# مطالعه آزمایشگاهی ساختار جریان متلاطم و ناحیه جداشدگی و مقایسه با مدل‌های تلاطمی در دهانه آبگیر ۴۵ درجه با انتهای مسدود

علیرضا کشاورزی[۱] و محمدجواد کاظم زاده پارسی[۲]

## چکیده

**ساختار جریان در آبگیرها ساختاری سه بعدی و بسیار پیچیده است. بنابراین کاربرد معادلات یک بعدی و دو بعدی در این نوع جریان‌ها واقعیت جریان را به اندازه کافی بیان نمی‌کند. در این پژوهش شبیه سازی عددی جریان منشعب شده از یک کانال اصلی به داخل کانال فرعی با زاویه ۴۵ درجه مورد بررسی قرار گرفت و نتایج به دست آمده با مدل آزمایشگاهی مقایسه شد. در این مطالعه از دو مدل محاسباتی Standard K-ε, RNG K-ε برای مدل‌سازی عددی جریان متلاطم استفاده گردید و محل جداشدگی، خصوصیات جداشدگی و توزیع سرعت به دست آمده از مدل‌های عددی با نتایج به دست آمده از داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شد. نتایج نشان داد که مدل Standard K-ε سرعت جریان و ابعاد ناحیه جداشدگی را در دهانه آبگیر بهتر تخمین می‌زند. علاوه بر این در مدل‌های عددی و آزمایشگاهی دیده شد که در آبگیرهای ۴۵ درجه محل جداشدگی جریان در پایین دست دهانه آبگیر اتفاق می‌افتد.**

**واژه‌های کلیدی: آبگیر ۴۵ درجه، جداشدگی جریان، شبیه سازی عددی، RNG k-ε, Standard k-ε**

## مقدمه

در بسیاری از تأسیسات هیدرولیکی تعیین ساختار جریان از یک کانال اصلی به کانال‌های جانبی از اهمیت بالایی برخوردار است. آبگیرها عموماً در شبکه‌های توزیع آب، کانال‌های آبیاری، شبکه‌های فاضلاب، تأسیسات مربوط به تصفیه خانه‌های آب و فاضلاب، ورودی به تأسیسات تولید برق و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرند. معمولاً جریان در این نوع سازه‌ها از ساختاری کاملاً ۳ بعدی برخوردار است و فرض جریان یک بعدی یا دو بعدی برای بررسی جزئیات ساختار جریان در دهانه آبگیر کافی نیست. هنگامی که جریان سیال از کانال اصلی به کانال فرعی وارد می‌شود یک منطقه با مشخصات محدود به نام محدوده جداشدگی جریان از دیواره ایجاد می‌شود. در این ناحیه از جریان ذرات سیال در فاصله‌ای از دیواره به دور خود در حرکت بوده و یک ناحیه با جریان چرخشی را تشکیل می‌دهند.

۱. دانشیار آبیاری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

۲. دانشجوی سابق کارشناسی ارشد مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز



[ Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-27 ]

[ DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.1.2.2 ]

در واقع این ناحیه از کانال جانبی تأثیری در مقدار تخلیه جریان نخواهد داشت. به عبارت دیگر ناحیه جداشدگی از سطح مقطع مؤثر آبگیر می‌کاهد.

بررسی‌های زیادی در خصوص جریان از یک کانال اصلی به فرعی با زاویه ۹۰ درجه صورت گرفته است که از آن جمله می‌توان به لاکشمانا و همکاران (۳)، تیلور (۱۱)، پاپ و سالت (۸)، شتار و مورتی (۹)، چن و لیان (۲) نیری و ادگارد (۶) و نیری و همکاران (۵ و۷) اشاره نمود. در صورتی که خصوصیات جریان در آبگیرهای ۴۵ درجه تاکنون کمتر مورد بررسی قرار گرفته است.

بررسی پدیده تلاطم در دینامیک سیالات از جمله مسایلی است که در دهه‌های اخیر توجه بسیاری از پژوهشگران در زمینه‌های مختلف مهندسی را به خود جلب کرده است. به طوری که تاکنون یک تئوری ریاضی کامل و جامع که بتواند پدیده‌های مختلف تلاطمی را بیان نماید وجود ندارد. بنابرین معمولاً برای بررسی جریان‌های متلاطم از روش‌های آزمایشگاهی و انجام آزمایش‌ها در شرایط کنترل شده استفاده می‌شود. از آن جهت که تئوری ریاضی کاملی برای بیان پدیده‌های تلاطمی وجود ندارد، برای تحلیل عددی چنین جریان‌هایی معمولاً به شبیه سازی این پدیده‌ها پرداخته می‌شود. به عبارت دیگر با توجه به آزمایش‌های بسیاری که روی پدیده‌های تلاطمی انجام می‌شود، مدل‌هایی برای بیان آنها پیشنهاد می‌گردد و سپس از این مدل‌ها برای شبیه سازی جریان استفاده می‌شود. عموماً مدل‌هایی که امروزه استفاده می‌شوند سعی دارند به نحوی سرعت‌های لحظه‌ای سیال را به مقدار سرعت میانگین زمانی مرتبط نموده و از این طریق اقدام به حل مسأله کنند. ایجاد این ارتباط از طریق تعریف یک دسته معادلات جبری و یا دیفرانسیلی که به معادلات تلاطم معروف هستند صورت می‌گیرد و سپس این معادلات به همراه معادلات حاکم بر جریان سیال یا معادلات ناویر استوکس حل می‌شوند. این معادلات تکمیلی حاوی ضرایب ثابتی هستند که به نوبه خود بایستی توسط داده‌های تجربی معین و بهینه شوند.

