

## مقایسه کاربرد مدل‌های آشفتگی در پیچ تند یک آبراهه آزمایشگاهی با نرم‌افزار سه‌بعدی فلونت

جواد مظفری<sup>۱\*</sup>، اسدالله محسنی موحد<sup>۲</sup> و داود داوودمقامی<sup>۳</sup>

### چکیده

بیشتر رودخانه‌ها در طبیعت پیچان‌رود بوده و همیشه در حال فرسایش در ساحل خارجی و رسوب‌گذاری در ساحل داخلی پیچ‌ها هستند. بنابراین شناخت الگوی جریان و مکان‌های فرسایش و رسوب‌گذاری در پیچ‌ها مهم است. در این پژوهش، به بررسی مدل‌های ریاضی آشفتگی با نرم‌افزار فلونت پرداخته خواهد شد تا مدل‌هایی که با داده‌های آزمایشگاهی هماهنگی مناسبی دارند، برای استفاده در پیچ‌های مختلف رودخانه‌ای معرفی شوند. داده‌های آزمایشگاهی مورد استفاده، کانالی با پیچ تند بوده که در دانشگاه EPFL سوئیس قرار دارد. برای بررسی مدل‌های آشفتگی، از پارامترهای متوسط‌گیری شده در عمق استفاده شد. همچنین برای بررسی کمی مدل‌ها، تعدادی پروفیل سرعت طولی مدل عددی انتخاب شده و با پروفیل‌های آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده مقایسه شد. نتایج بررسی سرعت طولی متوسط‌گیری شده در عمق نشان داد که مدل‌های  $K - \omega$ ،  $RSM$  و  $K - \epsilon$  توانایی تعیین دقیق نقاط مهم جریان را ندارند. این مدل‌ها، منطقه جدا شدگی جریان را در زاویه ۹۰ درجه نشان می‌دهند در حالی که اندازه‌گیری‌ها این منطقه را در زاویه ۷۵ درجه مشخص کرده است. اما مدل LES به صورت مناسبی منطقه جداشدگی را نشان می‌دهد و موقعیت‌های بیشینه سرعت طولی متوسط‌گیری شده در عمق را نیز بهتر از سه مدل دیگر مشخص می‌کند. مقایسه کمی پروفیل‌های سرعت نشان داد که مدل LES خطای کمتری از دیگر مدل‌ها دارد و می‌تواند به عنوان مدل مناسب برای بررسی الگوی جریان در پیچ آبراهه‌ها استفاده شود.

**واژه‌های کلیدی:** پیچ تند، پارامتر متوسط‌گیری شده در عمق، مدل آشفتگی، نرم‌افزار فلونت.

**ارجاع:** مظفری ج. محسنی موحد ا. و داوودمقامی د. ۱۳۹۶. مقایسه کاربرد مدل‌های آشفتگی در پیچ تند یک آبراهه آزمایشگاهی با نرم‌افزار سه‌بعدی فلونت. مجله پژوهش آب ایران. ۲۴: ۱۲۹-۱۳۸.

۱- استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اراک.

۲- استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اراک.

۳- کارشناس گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اراک.

نویسنده مسئول: [Javad\\_370@yahoo.com](mailto:Javad_370@yahoo.com)

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۹/۱۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۲/۰۳

## مقدمه

نسبت شعاع به عرض بزرگ‌تر از ۳ پرداختند. همچنین پژوهش‌های بویج (۲۰۰۳)، درگاهی (۲۰۰۴) و کانگ و چوی (۲۰۰۶) نشان دادند که مدل  $k-\epsilon$  دارای محدودیت‌هایی در پیش‌بینی صحیح جریان ثانویه است و تخمین کمتری از وسعت ناحیه جداسازی دارد. برای شناخت الگوی جریان در پیچ‌ها، باید آزمایش‌های بسیار زیادی را در پیچ‌های مختلف انجام داد که غیر ممکن است. با توجه به وجود فرسایش و تخریب زیاد در ساحل خارجی پیچ‌ها و امکان تخریب تأسیسات و اراضی کشاورزی اطراف آن و نیاز به انجام صحیح حفاظت از سواحل و همچنین نیاز به شناخت مکان مناسب برای دهانه آبیگر با کمترین رسوب ورودی، شناخت الگوی جریان ضروری به نظر می‌رسد. بنابراین، هدف اصلی اجرای این پژوهش، بررسی و مقایسه توانایی مدل‌های آشفتگی در شناخت الگوی جریان در پیچ‌ها است تا با آزمایش‌های کمتر و استفاده از این مدل‌ها برای شرایط مختلف، الگوی جریان را تعیین کرد.

## مواد و روش‌ها

کانال آزمایشگاهی که از داده‌های آن برای مقایسه با مدل استفاده شد، در دانشگاه EPFL قرار گرفته است. شعاع خط مرکزی  $R$  برابر  $1/7$  متر است که بیانگر نسبت  $R/B$  برابر با  $1/3$  متر و نشان‌دهنده یک خم با پیچ تند می‌باشد. جدول ۱ خلاصه‌ای از شرایط آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. در این جدول  $S_f$  شیب خط انرژی یا شیب پروفیل سطح آب و  $Re^*$  رینولدز ذره است. در این کانال رسوبات به قطر ۲ میلی‌متر به داخل کانال تزریق شد تا کف کانال به یک توپوگرافی توسعه یافته رسید. سپس به وسیله موادی به نام داکفیل<sup>۱</sup>، برای تثبیت رسوبات استفاده شد تا امکان اندازه‌گیری سرعت فراهم شود. این مواد تأثیری بر زبری کف نگذاشته به طوری که زبری‌ها به خوبی قابل مشاهده بود. اندازه‌گیری سرعت نیز با دستگاه ADVP<sup>۲</sup> انجام شد. شکل ۱ کانال آزمایشگاهی استفاده شده را نشان می‌دهد.

