارائه معادلات مربوط به مدل های آشفتگی خودداری شده است [9]).

حل عددی معادلات

همانطور که اشاره شد جهت حل معادلات از نرم افزار تحلیل جریان فلوئنت (نسخه 6/0/12) استفاده شده است. فلوئنت کل میدان جریان را بصورت حجم کنترلهای مجزا در نظر می گیرد، از معادلات حاکم بر جریان سیال روی هر حجم کنترل انتگرال گرفته، با استفاده از طرحهای مختلف انفصال

معادلات مانند آپویند، کوئیک و ... که توسط کاربر تعیین می شود، معادلات جبری منفصل شده را تعیین و با استفاده از الگوریتم های مختلف از جمله سیمپل و پیژو، معادلات وابسته بهم را تا رسیدن به مرحله همگرایی حل می نماید. به منظور تهیه هندسه میدان جریان، شبکه بندی آن و تخصیص انواع شرایط مرزی نیز از نرم افزار پیش پردازنده گمبیت (نسخه 2) استفاده شده است. از طرح آپویند مرتبه دوم برای انفصال جملات جابجایی معادلات و از الگوریتم سیمپل برای کوپل نمودن سرعت و فشار استفاده شده است. استفاده از ضرایب زیر تخفیف کوچکتر از یک برای فشار، مومنتم و تنشهای رینولدز مانع از واگرایی حل شده است.

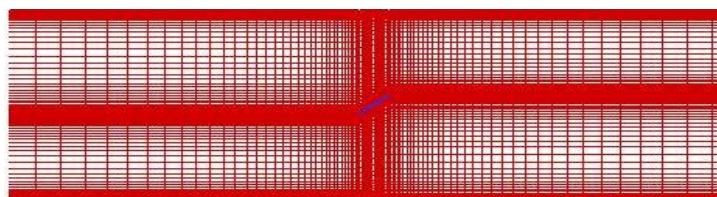
شبکه بندی میدان حل

با توجه به اینکه در مدل های آشفتگی *RSM* و *k-ε* از تابع استاندارد دیوار برای ناحیه متأثر از لزجت مولکولی استفاده می شود لذا فاصله اولین گره در ناحیه کاملاً آشفته از دیوار بدین صورت محاسبه می شود، ابتدا ضریب اصطکاک پوسته ای بر اساس روابط تجربی مانند رابطه (3) محاسبه شده است. سپس سرعت برشی مطابق رابطه (4) محاسبه شده و فاصله اولین گره در جهت عمود بر دیوار از رابطه (5) تعیین می شود. شبکه بندی میدان در نزدیک دیوار ریز و در فاصله دورتر از دیوار با حداکثر 20% رشد در دو سلول مجاور، درشت تر می شود. شکل (2) شبکه بندی میدان جریان در اطراف صفحه را نشان می دهد.

$$\bar{c}_f / 2 = 0.0359 \times Re^{-0.2} = 0.0039 \quad (3)$$

$$u_t = v \cdot \sqrt{\bar{c}_f / 2} = 0.026 \quad (4)$$

$$y_1 = \frac{50u}{u_t} = 1.87e - 3m \quad (5)$$



شکل 2- شبکه بندی میدان حل

شرایط مرزی

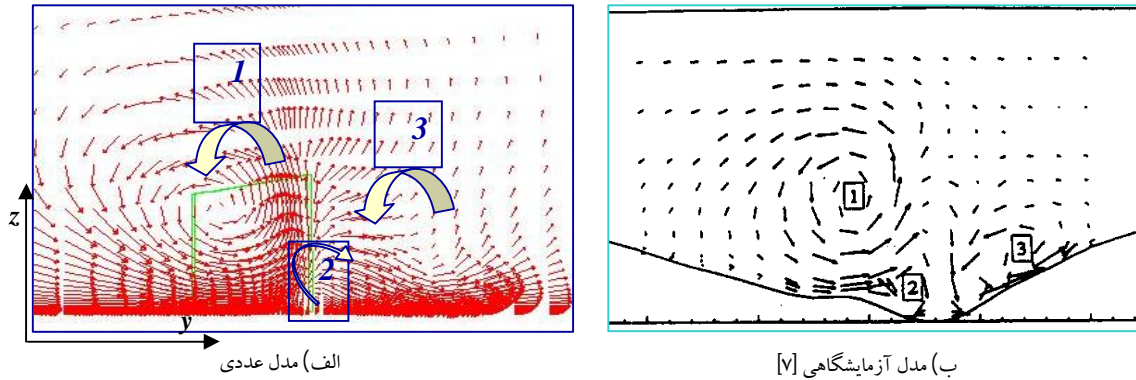
در ورودی شرط مرزی سرعت ورودی (*velocity inlet*) به همراه شدت آشفتگی و عمق هیدرولیکی، در خروجی کانال با توجه به طولانی بودن کانال و توسعه یافتن جریان از شرط مرزی جریان خروجی (*out flow*) برای دیوارها و صفحه شرط مرزی دیوار (*wall*) و برای سطح آزاد جریان شرط مرزی تقارن (*symmetry*) استفاده شده است. از قانون استاندارد دیوار برای محاسبه پروفیل سرعت و تنشهای برشی کف استفاده شده است. جدول (1) مشخصات هیدرولیکی مدل را نشان می دهد که جریان آشفته زیر بحرانی در کانال برقرار است.