از میان مدل‌های مختلف تلاطم مدل K-ε یک مدل عمومی است و به طور گسترده‌ای در شبیه‌سازی مسایل مختلف مهندسی از آن استفاده می‌شود. در سه دهه گذشته تحقیقات بسیار زیادی در جهت بهبود عملکرد این مدل برای شبیه‌سازی ساختارهای پیچیده جریان‌های متلاطم انجام گرفته و تاکنون نسخه‌های متفاوتی بر پایه این مدل ارائه شده است. ولی همان طور که گفته شد به دلیل این که این گونه روش‌ها عموما بر پایه یک سری ضرایب ثابت، که به طور تجربی معین می‌شوند بنا شده‌اند، تاکنون روشی که بتواند جریان‌های متلاطم را در طیف وسیعی از مسایل حل نماید وجود ندارد. عموماً این ضرایب ثابت باید با انجام آزمایش‌هایی بهینه شوند و برای کاربرد در حل مسأله‌ای خاص به طور دقیق تنظیم گردند.

یکی از روش‌هایی که ادعا دارد به نحوی از رویارویی با این ضرایب ثابت دوری جسته، روش RNG K-ε است. این روش در سال ۱۹۸۶ توسط یاخوت و اورسزاگ (۱۲) بر پایه تئوری (Renormalization Group Theory) پیشنهاد شد. به دنبال آن برادشاو در سال ۱۹۹۶ بیان کرد با توجه به این که بحث‌هایی بر سر این که طبیعت فیزیکی جریان چگونه وارد این مدل شده است وجود دارد، ولی به هرحال این مدل جواب‌های بهتری برای دسته خاصی از مسایل ارائه داده است (۱).

در سال ۱۹۹۲، یاخوت و همکارانش (۱۳) یک عبارت تصحیح برای بهبود رفتار مدل RNG K-ε در جریان‌های با نرخ زیاد کرنش (High strain rate) به معادله تلاطم ε اضافه کردند. این مدل تصحیح شده توسط اسپزیال و تانگام (۱۰) و لین و لیش‌زینر (۴) به منظور حل مسأله پله معکوس مورد استفاده قرار گرفت. در این تحقیقات این مدل توانست نتایج خوبی برای تخمین وضعیت جریان چرخشی در پایین دست پله معکوس (Backward step) و همین طور مکان نقطه باز پیوستگی (Reattachment point) جریان و یا به عبارت دیگر نقطه انتهایی ناحیه جداشدگی که در آن جریان مجدداً به دیواره می‌چسبد ارائه دهد.



[ Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-27 ]

[ DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.1.2.2 ]

هدف مطالعه حاضر بررسی و مقایسه ساختار جریان خصوصاً جداشدگی جریان در آبگیرهای با زاویه ۴۵ درجه از طریق اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی و حل عددی میدان جریان می‌باشد و در نهایت نتایج مدل‌های مختلف عددی با مقادیر آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفت.

## مواد و روش‌ها

### معادلات حاکم بر جریان سیال

معادلات حاکم برجریان سیال عبارت است از معادلات بقای جرم و بقای اندازه حرکت که به همراه معادلات تلاطم حل می‌شوند. معادلات میانگین‌گیری شده بقای اندازه حرکت (معادلات نویر- استوکس) و معادله بقای جرم به فرم زیر نوشته می‌شوند:

$$\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial t}+\overline{u}_j\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\upsilon+\upsilon_t)\left(\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j}+\frac{\partial \overline{u}_j}{\partial x_i}\right)\right] \qquad i,j=1,2,3 \qquad [1]$$

$$\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_i}=0 \qquad i=1,2,3 \qquad [2]$$

در این معادلات $x_i$ مؤلفه‌های سیستم مختصات و $\overline{u}_i$ مولفه‌های سرعت میانگین در جهت‌های محورهای مختصات است. $\rho$ چگالی سیال، $\overline{p}$ فشار میانگین، $\upsilon$ لزجت سینماتیک و $\upsilon_t$ لزجت تلاطمی است که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\upsilon_t=C_\mu\frac{k^2}{\varepsilon} \qquad [3]$$

$$k=\frac{1}{2}\overline{u_i'u_i'} \qquad [4]$$

$$\varepsilon=\upsilon\frac{\partial u_i'}{\partial x_j}\frac{\partial u'}{\partial x_j} \qquad [5]$$