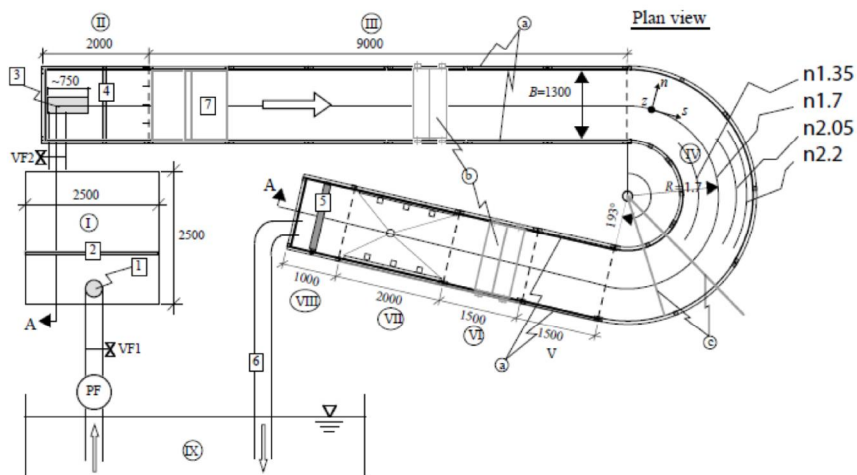
تغییرات در پیچ رودخانه‌ها و فرسایش دیواره و کف آن‌ها، سبب حرکت و مهاجرت پیچ رودخانه و تخریب تأسیسات اطراف آن و اراضی کشاورزی و ایستگاه‌های پمپاژ می‌شود که نشان‌دهنده نیاز به شناخت الگوی جریان و مکان بیشینه جریان ثانویه و تنش برشی در پیچ با مدل‌های ریاضی است. صفرزاده (۱۳۸۵) برای بررسی الگوی جریان در آبیگر جانبی از نرم‌افزار فلوئنت استفاده کرده است. او برای شبیه‌سازی آشفتگی از مدل‌های دو معادله‌ای  $k-\epsilon$  استاندارد و  $k-\omega$  استفاده کرده و عملکرد مدل  $k-\omega$  را در پیش‌بینی نواحی گردابه‌ای و جدایی جریان، بهتر از مدل  $k-\epsilon$  ارزیابی کرده است. ناحیه جدایی جریان یا منطقه جداسازی، ناحیه‌ای است که جریان از ساحل داخلی جدا شده و به سمت ساحل خارجی حرکت می‌کند و سبب ایجاد الگوی قوی جریان ثانویه، ایجاد فرسایش و حوضچه در ساحل خارجی و همچنین ایجاد رسوب‌گذاری یا بارنقطه‌ای در ساحل داخلی می‌شود. شناخت دقیق مکان این ناحیه سبب ایجاد حفاظت صحیح از مناطق ساحلی رودخانه و شناخت مکان مناسب دهانه آبیگر با کمترین رسوب ورودی می‌شود. امیدبگی (۱۳۸۸) به بررسی عددی ساختار سه بعدی جریان در آبیگر جانبی پرداختند. آزمایش‌ها در یک تقاطع  $T$  شکل حاصل از برخورد دو کانال مستطیلی با نسبت عرض کانال آبیگر به کانال اصلی ۴۰ درصد انجام شد. ایشان برای مدل‌سازی آشفتگی از مدل‌های  $k-\epsilon$  و  $k-\omega$  و  $RSM$  استفاده کردند. مقایسه نتایج به دست آمده از مدل‌های آشفتگی با نتایج آزمایشگاهی نشان داد که الگوی نتایج داخل کانال اصلی با هر سه مدل به خوبی پیش‌بینی شده اما در کانال آبیگر  $RSM$  نسبت به دو مدل دیگر بهتر عمل کرده و قابلیت مدل  $k-\omega$  نیز بیشتر از مدل  $k-\epsilon$  بوده است. شاملو و پیرزاده (۱۳۸۹) به بررسی ناحیه جدایی جریان در آبیگر جانبی پرداختند و گفتند مدل آشفتگی  $RSM$  به دلیل عدم اعمال محدودیت هموزنی لزجت گردابه‌ای در پیش‌بینی الگوی جریان بهتر از سایر مدل‌های به کار رفته عمل می‌کند. هان (۲۰۱۰) به بررسی سه مدل  $k-\epsilon$ ,  $RNG$ ,  $LES$  و  $RSM$  در یک پیچ تند ۹۰ درجه پرداخت و نتیجه گرفت که مدل  $RSM$  هماهنگی مناسبی را با مقدار آزمایشگاهی دارد. ون بالن و همکاران (۲۰۰۹) به بررسی مدل  $LES$  در پیچ ملایم با

1- Dakfill

2- Acoustic Doppler Velocity Profiler

جدول ۱- مشخصات جریان در کانال

| Q(l.s <sup>-1</sup> ) | H(m)  | U(ms <sup>-1</sup> ) | u* (ms <sup>-1</sup> ) | S <sub>r</sub> | Re(-) | Fr  | R/B  | R/H | B/H | Re* |
|-----------------------|-------|----------------------|------------------------|----------------|-------|-----|------|-----|-----|-----|
| ۶۳                    | ۰/۰۹۸ | ۰/۴۹                 | ۰/۰۵۶                  | ۰/۰۰۴          | ۴۳۰۰۰ | ۰/۵ | ۱/۳۱ | ۱۷  | ۱۳  | ۱۸۷ |