جدول 1- مشخصات هیدرولیکی میدان جریان

| دبی (m^3/s) | سرعت (m/s) | عدد فرود (Fr) | عدد رینولدز (Re) | شدت آشفتگی | عمق هیدرولیکی (m) |
|-----------------|----------------|-------------------|----------------------|------------|-----------------------|
| 0/3 | 0/487 | 0/24 | 194805 | 0/03 | 0/4 |

صحت سنجی مدل عددی

به منظور صحت سنجی نتایج مدل عددی، الگوی جریان پیش بینی شده در مدل عددی با الگوی جریان حاصل از نتایج آزمایشگاهی ارائه شده توسط مرلیوس و سینها [7] مقایسه شده است. بدین منظور صفحه با مشخصات مذکور و زاویه 40 در کانال قرار داده شده و الگوی جریان شبیه سازی شده است. شکل (3) الگوی جریان در مقطع عرضی پس از صفحه را در مدل عددی حاضر و مدل آزمایشگاهی نشان می دهد. همانند مدل آزمایشگاهی، مدل عددی نیز گردابه های حول صفحه را پیش بینی نموده است. بررسی دقیق الگوی جریان به قسمت بعد مو کول می شود.

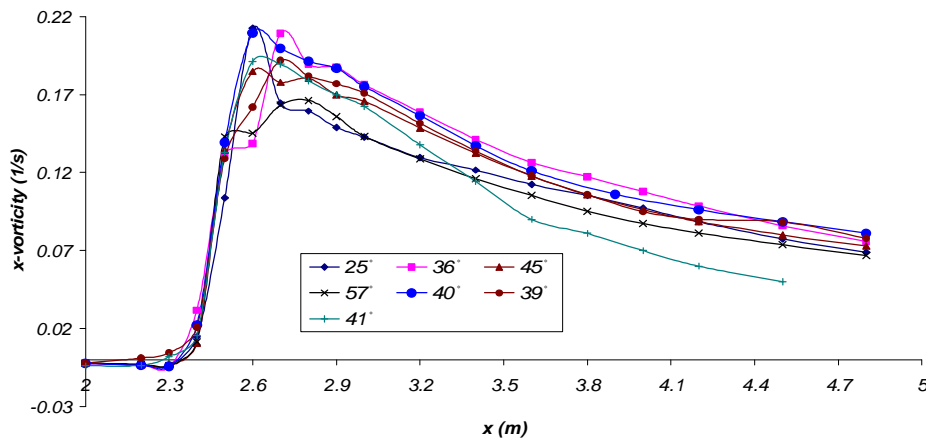


شکل 3- مقایسه الگوی جریان پیش بینی شده در مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی در مقطعی به فاصله دوبرابر طول صفحه پس از آن

تعیین زاویه بهینه برخورد با جریان

زاویه بهینه زاویه ای است که حداکثر قدرت جریان ثانویه را داشته باشد [7]، قدرت جریان ثانویه بیشتر نشان دهنده شدت انتقال عرضی رسوبات در محدوده اطراف صفحه است، لذا به منظور عمیق کردن جریان در کانالهای مستقیم کاربرد دارد. سینهها و مریلیوس در تحقیق آزمایشگاهی خود از بین صفحه با زوایای 25، 36، 45 و 57 درجه و با محاسبه لنگر مومنتم [7]، زاویه بهینه را حدود 40 درجه تخمین زدند. در این مقاله به منظور تعیین دقیق زاویه بهینه نصب صفحه در کانال، صفحه ای با زوایای 25، 36، 39، 40، 41، 45 و 57 درجه در مدل عددی استفاده شده و میانگین قدرت جریان ثانویه (w_x) بصورت رابطه (6) در طول کانال از مقطع $x=2\text{ m}$ تا انتهای کانال محاسبه شده و در شکل (4) نشان داده شده است (صفحه در موقعیت m تا $x=2.4$ قرار دارد).