در معادلات فوق $k$ انرژی جنبشی تلاطمی، $\varepsilon$ نرخ پخش تلاطمی (Turbulent Dissipation Rate) است و $C_\mu$ یک ضریب ثابت بدون بعد است. معادلات جابه‌جایی (Convective) برای $k$ و $\varepsilon$ در رینولدزهای بالا به صورت زیر است:

$$\frac{\partial k}{\partial t}+\overline{u}_i\frac{\partial k}{\partial x_i}=P-\varepsilon+\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{\upsilon_t}{\sigma_k}\frac{\partial k}{\partial x_i}\right) \qquad [6]$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t}+\overline{u}_i\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i}=C_{c1}\frac{\varepsilon}{k}P-C_{c2}\frac{\varepsilon^2}{k}+\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{\upsilon_t}{\sigma_c}\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i}\right) \qquad [7]$$

در این معادلات $P$ تولید تلاطم است که از روابط زیر به دست می‌آید:

$$P=2\upsilon_t\overline{S_{ij}S_{ij}} \qquad [8]$$

که در آن

$$\overline{S}_{ij}=\frac{1}{2}\left(\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j}+\frac{\partial \overline{u}_j}{\partial x_i}\right) \qquad [9]$$

رابطه ۹ بیانگر نرخ میانگین تانسور کرنش می باشد. در معادلات ۶ و ۷ چهار مقدار ثابت $C_{c1},C_{c2},\sigma_k,\sigma_c$ ضرایب ثابتی هستند که به طور تجربی معین می‌شوند.

### مدل آزمایشگاهی

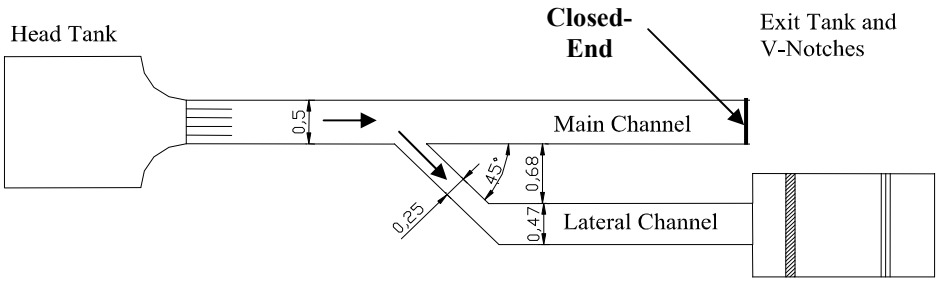
کلیه آزمایش‌ها در یک فلوم آزمایشگاهی به طول مؤثر ۱۵ متر و شیب طولی ۰/۳ در هزار در آزمایشگاه هیدرولیک رسوب متعلق به بخش آب دانشگاه شیراز انجام گرفت. کانال اصلی با عمق ۴۰ سانتی‌متر و عرض ۵۰ سانتی‌متر و در کنار آن یک کانال فرعی با زاویه انحراف ۴۵ درجه با انتهای مسدود به شکل y به عرض ۲۵ سانتی‌متر و عمق ۴۰ سانتی‌متر ساخته شد. در ابتدای کانال اصلی یک حوضچه آرام کننده و در انتهای کانال فرعی سر ریز مثلثی ۹۰ درجه که قبلاً کالیبره شده بودند، برای اندازه‌گیری دبی عبوری نصب گردید. جریان توسط یک دستگاه پمپ با حداکثر آب‌دهی ۵۰ لیتر در ثانیه از یک مخزن وارد کانال اصلی شده و بعد از عبور از مدل فیزیکی مجدداً به مخزن باز می‌گردد. طرح شماتیک فلوم آزمایشگاهی در شکل ۱ نشان داده شده است. شرایط آزمایشگاهی و مشخصات جریان در جدول ۱ آورده شده است.

به منظور اندازه‌گیری مقدار کمّی سرعت نقطه‌ای سیال از یک دستگاه سرعت سنج الکترومگنتیک دو بعدی PE30-Ellipsoid ساخت کارخانه Delft هلند استفاده شد. مقدار سرعت لحظه‌ای سیال در دو جهت افقی عمود بر هم در



[ Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-27 ]

[ DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.1.2.2 ]




**شکل ۱. طرح شماتیک فلوم آزمایشگاهی (بدون مقیاس)**

**جدول ۱. شرایط فیزیکی جریان**

| | کانال اصلی Re | کانال فرعی Re | کانال اصلی Fr | کانال فرعی Fr |
|---|---|---|---|---|
| عمق ۱۴ سانتی‌متر | ۲۴۰۰۰ | ۴۸۰۰۰ | ۰/۲ | ۰/۴ |
| عمق ۲۰ سانتی‌متر | ۲۴۰۰۰ | ۴۸۰۰۰ | ۰/۱۱ | ۰/۲۲ |