شکل ۱- کانال آزمایشگاهی استفاده شده برای انجام آزمایش‌ها

### شبکه‌بندی کانال محاسباتی

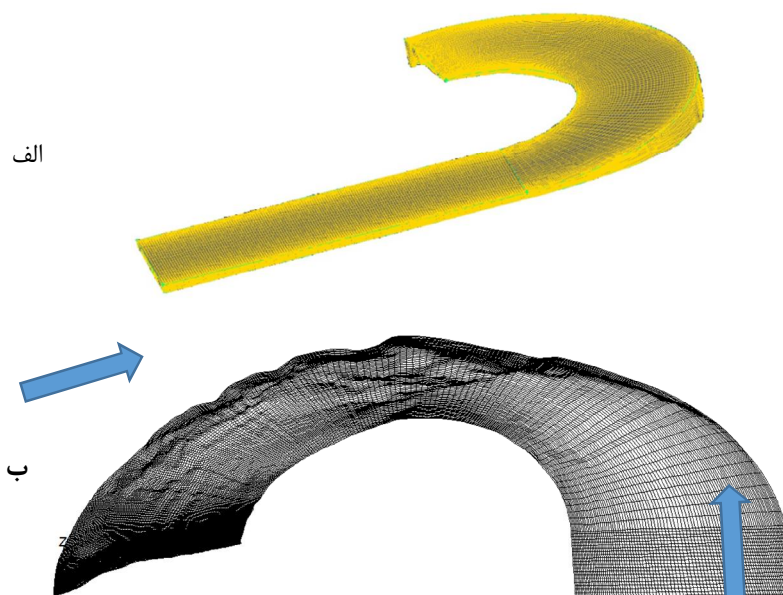
برای اجرای نرم‌افزار فلونت ابتدا باید شبکه جریان ساخته شود. برای شبکه‌سازی از نرم‌افزار GAMBIT استفاده شد. در نزدیک دیواره، شبکه محاسباتی تا اندازه‌ای که در نرم‌افزار GAMBIT امکان داشت و ایجاد حجم منفی نمی‌کرد، ریز شده بود. با توجه به تغییر عمق در طول کانال و تعداد ثابت گره‌های موجود در شبکه‌بندی، فاصله اولین گره از دیواره متغیر است اما به هر حال این فاصله طوری در نظر گرفته شد،  $Y^+$  بیشتر از ۳۰ شده و در محدوده لایه انتقالی<sup>۲</sup> قرار نگیرد تا معادلات به جواب صحیح برسند.  $Y^+ = U_* y / \nu$  برای محدوده لایه بافر بین ۵ تا ۳۰ و برای زیرلایه لزوج کمتر از ۵ است. همچنین جریان به‌طور کامل زبر بوده و زیرلایه لزوج وجود نخواهد داشت. بنابراین،  $Y^+$  نباید کمتر از ۵ باشد. در این پژوهش ۹۱۰ هزار گره محاسباتی در نرم‌افزار تشکیل شده است. شکل ۲ کانال را با شبکه محاسباتی نشان می‌دهد. در این شبکه محاسباتی ۶۵ گره در عرض کانال، ۳۵ گره در ارتفاع و ۴۰۰ گره در طول کانال ایجاد شده است. در مرحله بعد، شبکه محاسباتی وارد فلونت می‌شود.

### مدل‌های آشفتگی در نرم‌افزار فلونت

نرم‌افزار فلونت برای اجرا و شبیه‌سازی الگوی سه بعدی جریان به‌کار می‌رود. مدل‌های مختلف آشفتگی در این نرم‌افزار وجود دارد که هر یک از این مدل‌ها دارای انشعاباتی هستند. مدل‌های  $k-\epsilon$  موجود در فلونت عبارتند از: STANDARD, RNG و REALIZABLE که با توجه به توصیه موجود در نرم‌افزار، برای جریان‌های دارای انحناء از مدل  $k-\epsilon$  RNG استفاده خواهد شد. مدل‌های  $k-\omega$  موجود در نرم‌افزار فلونت عبارت از STANDARD و SST که در این پژوهش با توجه به مشابهت این دو مدل و عدم توصیه نرم‌افزار و همچنین پژوهش‌های موجود برای برتری یکی از آنها، از مدل STANDARD استفاده شده است. همچنین مدل هفت معادله‌ای تنش رینولدز RSM مدل دیگر از سری مدل‌های RANS یا متوسط‌گیری زمانی شده است که در این پژوهش به کار رفته است. آخرین مدل استفاده شده، مدل LES<sup>۱</sup> است. این مدل با مدل‌سازی گردابه‌های بزرگ، الگوی جریان را تعیین می‌کند. بنابراین مدلی با هزینه‌های اجرایی کمتر از روش DNS و هزینه‌های اجرایی بیشتر از مدل‌های RANS است.

2- Buffer layer

1- Large eddy simulation



شکل ۲- الف) شبکه محاسباتی و ب) توپوگرافی کف ایجاد شده در نرم‌افزار گمبیت

برابر ۰/۰۰۶۷ قرار داده می‌شود.

۴) Surface: برای سطح آب، شرط مرزی تقارن<sup>۱</sup> قرار داده شده است. بدین معنی که سرعت عمودی در سطح آب، صفر در نظر گرفته می‌شود. در پیچ‌ها به دلیل تغییرات موجود در سطح آب که با نیروی گریز از مرکز ایجاد می‌شود، سطح آب در دیواره خارجی بالاتر از دیواره داخلی است و در نظر گرفتن یک سطح آب با ارتفاع ثابت می‌تواند خطا ایجاد کند. به هر حال در پژوهش‌هایی که از سوی ون بالن و همکاران (۲۰۰۹) روی پیچ‌های ملایم و تند انجام شد، بیان گردید که مقدار این خطا کم و در بیشینه حالت آن، کمتر از ۱۰ درصد است و تأثیر آن روی الگوی جریان، قابل صرف‌نظر کردن است. شایان ذکر است که برای از بین بردن خطای مذکور در شبکه محاسباتی، از سطح آب اندازه‌گیری شده استفاده شد. بدین ترتیب شبکه محاسباتی در فضای واقعی بین توپوگرافی توسعه یافته و سطح واقعی آب طراحی شده است.