$$w_x = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (6)$$



شکل 4- مقایسه قدرت جریان ثانویه در محدوده اطراف صفحه تا انتهای کانال به ازای زوایای مختلف نصب صفحه

با توجه به این شکل نکات ذیل حائز اهمیت است:

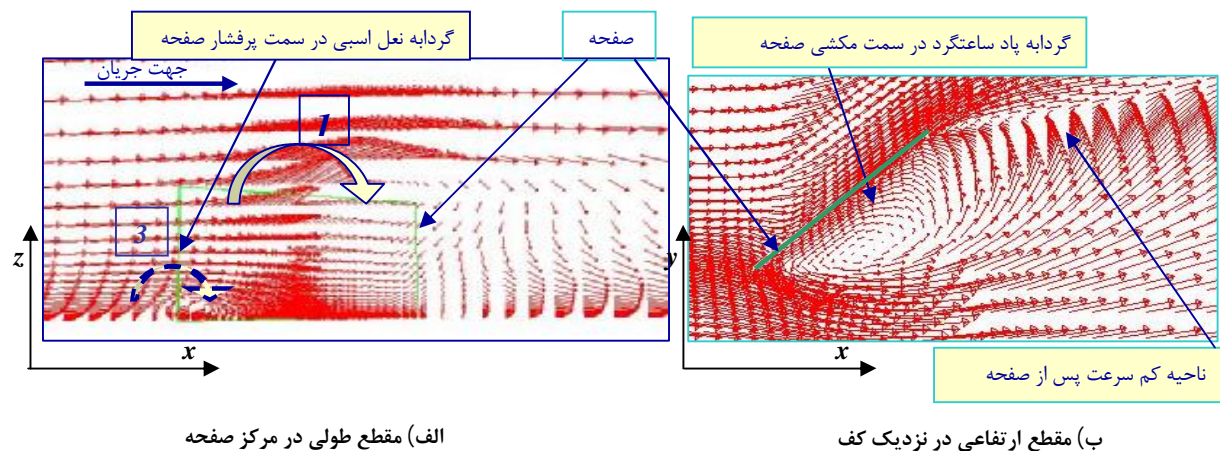
1. تا زمانی که جریان با صفحه برخورد نکند هیچ نوع جریان ثانویه ای شکل نمی گیرد.
2. با برخورد جریان به صفحه و تشکیل جریان ثانویه، این جریان در طول صفحه قدرت گرفته و با عبور از انتهای صفحه در فاصله ای حدود 3 برابر ارتفاع صفحه به آرامی شروع به ضعیف شدن می نماید و پس از آن با سرعت بیشتری افول می کند.
3. میانگین قدرت جریان ثانویه به ازای زاویه 40°، از محل برخورد جریان با صفحه تا فاصله حدود سه برابر ارتفاع صفحه نسبت به سایر زوایا بیشتر است، لذا صفحه با زاویه 40° به عنوان زاویه بهینه شناخته شده است.

الگوی جریان حول صفحه با زاویه 40° در مسیر مستقیم

شکل (5) و شکل (3-الف) بردارهای سرعت در مقاطع طولی، ارتفاعی و عرضی کانال را نشان می دهد. با برخورد ضربه ای جریان به صفحه، جریان به دو قسمت تقسیم شده، بخشی به سمت تاج و بخشی به سمت کف منحرف می شود. جریان سطحی به علت اختلاف فشار موجود در دو سمت صفحه، از سمت پر فشار به سمت کم فشار حرکت می کند و یک گردابه حول محور طولی صفحه تشکیل می دهد (گردابه 1) که بررسی بردارهای سرعت تا مقاطع طولی در انتهای کانال نشان داده است اثر این گردابه بر جریان هنوز از بین نرفته، لذا صفحه تا فاصله 20 برابر ارتفاع خود بر جریان تأثیرگذار است. جریان منحرف شده به سمت کف نیز تشکیل گردابه ای می دهد که به دو شاخه تقسیم می شود و به گردابه نعل اسبی مشهور است [7]، زیرا بخشی از آن تحت تأثیر مکش سمت کم فشار، به آن سمت منحرف شده و ذرات سمت پرفشار را در کف به سمت بالادست جریان حرکت می دهد، اما قسمت بیشتر این جریان به سمت پایین دست در حرکت است که برای کف با رسوب منجر به تشکیل حفره آبستگي در سمت پرفشار صفحه می شود (گردابه 3). بررسی بردارهای سرعت در مقاطع طولی پایین دست صفحه نشان داده است اثر این گردابه تا فاصله چهار برابر ارتفاع صفحه در پایین دست وجود دارد (برای رعایت اختصار از ارائه شکل‌های بیشتر خودداری شده است).