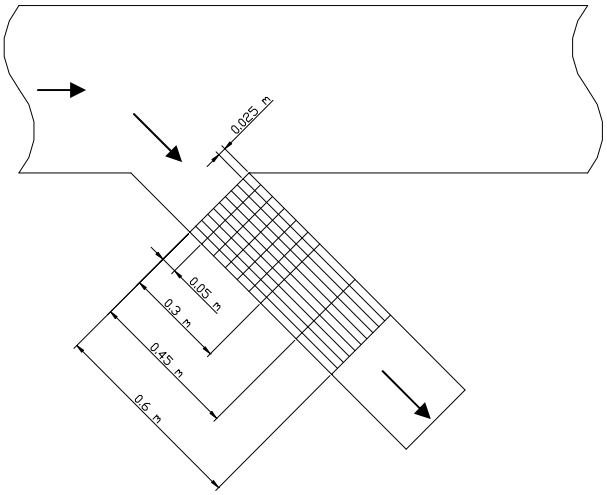
تعداد زیادی نقطه از پیش تعیین شده اندازه‌گیری شد. وضعیت قرارگیری پروب دستگاه اندازه‌گیری به صورتی تنظیم شد که مؤلفه X سرعت در امتداد کانال آبگیر و در جهت جریان قرار گیرد. بنابراین مؤلفه Y سرعت در جهت عمود بر آبگیر و از سمت بالا دست به پایین دست قرار گرفت. نقاطی که سرعت در آنها اندازه‌گیری شد به نحوی انتخاب شدند که ناحیه جداشدگی به طور مناسبی پوشش داده شود. به عبارت دیگر هدف بررسی ساختار جداشدگی است. بنابراین نقاط اندازه‌گیری در مناطقی بایستی توزیع شود که احتمال وجود جداشدگی در آنها زیاد است. مسلماً در این پژوهش‌ها جداشدگی در دهانه آبگیر به وقوع خواهد پیوست و نقاط اندازه‌گیری باید به طور مناسبی در این ناحیه متمرکز شود. بنابراین سرعت در هشت مقطع متفاوت که عبارت‌اند از مقاطع صفر، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ سانتی‌متری از ابتدای کانال فرعی اندازه‌گیری شد. همان طور که گفته شد انتخاب مقاطع به نحوی انجام شده که ناحیه جداشدگی به طور کامل پوشش داده شود. در هر مقطع نیز سرعت سیال در ۹ نقطه که به فاصله یکسانی از یکدیگر قرار گرفته‌اند اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری‌ها در هر نقطه مجموعا برای ۳ عمق متفاوت ۰/۲، ۰/۶ و ۰/۸ عمق کل از سطح آزاد جریان انجام شد. در این مقاله تنها مقادیر مربوط به عمق ۰/۶ برای مقایسه ارائه می‌گردد. در شکل ۲ محل اندازه‌گیری سرعت‌ها درون دهانه آبگیر دقیقا نشان داده شده است. سرعت سیال در هر نقطه برای مدت ۴۰ ثانیه و با فرکانس داده برداری ۱۰ داده در ثانیه اندازه‌گیری شد. مقادیر سرعت‌های لحظه‌ای اندازه‌گیری شده توسط سخت‌افزار و نرم‌افزار مناسب مستقیماً به کامپیوتر منتقل و برای تحلیل‌های بعدی ذخیره گردید.

به منظور بررسی کیفی میدان جریان و اندازه‌گیری ابعاد ناحیه جدا شدگی از مجموعه‌ای از نخ‌های رنگی که در مکان‌های متفاوت در مسیر جریان نصب شد، استفاده گردید. به این صورت که نخ‌ها با فاصله‌های مساوی روی یک میله باریک نصب شده و با قرار دادن این میله به صورت افقی در عمق‌های متفاوت جریان، از آرایشی که نخ‌ها در اثر عبور جریان به خود می‌گرفتند، عکس‌برداری شد. عکس‌برداری توسط یک دوربین CCD که در بالای فلوم و در محل کانال فرعی نصب شده بود انجام گرفت. تعداد ۲۵ عکس در ثانیه از جریان گرفته