### نتایج و بحث

کمیت‌های متوسط‌گیری شده در عمق به طور معمول برای تشریح سیمای عمومی میدان جریان و توزیع سرعت در جریان‌های سه بعدی پیچیده استفاده می‌شوند. شکل ۳، الگوی آزمایشگاهی سرعت طولی متوسط‌گیری شده در

ارتفاع زبری کف، برابر با ۰/۰۰۶۷ متر بر اساس روابط ون‌راین (۱۹۸۴) در نظر گرفته شد. براساس این رابطه زبری بستر برابر است با:

$$K_s = 3d_{50} + 1.1\Delta(1 - e^{-25\Delta/\lambda}) \quad (1)$$

که  $\Delta$  ارتفاع دیون‌ها و  $\lambda$  طول دیون‌ها است. همچنین  $\lambda = 7.3h$  که  $h$  برابر با عمق آب است. ارتفاع دیون‌ها عبارت است از:

$$\frac{\Delta}{h} = 0.11 \left(\frac{d_{50}}{h}\right)^{0.3} (1 - e^{-0.5T})(25 - T) \quad (2)$$

$$T = \frac{(u_*')^2 - (u_{*c})^2}{(u_{*c})^2} \quad (3)$$

$u_{*c}$  سرعت برشی بحرانی از دیاگرام شیلدز به دست می‌آید و  $u_*' = \bar{u}\sqrt{g/C'}$  است.  $\bar{u}$  سرعت متوسط جریان و  $C'$  ضریب شزی ذره بوده و برابر است با:

$$C' = 18 \log(12R_b/3d_{90}) \quad (4)$$

که  $R_b$  شعاع هیدرولیکی است.

شرایط مرزی نیز در زیرآمده است:

۱) Input: برای ورودی شرط مرزی mass-flow-inlet یا

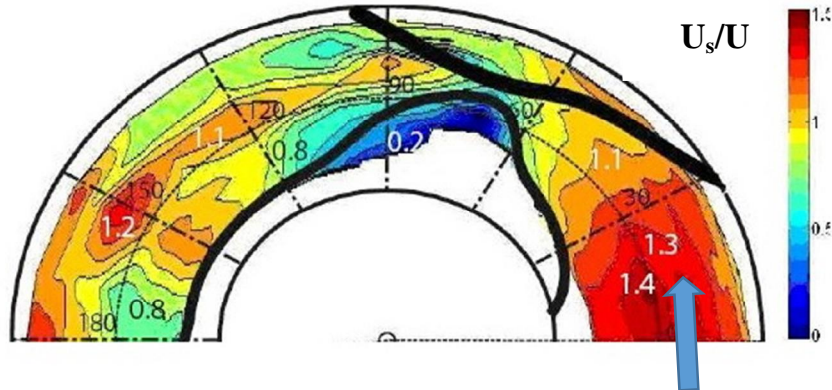
دبی جرمی ورودی در نظر گرفته شده است.

۲) Output: شرط خروجی Pressure-outlet قرار داده می‌شود.

۳) Wall: برای دیواره خارجی و داخلی که از جنس پلکسی گلاس هستند، شرط مرزی wall در نظر گرفته شده و زبری آن برابر زبری PVC است. زبری کف نیز

جریان تا در حدود مقطع عرضی ۳۰ درجه دارای جداسدگی از دیواره داخلی نیست. منطقه جداسدگی بین ۳۰ و ۱۲۰ درجه، می‌باشد و دارای بیشینه عرض در حدود ۷۵ درجه است که در حدود ۶۰ درصد عرض کل است.

عمق که با سرعت متوسط جریان نرمالیزه شده ( $U_s/U$ ) است را نشان می‌دهد. خطوط ضخیم سیاه رنگ در ساحل خارجی نشان‌دهنده محل تشکیل حوضچه و در ساحل داخلی محل تشکیل پشته رسوبی است.

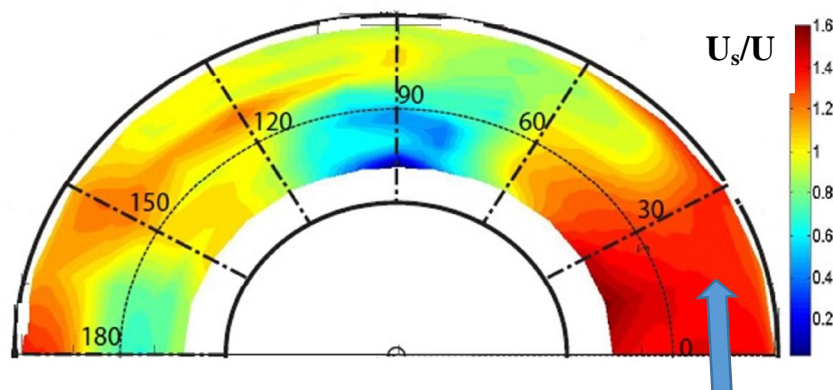


شکل ۳- تغییرات آزمایشگاهی سرعت طولی متوسط‌گیری شده در عمق  $U_s/U$

در نزدیک ساحل داخلی است اما برای الگوی اندازه‌گیری شده در میانه کانال است. همچنین سرعت بیشینه در حدود ۳ درصد در مقدار پیش‌بینی شده بیشتر از مقدار اندازه‌گیری شده است. در بین مقطع ۳۰ تا ۶۰ درجه اندازه‌گیری نشان‌دهنده حرکت سرعت بیشینه به سمت ساحل خارجی است که مدل نتوانسته این الگو را به صورت مناسب پیش‌بینی کند. مقطع ۶۰ تا ۹۰ درجه مکانی است که یکی از بخش‌های مهم پیش‌بینی جریان باید در آن رخ دهد. منطقه جداسدگی جریان در این فاصله اندازه‌گیری شده است و به طور تقریبی در حدود مقطع عرضی ۷۵ درجه بیشترین مقدار جداسدگی وجود دارد. این در حالی است که مدل بیشترین مقدار جداسدگی را در ۹۰ درجه نشان می‌دهد که نشان‌دهنده تفاوت ۱۵ درجه‌ای بین پیش‌بینی و اندازه‌گیری است. در مقطع ۹۰ تا ۱۲۰ درجه غیر از بخش جدا شدگی که به صورت صحیح پیش‌بینی نشده است، با حرکت به سمت ساحل خارجی پیش‌بینی‌ها مناسب‌تر شده و به طور تقریبی الگوی یکسانی را با اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد. در مقطع ۱۲۰ تا ۱۵۰ درجه نیز الگوی جریان به طور تقریبی مناسب پیش‌بینی شده است و بخش نهایی که بین ۱۵۰ تا ۱۸۰ درجه قرار دارد حرکت هسته بیشینه پیش‌بینی شده به سمت ساحل خارجی بوده که مانند الگوی اندازه‌گیری شده است.