بخشی از جریان که به سمت کم فشار منحرف می شود تحت اثر مکش موجود در این سمت و همچنین به علت کم بودن مومنتم طولی ناشی از اثر کف، جریان گردابی حول محور قائم در سمت کم فشار ایجاد می کند. محدوده این گردابه در طول صفحه گسترده است و قدرت آن به حدی است که بخشی از مومنتم طولی جریان پایین دست صفحه را می گیرد و یک ناحیه کم سرعت در امتداد انتهای پایین دست صفحه بوجود می آورد (شکل 5-ب). بررسی بردارهای سرعت در مقاطع مختلف در ترازهای مختلف نشان داده است تا تراز دو سوم ارتفاع صفحه این گردابه وجود دارد اما پس از آن به علت زیاد شدن مومنتم طولی کم کم از عرض آن کاسته شده و در تراز تاج صفحه کاملاً مستهلک می شود اما ناحیه کم سرعت پس از صفحه تا تراز 1/5 برابر ارتفاع صفحه وجود دارد و پس از آن اثر صفحه روی جریان از بین می رود. لذا صفحه تا ارتفاع 1/5 برابر خود از عمق جریان را تحت تأثیر قرار می دهد و بر ترازهای بالاتر اثری ندارد.

علاوه بر دو گردابه فوق یک گردابه در خلاف جهت گردابه (1) در نزدیک کف سمت کم فشار در انتهای صفحه شکل گرفته است (گردابه 2) که علت آن می تواند مکش سمت کم فشار روی جریان پس از صفحه باشد که در فاصله دو برابر ارتفاع صفحه پس از آن، با کم شدن مکش سمت کم فشار روی جریان پس از صفحه، مستهلک می شود.