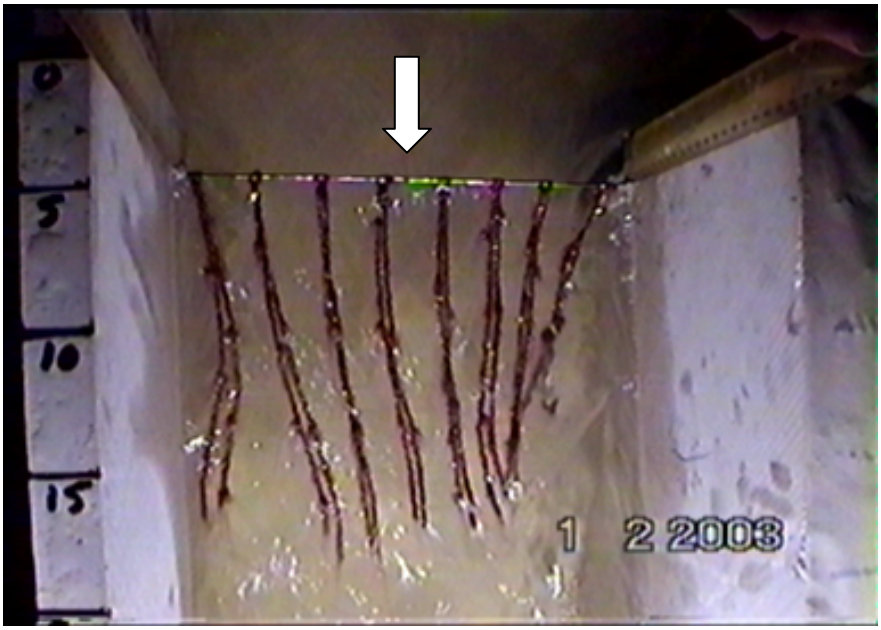


[ Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-27 ]

[ DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.1.2.2 ]




**شکل ۲. شبکه نقاط اندازه‌گیری سرعت در کانال فرعی**




**شکل ۳. ناحیه جداشدگی جریان در کانال فرعی**

شد و توسط سخت‌افزار و نرم‌افزار مخصوص به کامپیوتر انتقال داده شد. سپس از پشت سرهم قرار دادن تصاویر به دست آمده، ابعاد ناحیه جدا شدگی اندازه‌گیری شد. شکل ۳ یک نمونه از عکس‌های گرفته شده در مقطع ورودی کانال فرعی را نشان می‌دهد.

## جزئیات حل عددی

یکی از اهداف این تحقیق حل عددی جریان متلاطم درون آبگیر و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی است. شبیه سازی عددی مسایل مهندسی این امکان را می‌دهد که با کم‌ترین هزینه و پرهیز از مشکلات روش‌های آزمایشگاهی به پاسخ مورد نظر دست یافت. در این مقاله توانایی مدل‌های تلاطمی برای



[ Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-27 ]

[ DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.1.2.2 ]

**جدول ۲. شرایط جریان استفاده شده در مدل‌ها در حل عددی**

| عمق( cm ) | مدل تلاطمی | دبی جریان( Lit/Sec ) | | |
|---|---|---|---|---|
| ۱۴ | Standard K-ε | ۱۶ | ۲۵ | ۳۵ |
| | RNG K-ε | ۱۶ | ۲۵ | ۳۵ |
| ۲۰ | Standard K-ε | ۱۶ | ۲۵ | ۳۵ |
| | RNG K-ε | ۱۶ | ۲۵ | ۳۵ |

شبیه سازی جریان متلاطم درون آبگیرها بررسی شده است. برای این منظور شبیه سازی عددی ۳ بعدی میدان جریان متلاطم در درون کانال با انشعاب ۴۵ درجه توسط روش حجم محدود و با استفاده از نرم افزار Fluent 6.2.3 انجام گردید. در این شبیه سازی از دو مدل تلاطمی Standard K-ε, RNG K-ε استفاده شد. حل عددی جریان برای ۳ دبی مختلف ۱۶، ۲۵ و ۳۵ لیتر در ثانیه و برای ۲ عمق ۱۴ و ۲۰ سانتی‌متر انجام شد. حالات مختلف حل در جدول ۲ نشان داده شده است.