### بررسی و مقایسه الگوهای متوسط‌گیری شده در عمق

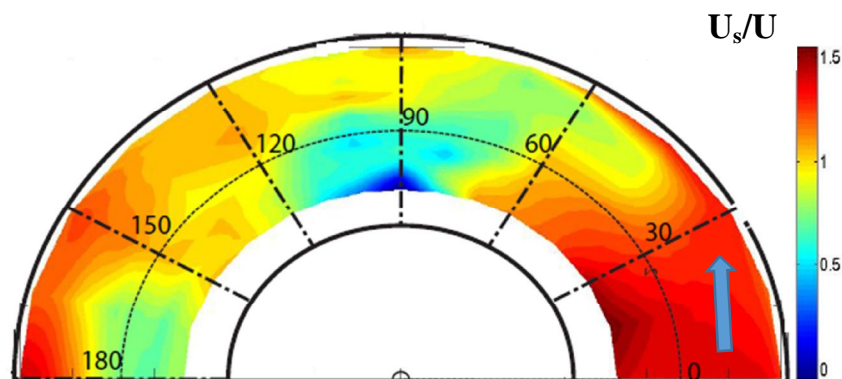
الگوهای متوسط‌گیری شده در عمق به صورت مستقیم از نرم‌افزار فلونتت به دست نمی‌آیند. برای تعیین این الگوها در ابتدا پروفیل‌های سرعت طولی در موقعیت‌هایی از کانال که در آزمایشگاه نیز اندازه‌گیری شده بود به دست آمد. اندازه‌گیری‌ها برای دبی ۶۳ لیتر بر ثانیه در درون پیچ در ۱۶ مقطع عرضی صفر، ۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۰، ۸۰، ۹۰، ۱۰۰، ۱۱۰، ۱۲۰، ۱۳۵، ۱۵۰، ۱۶۵، ۱۸۰ و ۱۹۳ درجه، در بخش مستقیم بالادست در ۰/۵ و ۲/۵ متر از ابتدای خم و در بخش مستقیم پایین دست در ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ متر از انتهای خم انجام شد. در مرحله بعد از نقاط موجود در هر پروفیل سرعت میانگین‌گیری وزنی شد تا مقدار متوسط‌گیری شده آن در عمق به دست آید. شکل ۴ سرعت طولی متوسط‌گیری شده را که با مدل  $K - \epsilon$  پیش‌بینی شده است، نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که هسته بیشینه سرعت در زاویه ۹۰ درجه به ساحل خارجی نزدیک شده و پس از آن شروع به حرکت به سمت ساحل داخلی کرده و در ۱۵۰ درجه دوباره به سمت ساحل خارجی برمی‌گردد و در خروجی خم به طور کامل به ساحل خارجی می‌رسد. مقایسه دو الگوی جریان اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده نشان می‌دهد که سرعت بیشینه در این فاصله برای الگوی پیش‌بینی شده



شکل ۴- سرعت طولی متوسط‌گیری شده در عمق  $U_s/U$  - پیش‌بینی شده با مدل  $K-\varepsilon$

شده است. در سمت ساحل خارجی در مقطع ۹۰ درجه یک هسته بیشینه سرعت پیش‌بینی شده که در مقدار اندازه‌گیری شده این مقدار بیشینه تا حدودی از دیوار خارجی فاصله دارد. از مقطع عرضی ۹۰ تا ۱۲۰ درجه این روند در مقدار پیش‌بینی شده ادامه دارد و بر خلاف مقادیر اندازه‌گیری شده که بیشینه سرعت با ساحل خارجی تا حدودی فاصله دارد، در مقادیر پیش‌بینی شده در کنار ساحل خارجی است. پیش‌بینی مدل همچنان هسته بیشینه را در ساحل خارجی نشان می‌دهد و این روند تا خروجی پیچ نیز ادامه دارد.

شکل ۵ الگوی جریان متوسط‌گیری شده در عمق که با مدل  $K-\omega$  به دست آمده است را نشان می‌دهد. بررسی کلی شکل ۵ نشان می‌دهد که تفاوت چندانی بین الگوی پیش‌بینی شده این مدل با مدل  $K-\varepsilon$  وجود ندارد. مدل  $K-\omega$  نیز ناحیه جداسازی جریان را در مقطع عرضی ۹۰ درجه نشان می‌دهد. در مقطع ورودی جریان به پیچ، هسته بیشینه سرعت در سمت چپ و متمایل به ساحل خارجی است که با الگوی پیش‌بینی شده متفاوت است. منطقه جداسازی نیز که تصور شکل‌گیری آن در مقطع عرضی ۷۵ درجه پیش‌بینی بود، در ۹۰ درجه پیش‌بینی



شکل ۵- سرعت طولی متوسط‌گیری شده در عمق - پیش‌بینی شده با مدل  $K-\omega$

نشده است. به هر حال تا حدودی الگوی جریان با مدل پیش‌بینی شده اما مهم‌ترین بخش که پیش‌بینی مناسب نداشته است بخش جداسازی جریان در مقطع عرضی ۷۵ درجه است.