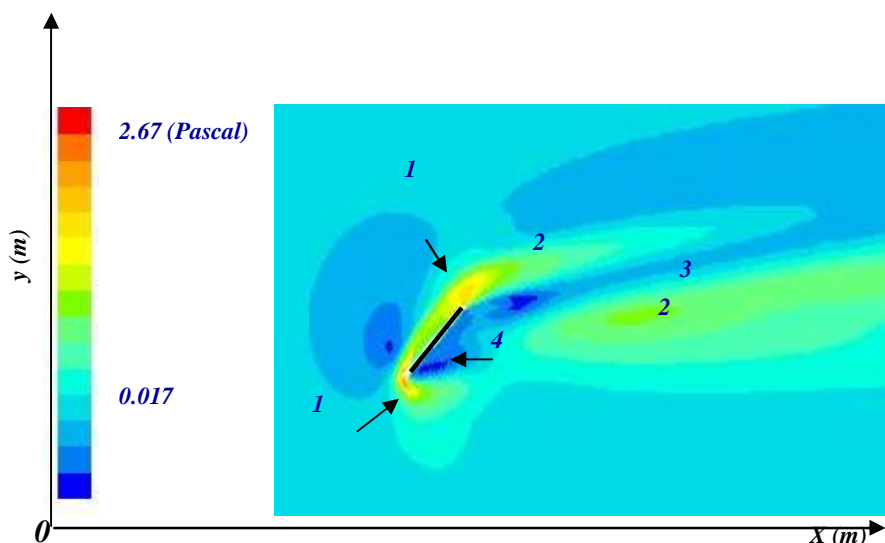


شکل 5- بردارهای سرعت در مقاطع مختلف

بررسی تنش برشی در کف کانال

جهت بررسی کیفی تأثیر صفحه بر تغییرات احتمالی ایجاد شده در بستر، توزیع تنش برشی تعیین و در شکل (6) نشان داده شده است. مطابق شکل می توان 4 ناحیه مختلف را در اطراف صفحه در نظر گرفت. ناحیه 1 که حداکثر تنش برشی را داراست در لبه های بالادست و پایین دست صفحه واقع است و یک حفره آبستگي را در سمت پر فشار صفحه ایجاد می کند. ناحیه 2 که به علت حضور گردابه های پادساعتگرد دو سمت صفحه دارای تنش برشی قابل توجهی است و در کف با رسوب منطقه محتمل آبستگي می تواند باشد. مطابق شکل گردابه های سمت پرفشار در فاصله کمی پس از صفحه از بین رفته و گردابه سمت کم فشار باقی می ماند بدان علت که گردابه سمت پر فشار در نزدیکی کف شکل می گیرد و در نتیجه به علت اثر تنشهای برشی کف سریعتر مستهلک میشود اما گردابه سمت کم فشار بالاتر از تراز کف شکل میگیرد و تنش برشی کف اثری در استهلاک آن ندارد. ناحیه 3 که ناحیه کم سرعت پس از صفحه است که در قسمت قبل در مورد آن بحث شد و ناحیه 4 که منطقه جدایی جریان در سمت کم فشار صفحه است و دارای حداقل تنش برشی است. نواحی با حداقل تنش برشی نواحی محتمل رسوبگذاری هستند. در صورتی که زاویه برخورد جریان با صفحه حالت بهینه

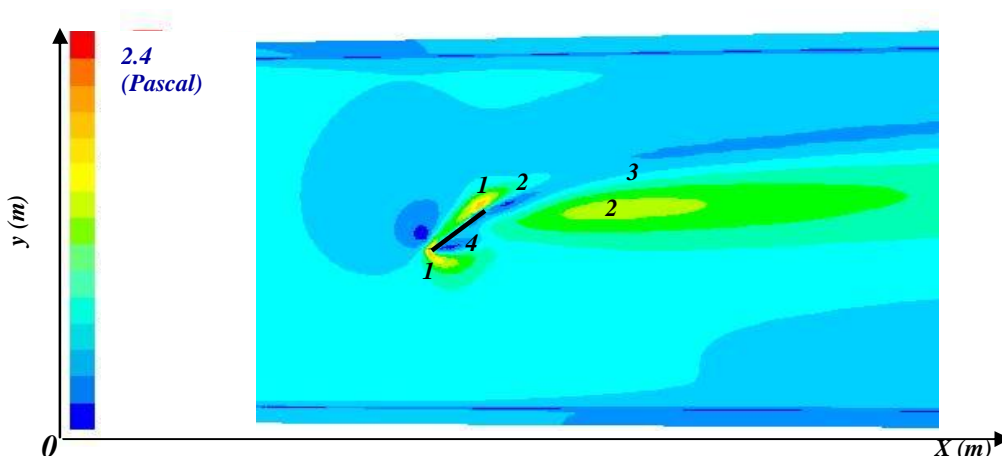
نباشد و یا مومنتم جریان به حدی باشد که ناحیه جدایی جریان در سمت کم فشار خلیس گسترده باشد و یا ابعاد صفحه بهینه نباشد، امکان تشکیل پشته رسوبی در سمت کم فشار وجود خواهد داشت در این صورت صفحه مانعی در برابر جریان عمل می کند. لذا تعیین ابعاد بهینه صفحه نسبت به شرایط هیدرولیکی جریان نیز از اهم موارد در طراحی این سازه می باشد.



شکل 6- کانتور تنش برشی حول صفحه در کف کانال مستطیلی (مدل آشفتگی *RSM*)