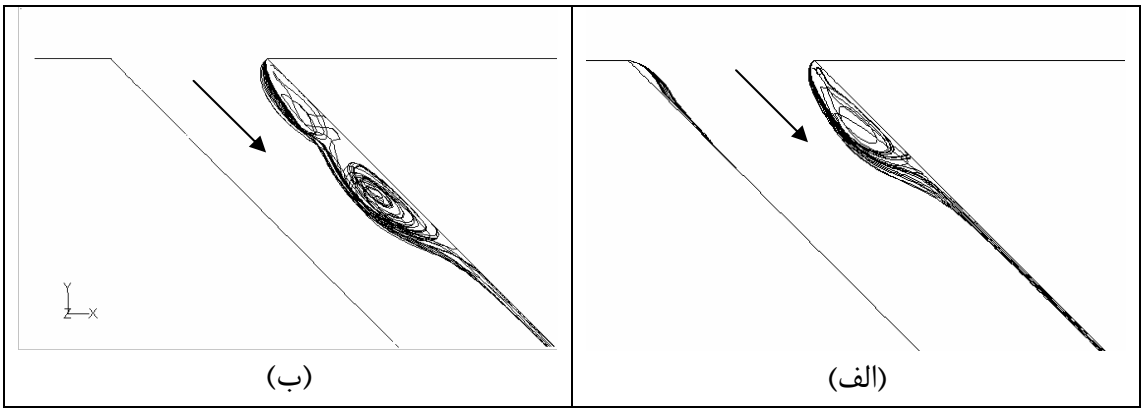
شبکه محاسباتی مورد نیاز توسط نرم افزار Gumbit و از نوع شبکه با سازمان (Structured Grid) ساخته شد. فرایند تحلیل شبکه که راهی برای تصمیم گیری درمورد درشتی و ریزی سلول‌هاست در تحلیل مسایل سه بعدی بسیار وقت گیر است. در این پژوهش برای انتخاب تعداد سلول‌ها، عملیات تحلیل شبکه تنها برای یکی از حالت‌ها انجام شد و پس از معین شدن شبکه مناسب، از آن برای دیگر حالت‌ها نیز استفاده شد. بنابراین تعداد سلول‌های ایجاد شده برای مدل با عمق ۱۴ سانتی‌متر برابر ۱۱۹۰۰۰ و برای مدل با عمق ۲۰ سانتی‌متر برابر ۱۸۴۰۰۰ سلول انتخاب شد. توزیع گره‌ها به نحوی انتخاب شد که در نزدیکی دیواره‌ها و یا مناطقی که جدایی رخ می‌دهد، تمرکز گره‌ها به اندازه کافی باشد. شرایط مرزی روی سطح آب عبارت‌اند از صفر بودن سرعت عمود بر سطح و صفر بودن فشار. در حالت کلی در صورتی می‌توان چنین شرایطی را اعمال کرد که مسأله به صورت یک مسأله دارای سطح آزاد حل شود. به این صورت که پروفیل سطح آب از ابتدا مجهول فرض شده و با اعمال شرط دینامیکی فشار صفر، در طول حل به دست آید. ولی در صورتی که عدد فرود جریان، کم باشد تغییرات پروفیل سطح کم بوده و می‌توان از تغییرات سطح آب صرف نظر کرد. در این صورت سطح آب به صورت یک سطح تخت فرض شده و فقط شرط صفر بودن سرعت عمودی به صورت شرط مرزی تقارنی (Symetry) اعمال می‌شود. واضح است که در چنین حالتی دیگر فشار روی سطح صفر نخواهد ماند، ولی همان طور که گفته شد به دلیل کم بودن عدد فرود جریان، این انحراف از حالت واقعی قابل چشم پوشی خواهد بود. بنابراین در این مقاله به دلیل کم بودن عدد فرود سطح آب تخت فرض شده و تنها شرط صفر بودن سرعت عمود بر سطح، اعمال شده است. در آزمایش‌ها دیده شد که گرچه در دهانه آبگیر جدایش جریان اتفاق می‌افتد ولی تغییرات سطح آب نسبت به عمق جریان ناچیز بوده و بنابراین فرض تخت بودن سطح آب در این آزمایش‌ها دور از واقعیت نیست. البته اگر عدد فرود افزایش یابد، تغییرات سطح آب در دهانه آبگیر بیشتر شده و دیگر این فرض معتبر نخواهد بود.

شرایط مرزی ورودی کانال در بالا دست از نوع شرط مرزی سرعت ورودی (Velocity inlet) تعریف و مقدار سرعت اعمال شده از روی دبی جریان محاسبه شد. در پایین دست کانال شرط مرزی جریان خروجی (Outflow) انتخاب شد. برای گسسته سازی معادلات حاکمه از تقریب مرتبه دوم بالا دست و الگوی SIMPLE (Semi Implicit Pressure Linked Equations) استفاده شده است.



[ Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-27 ]

[ DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.1.2.2 ]




**شکل ۴. شکل ناحیه جدا شدگی (الف): مدل Standard K-ε (ب): مدل RNG K-ε**

**جدول ۳. ابعاد ناحیه جداشدگی**

| مدل عددی RNG K-ε | مدل عددی Standard K-ε | مدل آزمایشگاهی | |
|---|---|---|---|
| ۸/۳ سانتی‌متر | ۷ سانتی‌متر | ۶/۱ سانتی‌متر | پهنای ناحیه جدایی |
| ۶۰/۳ سانتی‌متر | ۳۰ سانتی‌متر | ۳۱/۲ سانتی‌متر | طول ناحیه جدایی |