شکل ۶ سرعت طولی متوسط‌گیری شده در عمق که با مدل هفت معادله‌ای تنش رینولدز پیش‌بینی شده است را

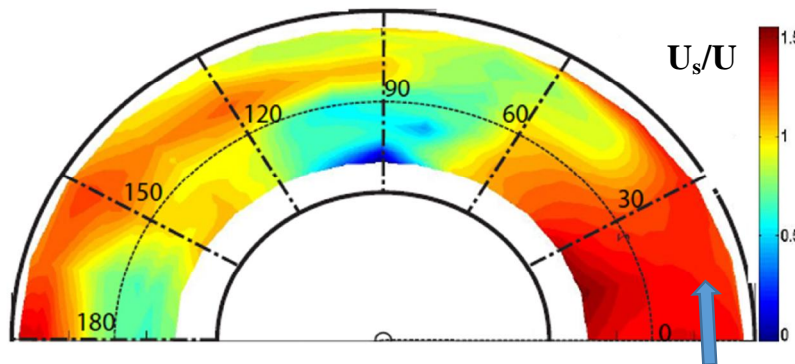
اما مقدار اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد که هسته بیشینه سرعت در ۱۵۰ درجه به ساحل خارجی نزدیک شده و پس از آن به ساحل خارجی رسیده و تا خروجی این وضع ادامه دارد. در مقطع عرضی ۱۵۰ درجه در دو نقطه بیشینه سرعت پیش‌بینی شده که مقدار بزرگ‌تر آن با ساحل خارجی فاصله دارد که به صورت مناسب پیش‌بینی



نشان می‌دهد.

مقایسه الگوی جریان پیش‌بینی شده به وسیله مدل RSM با دو مدل قبل نشان می‌دهد که الگوی به دست آمده بیشتر شبیه به الگوی  $K - \epsilon$  است اما ناحیه جدانشدگی کوچک‌تر بوده و تا حدودی به سمت مقطع عرضی ۸۰ درجه متمایل شده است. با توجه به شکل ۶ همچنان ناحیه بیشینه سرعت در مقطع بین ۰ تا ۳۰ درجه متمایل به سمت داخلی پیش‌بینی شده است اما همان‌طور که از قبل بیان شد ناحیه بیشینه سرعت اندازه‌گیری شده در مرکز قرار دارد. بین مقاطع عرضی ۳۰ و ۶۰ درجه سرعت بیشینه به سمت ساحل داخلی متمایل است که مقدار اندازه‌گیری شده به سمت ساحل خارجی بوده و متفاوت با پیش‌بینی است. ناحیه جدانشدگی همچنان در مقطع عرضی ۹۰ درجه پیش‌بینی شده است که تا حدودی به سمت ۸۰ درجه نیز حرکت کرده است اما هنوز با منطقه جدانشدگی که اندازه‌گیری شده به طور کامل متفاوت است. همچنین منطقه جدانشدگی اندازه‌گیری شده تا خط مرکزی کانال پیشروی کرده است اما مقدار پیش‌بینی شده در مدل فقط ناحیه کوچکی را در بر می‌گیرد. از مقطع عرضی ۱۲۰ درجه تا مقطع عرضی ۱۸۰ درجه مقدار بیشینه سرعت پیش‌بینی شده به سمت ساحل خارجی است و تا خروجی پیچ در ساحل خارجی جای گرفته است اما مقدار اندازه‌گیری شده آن تا حدودی متفاوت بوده است. شکل ۷، سرعت طولی متوسط‌گیری شده در عمق و پیش‌بینی شده با مدل LES را نشان می‌دهد. در این شکل نیز در مقطع ۰ تا ۳۰ درجه هسته بیشینه سرعت در سمت ساحل داخلی قرار دارد اما تا حدودی به سمت مرکز

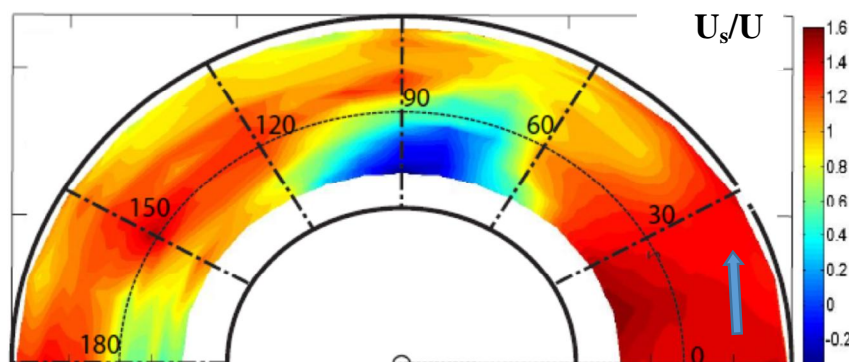
نیز متمایل شده است. بین مقطع عرضی ۳۰ تا ۶۰ پیش‌بینی جریان با LES، نشان می‌دهد که هسته مرکزی بیشینه سرعت به سمت ساحل خارجی حرکت کرده که با مقادیر اندازه‌گیری شده هماهنگی مناسبی را نشان می‌دهد. بیشینه منطقه جدانشدگی جریان که با مدل پیش‌بینی شده است به‌طور تقریبی در ۷۵ درجه قرار دارد که نزدیک به مقدار پیش‌بینی شده است. به هر حال، منطقه جدانشدگی جریان اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده با LES نزدیک به هم هستند. در حالی که بیشینه منطقه جدانشدگی در سه مدل قبلی که بر اساس ایده بوزینسک ارائه شده است در مقطع عرضی ۹۰ درجه قرار گرفته و با مقدار اندازه‌گیری شده هماهنگی ندارند اما منطقه جدانشدگی در مدل LES، متمایل به سمت مقطع عرضی ۷۵ درجه شده است و به طور تقریبی با مقادیر اندازه‌گیری شده هماهنگی پیدا کرده است. از مقطع ۱۵۰ درجه به سمت خروجی پیش‌بینی مدل نشان‌دهنده قرارگیری هسته بیشینه در ساحل خارجی است که با اندازه‌گیری‌ها هماهنگی مناسبی را نشان می‌دهد. از مقطع ۹۰ تا ۱۲۰ درجه، مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده به طور تقریبی یکسان هستند و هسته بیشینه سرعت در هر دو الگوی جریان بین خط مرکزی و ساحل خارجی قرار دارد. در بین مقاطع ۱۲۰ تا ۱۵۰ درجه نیز الگوی پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده هماهنگی مناسبی را نشان می‌دهند. هسته بیشینه جریان هنوز در نزدیکی خط مرکزی و متمایل به ساحل خارجی است که با نزدیک شدن به مقطع ۱۵۰ درجه تا حدودی به ساحل خارجی نزدیک‌تر می‌شود.