مقایسه عملکرد دو مدل آشفتگی *k-ε* و *RSM*

به منظور بررسی اثر مدل آشفتگی *k-ε* روی الگوی جریان، الگوی جریان با استفاده از مدل آشفتگی *k-ε* نیز شبیه سازی شد. همانطور که قبلاً اشاره شد سینهها و مریلیوس در مدل عددی خود از مدل آشفتگی *k-ε* استفاده کردند، اما نتایجی که تاکنون در این مقاله ارائه شد با استفاده از مدل آشفتگی *RSM* بود که به خوبی با نتایج مدل آزمایشگاهی ایشان مطابقت دارد. با بررسی نتایج ملاحظه شد که مدل آشفتگی *k-ε* قادر است تمامی گردابه هایی را که مدل آشفتگی *RSM* پیش بینی کرده است، پیش بینی کند، به غیر از گردابه 2 در شکل 3-الف. در مدل *RSM* گردابه 2 از لبه پایین دست صفحه شروع شده و در مقطعی به فاصله دو برابر ارتفاع صفحه پس از آن مستهلک شده است. اما در مدل آشفتگی *k-ε* گردابه ای تشکیل نشده است. از طرفی با مقایسه کانتور تنش برشی در کف کانال برای هر دو مدل آشفتگی (مقایسه شکل های 6 و 7)، ملاحظه میشود مدل *k-ε* مقادیر کمتری را برای تنش برشی محاسبه می کند، همچنین گستردگی ناحیه 2 برای این مدل کمتر از نتایج مدل *RSM* است که نشان دهنده شدت کمتر گردابه های پیش بینی شده در مدل *k-ε* و زوال سریعتر گردابه های 1 و 3 در این مدل است.



شکل 7- کانتور تنش برشی حول صفحه در کف کانال مستطیلی (مدل آشفتگی *k-ε*)

نتیجه گیری

با شبیه سازی الگوی جریان حول یک صفحه در بستر صلب یک کانال مستطیلی با استفاده از نرم افزار فلوئنت نتایج زیر بست آمده است:

- ۱- زاویه بهینه نصب صفحه در یک کانال مستطیلی مستقیم به منظور حصول به حداکثر جریان ثانویه و در نتیجه حداکثر تنش برشی در کف کانال و حول صفحه، 40 درجه است.
- ۲- الگوی جریان حول یک صفحه با زاویه برخورد زیاد شامل دو گردابه پادساعتگرد حول محور طولی صفحه یکی گردابه نزدیک تاج صفحه که جریان در فاصله 20 برابر ارتفاع صفحه پس از صفحه را تحت تأثیر قرار می دهد و دیگری گردابه سمت پر فشار و نزدیک کف که در اثر برخورد جریان با ضربه به صفحه ایجاد شده و به گردابه نعل اسبی مشهور است. این گردابه دو پایه گردابه خلاف جهت هم به سمت پایین دست و بالادست دارد. پایه رو به پایین دست در فاصله چهار برابر ارتفاع صفحه پس از صفحه بتدریج مستهلک می شود اما پایه رو به بالادست در اثر مکش سمت کم فشار تبدیل به گردابه حول محور قائم صفحه در سمت کم فشار می شود که در تراز تاج صفحه مستهلک می شود. علاوه بر دو گردابه فوق یک گردابه ساعتگرد در انتهای صفحه به علت مکش اعمالی از سمت کم فشار بر جریانی که لبه پایین دست صفحه را در سمت پر فشار ترک می کند، در سمت کم فشار وجود دارد که در فاصله حدود دو برابر ارتفاع صفحه پس از آن مستهلک می شود.
- ۳- مدل آشفتگی $K-\epsilon$ برخلاف مدل آشفتگی RSM به علت در نظر نگرفتن معادلات انتقال برای تنشهای رینولدز قادر به شبیه سازی کامل الگوی جریان حول صفحه نیست.

مراجع

1. Wang, y. Odgaard, J. et al. (1996) *Sediment control at water intakes. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 122, No. 6. 353-356.*
2. Neill, R. and Evans, J. (1997) *Sediment control at water intakes. Journal of hydraulic engineering, July, 670-671.*
3. Barkdoll, R and Ettema and Odgaard, A.J. (1999) *Sediment control at lateral diversions: limits and enhancement to vane use. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 125, No. 8, 132-136.*
4. Voisin, A. and Townsend, R.D. (2002). *Model testing of submerged vanes in strongly curved narrow channel bends. Journal of Civil Engineering, 29, 37-49*
5. Soon-Keat, Tan. and Guoliang et al. (2005) *Flow structure and sediment motion around submerged vanes in open channel. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE. Vol. 131, No. 3, 132-136.*
6. Gupta, P and Sharma, N. (2007) *Performance evaluation of tapered vane". Journal of Hydraulic Research. Vol. 45, No.4, 472-477.*
7. Marelius, F and Sinha, K. (1998). *Experimental investigation of flow past submerged vanes. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 124, No.5, 542-546.*
8. Marelius, F and Sinha, K. (2000). *Analysis of flow past submerged vanes". Journal of Hydraulic Research, Vol. 38, No. 1, 65-71.*
9. *Fluent Inc. January 11, 2005. Fluent User's Guide.*