## نتایج و بحث

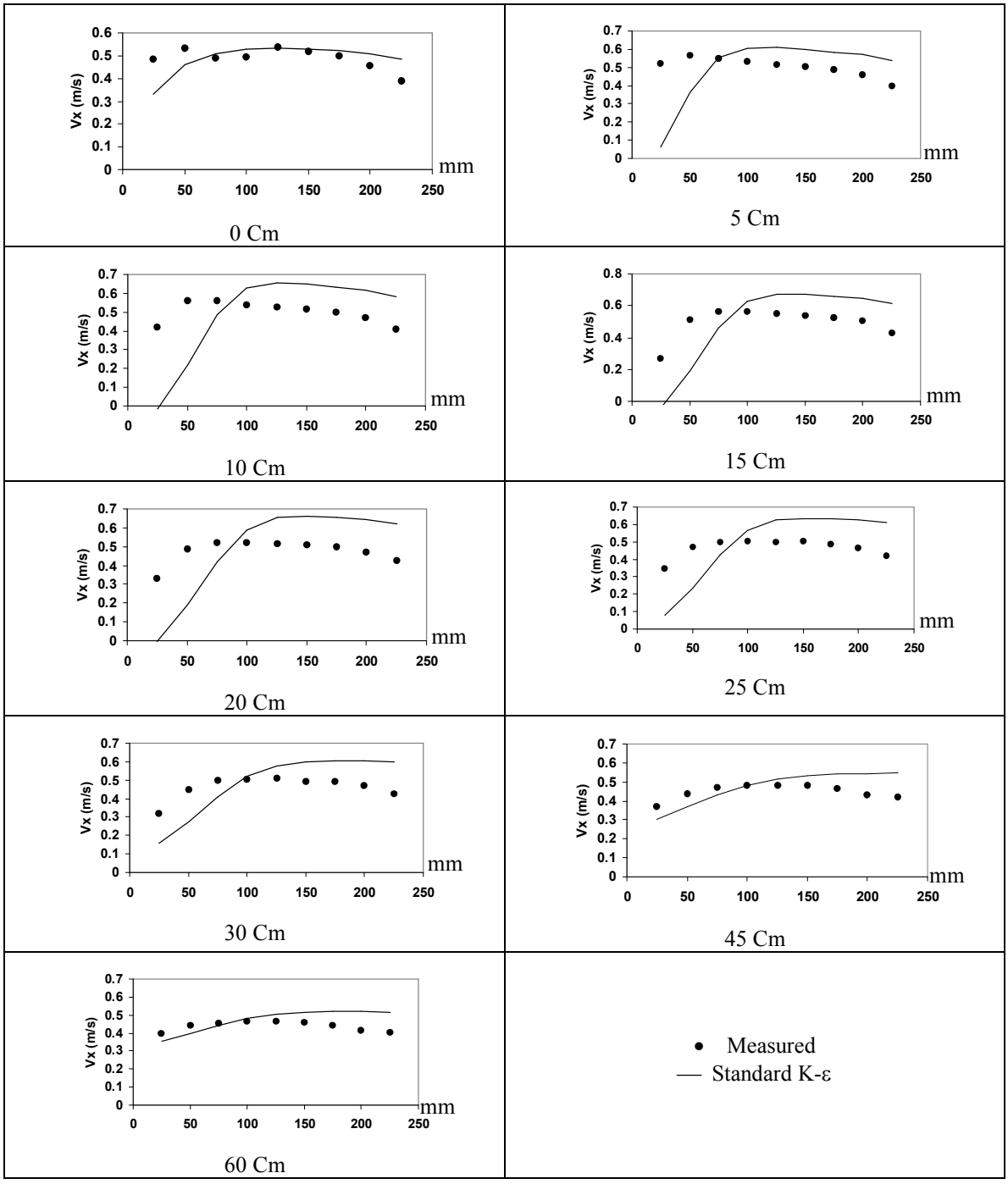
همان طور که گفته شد جهت تعیین ابعاد ناحیه جدا شدگی، مجموعه‌ای از نخ‌ها در نقاط مختلف و مقاطع ذکر شده نصب شدند و با عکس‌برداری متوالی از مقاطع مختلف و با پشت سرهم قرار دادن تصاویر مربوط به آنها ابعاد ناحیه جدا شده اندازه‌گیری شد (شکل ۳). در این جا به دلیل رعایت اختصار تنها یک نمونه آورده شده است. در شکل‌های ۴الف و ۴ب الگوی ناحیه جداشدگی، محاسبه شده به ترتیب به کمک مدل‌های Standard K-ε و RNG K-ε محاسبه و نشان داده شد و با نتایج آزمایش‌ها مقایسه گردید. همان طور که نتایج نشان می‌دهد مدل Standard K-ε توانسته شکل ناحیه جداشدگی را بهتر محاسبه نماید. البته مدل RNG K-ε ناحیه جداشدگی را به صورت دو گردابه پشت سر هم محاسبه می‌نماید ولی در مدل آزمایشگاهی چنین گردابه‌هایی دیده نشد. در جدول ۳ ابعاد ناحیه جداشدگی برای مدل‌های مختلف عددی آورده شده و نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی مقایسه گردیده است. همان طور که از جدول ۳ پیداست ابعاد ناحیه جداشدگی جریان شامل طول، عرض و شکل آن در مدل آزمایشگاهی با استخراج از مدل عددی مقایسه شد. مقایسه نشان داد که مدل Standard K-ε طول، عرض و الگوی ناحیه جداشدگی را بهتر تخمین می‌زند و بیشتر با داده‌های آزمایشگاهی همخوانی دارد ولی در مدل RNG K-ε طول جداشدگی در مقایسه با آزمایش تقریبا دو برابر و به صورت دو گردابه پشت سر هم می‌باشد که در آزمایش‌ها چنین الگویی دیده نشد.