شکل ۶- سرعت طولی متوسط‌گیری شده در عمق - پیش‌بینی شده با مدل RSM

می‌دهد که نشان‌دهنده برگشت آب در این منطقه است. البته ناحیه مذکور به دلیل عمق کم اندازه‌گیری نشده است. در بخش بعد به بررسی کمی مدل‌ها و مقادیر اندازه‌گیری شده پرداخته شده است.

مقایسه سرعت طولی متوسط‌گیری شده در عمق که با این چهار مدل پیش‌بینی شده نشان می‌دهد که در ناحیه جداسازی جریان سه مدل  $K - \varepsilon$ ،  $K - \omega$  و RSM جریان برگشتی آب را پیش‌بینی نکرده‌اند و حداقل سرعت را صفر نشان داده‌اند اما مدل LES سرعت  $0.2 -$  را نشان



شکل ۷- سرعت طولی متوسط‌گیری شده در عمق - پیش‌بینی شده با مدل LES

مدل RSM با  $10.4\%$  درصد و مدل  $K - \omega$  با  $10.9\%$  درصد خطا قرار دارند.

### نتیجه‌گیری

برای بررسی و مقایسه مدل‌های آشفتگی، از داده‌های یک پیچ تند آزمایشگاهی استفاده شد. بررسی‌های آزمایشگاهی روی فلومی با شعاع انحناء  $1/7$  متر و با زاویه مرکزی  $193^\circ$  درجه انجام شده است. برای تعیین الگوی جریان با مدل‌های آشفتگی از نرم‌افزار فلوئنت استفاده شد و چهار مدل  $K - \varepsilon$ ،  $K - \omega$ ، RSM و LES بررسی شدند. برای بررسی و مقایسه الگوی جریان پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده از پارامترهای متوسط‌گیری شده در عمق استفاده شد. بررسی‌ها نشان داد که هر چهار مدل تا حدودی الگوی کلی جریان را پیش‌بینی کرده‌اند اما سه مدل  $K - \varepsilon$ ،  $K - \omega$  و RSM نتوانسته بودند منطقه جداسازی جریان را به شکل مناسبی پیش‌بینی کنند و به جای موقعیت زاویه  $75^\circ$  درجه، زاویه  $90^\circ$  درجه را به عنوان منطقه جداسازی پیش‌بینی کرده‌اند. با این حال، مدل LES موقعیت این ناحیه را به صورت مناسبی پیش‌بینی کرده است. همچنین در پیش‌بینی موقعیت هسته بیشینه سرعت طولی، مناسب‌ترین پیش‌بینی برای مدل LES بوده است. بنابراین به نظر می‌رسد کارایی این مدل در پیچ قابل قبول باشد. همچنین با توجه به استفاده از یک پیچ

### مقایسه پروفیل‌های سرعت طولی اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده

جدول ۲ مقدار متوسط خطای سرعت طولی محاسبه شده نسبت به اندازه‌گیری شده را در مقاطع عرضی انتخاب شده مشخص کرده است.

در این جدول مقدار خطای چهار پروفیل سرعت طولی انتخاب شده و متوسط خطای آن‌ها مشخص شده است. لازم به ذکر است  $n$  نشان‌دهنده جهت شعاعی است. به طور مثال  $n1.35$  به معنای فاصله شعاعی  $1/35$  متر از مرکز پیچ است و با توجه به اینکه دیواره داخلی با مرکز پیچ  $1/5$  متر فاصله دارد،  $n1.35$  نشان‌دهنده موقعیت  $0.3$  متری از دیوار داخلی است.  $n1.7$  نشان‌دهنده فاصله شعاعی  $1/7$  متری از مرکز پیچ است و موقعیت آن خط مرکزی کانال است. در شکل ۱، موقعیت‌های ذکر شده نشان داده شده‌اند. به طور مثال خطای مدل LES در مقطع عرضی صفر درجه و موقعیت  $n1.35$ ،  $2/1$  درصد است که پس از مدل RSM دارای کمترین خطا در این پروفیل سرعت است و متوسط خطای سرعت طولی در مقطع ورودی برای مدل LES  $4/5$  درصد است که کمترین میزان خطا بین چهار مدل مورد بررسی در مقطع عرضی ورودی است. براساس این جدول، مدل LES با میانگین خطای  $7/9$  درصد، بهترین نتایج را در بین مدل‌ها داشته است. پس از آن مدل  $K - \varepsilon$  با  $9/6$  درصد خطا،



چهار پروفیل سرعت طولی بررسی شد. خطای موجود در پیش‌بینی مدل LES در شش مقطع عرضی کمتر از خطای دیگر مدل‌ها به دست آمد. خطای میانگین میزان اختلاف بین پروفیل‌های پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده برای مدل LES کمتر از ۸ درصد به دست آمد. بنابراین مدل مزبور دارای کمترین میزان خطا در پیش‌بینی بوده و پس از آن به ترتیب کمترین خطا، در مدل‌های  $k - \varepsilon$ , RSM,  $k - \omega$  مشاهده شد.

تند که دارای جریان ثانویه قوی بوده و پروفیل‌های سرعت در آن به طور کامل از حالت لگاریتمی دور شده‌اند (بلانکارت، ۲۰۰۲)، می‌توان استنباط کرد که در پیچ‌های ملایم نیز که الگوی جریان در آن‌ها به کانال مستقیم نزدیک‌تر است، این مدل همچنان دارای کارایی مناسبی است. در این پژوهش به بررسی کمی میزان خطای پیش‌بینی مدل‌ها نیز پرداخته شد. برای این کار، در ۷ مقطع عرضی ۰، ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰، ۱۵۰ و ۱۸۰ درجه

جدول ۲- درصد اختلاف بین مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده پروفیل‌های سرعت طولی

| میانگین (درصد) | n2.2 | n2.05 | n1.7 | n1.35 | زاویه مرکزی (درجه) |     |
|----------------|------|-------|------|-------|--------------------|-----|
| ۴/۵            | ۰/۴  | ۷/۳   | ۸/۲  | ۲/۱   | LES                | صفر |
| ۷/۳            | ۶/۲  | ۱۱/۴  | ۱۱/۲ | ۰/۴   | RSM                |     |
| ۶/۷            | ۵/۶  | ۹/۱   | ۱۰   | ۲/۲   | $K - \omega$       |     |
| ۵/۷            | ۳    | ۷/۶   | ۹/۲  | ۳/۱   | $K - \varepsilon$  |     |
| ۶/۹            | ۱/۴  | ۵/۱   | ۵/۶  | ۱۲/۶  | LES                | ۳۰  |
| ۱۰             | ۵/۸  | ۹/۸   | ۱۲   | ۱۲/۲  | RSM                |     |
| ۹/۸            | ۵    | ۹     | ۱۱/۲ | ۱۳/۹  | $K - \omega$       |     |
| ۷/۹            | ۴/۸  | ۷/۲   | ۷/۱  | ۱۲/۳  | $K - \varepsilon$  |     |
| ۷/۷            | ۹/۶  | ۰/۴   | ۱۳   | ----  | LES                | ۶۰  |
| ۱۳/۷           | ۱۷   | ۱۱    | ۱۳   | ----  | RSM                |     |
| ۱۵/۹           | ۱۷/۸ | ۱۴    | ۱۶   | ----  | $K - \omega$       |     |
| ۱۴/۱           | ۱۴   | ۹/۲   | ۱۹   | ----  | $K - \varepsilon$  |     |
| ۱۲/۵           | ۱۹   | ۸/۷   | ۹/۷  | ----  | LES                | ۹۰  |
| ۷/۵            | ۹/۶  | ۲/۹   | ۱۰   | ----  | RSM                |     |
| ۱۱/۷           | ۱۳   | ۱۰    | ۱۲   | ----  | $K - \omega$       |     |
| ۷/۹            | ۱۵   | ۱     | ۷/۸  | ----  | $K - \varepsilon$  |     |
| ۷/۷            | ۱/۸  | ۱/۷   | ۱۹   | ۸/۴   | LES                | ۱۲۰ |
| ۱۰/۲           | ۴/۷  | ۱۰    | ۶    | ۲۰    | RSM                |     |
| ۸              | ۷/۵  | ۵/۱   | ۳/۹  | ۱۵/۵  | $K - \omega$       |     |
| ۷/۸            | ۳/۴  | ۶/۷   | ۱    | ۲۰    | $K - \varepsilon$  |     |
| ۹/۵            | ۴/۸  | ۱۳    | ۸    | ۱۲    | LES                | ۱۵۰ |
| ۱۳/۸           | ۸/۲  | ۱۲    | ۱۹   | ۱۶    | RSM                |     |
| ۱۲/۹           | ۴    | ۱۴    | ۱۷   | ۱۶/۶  | $K - \omega$       |     |
| ۱۰/۷           | ۲/۵  | ۱۰    | ۱۷   | ۱۳/۴  | $K - \varepsilon$  |     |
| ۶/۹            | ۶/۵  | ۵     | ۱۱/۵ | ۴/۴   | LES                | ۱۸۰ |
| ۱۰/۵           | ۳/۷  | ۵/۷   | ۷/۵  | ۲۵    | RSM                |     |
| ۱۱/۵           | ۴/۵  | ۱/۳   | ۵    | ۳۵    | $K - \omega$       |     |
| ۱۲/۸           | ۳/۳  | ۳/۱   | ۸/۸  | ۳۶    | $K - \varepsilon$  |     |

بررسی مدل‌های آشفتگی در پیچ رودخانه با کمک نرم‌افزار FLUENT در تاریخ ۹۲/۲/۲۲ و شماره قرارداد ۹۲/۲۲ تأمین اعتبار شده است.

### سپاس‌گزاری

با سپاس‌گزاری از معاونت پژوهشی دانشگاه اراک، این پژوهش از محل طرح پژوهشی در دانشگاه اراک با موضوع

## منابع

۱. امید بیگی م. ع. ۱۳۸۸. مطالعه آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی الگوی جریان در آبگیری جانبی از رودخانه در حضور صفحات مستغرق. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس. ۱۹۳ ص.
۲. شاملو ح. و پیرزاده ب. ۱۳۸۹. بررسی اثرات پارامترهای هندسی و هیدرولیکی بر ابعاد ناحیه جدایی جریان در آبگیرهای جانبی به کمک نرم‌افزار فلونت. نشریه مهندسی عمران و نقشه‌برداری. ۴۸۷-۴۹۵.
۳. صفرزاده الف. ۱۳۸۵. مطالعه عددی الگوی جریان آشفته و بررسی کیفی انتقال رسوب و فرسایش در آبگیری جانبی از رودخانه. مجله فنی و مهندسی مدرس. ۲۵: ۱۳۴-۱۴۶.
4. Blanckaert K. 2002. Flow and Turbulence in Sharp Open channel Bends, thesis, Cole Polytechnique Federale de Lausanne, Switzerland, 286 p.
5. Booij R. 2003. Measurements and large eddy simulations of the flows in some curved flumes. J. Turbulence. 4(1): 1-17.
6. Dargahi B. 2004. Three-dimensional flow modelling and sediment transport in the river Klaralven. Earth Surface Processes and Landforms. 29(7): 821-852.
7. Han S. 2010. Characteristics of flow around 90 open channel bends. PhD thesis. Dept. of Building, Civil, and Environmental Engineering, Concordia University, Montreal, Quebec, 210 p.
8. Kang H. and Choi S. 2006. Reynolds stress modelling of rectangular open-channel flow. Intl. J. Num. Meth. Fluids. 51(11): 1319-1334.
9. Van Balen W. Uijtewaal W. S. J. and Blanckaert K. 2009. Large eddy simulation of a mildly curved open-channel flow. Journal of Fluid Mechanics. 630: 413-442.
10. Van Rijn L. C. 1984. Sediment transport, part 1: bed load transport. Journal of Hydraulic Engineering. 110(10): 1431-1456.