همان طور که گفته شد سرعت‌ها در ۹ مقطع در کانال فرعی و در دو راستای هم‌جهت و عمود بر جهت جریان اندازه‌گیری شد. در هر مقطع مقدار سرعت‌ها در ۹ نقطه که با فاصله ۲۵ میلی‌متر از یکدیگر و از دیواره‌ها قرار داشتند، اندازه‌گیری شده است. همان طور که گفته شد از بین سه عمقی که اندازه‌گیری سرعت در آنها انجام شد، تنها مقادیر مربوط به عمق ۰/۶ برای مقایسه ارائه می‌گردد. به همین ترتیب و برای نقاط مشابهی، مقادیر سرعت‌ها از مدل‌های عددی استخراج گردید. مقادیر محاسبه شده با روش Standard K-ε و RNG K-ε به همراه مقادیر اندازه‌گیری شده به ترتیب در شکل‌های ۵، ۶، ۷ و ۸



[ Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-27 ]

[ DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.1.2.2 ]

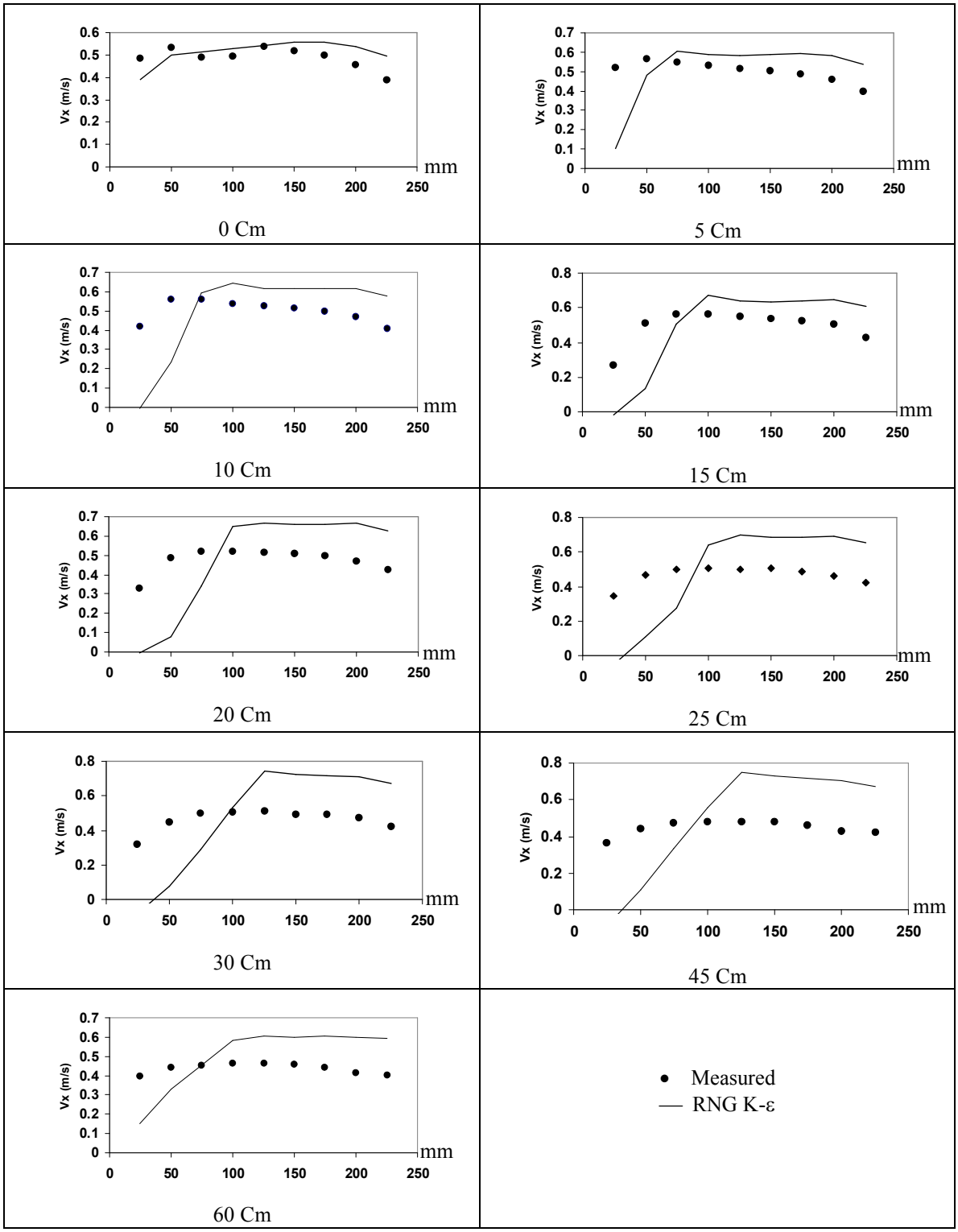



**شکل ۵. مقایسه سرعت محاسبه شده در جهت جریان از مدل Standard K-ε با مقادیر اندازه‌گیری شده در کانال فرعی و در مقاطع مختلف از ورودی برای عمق ۱۴ سانتی‌متر**



[ Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-27 ]

[ DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.1.2.2 ]

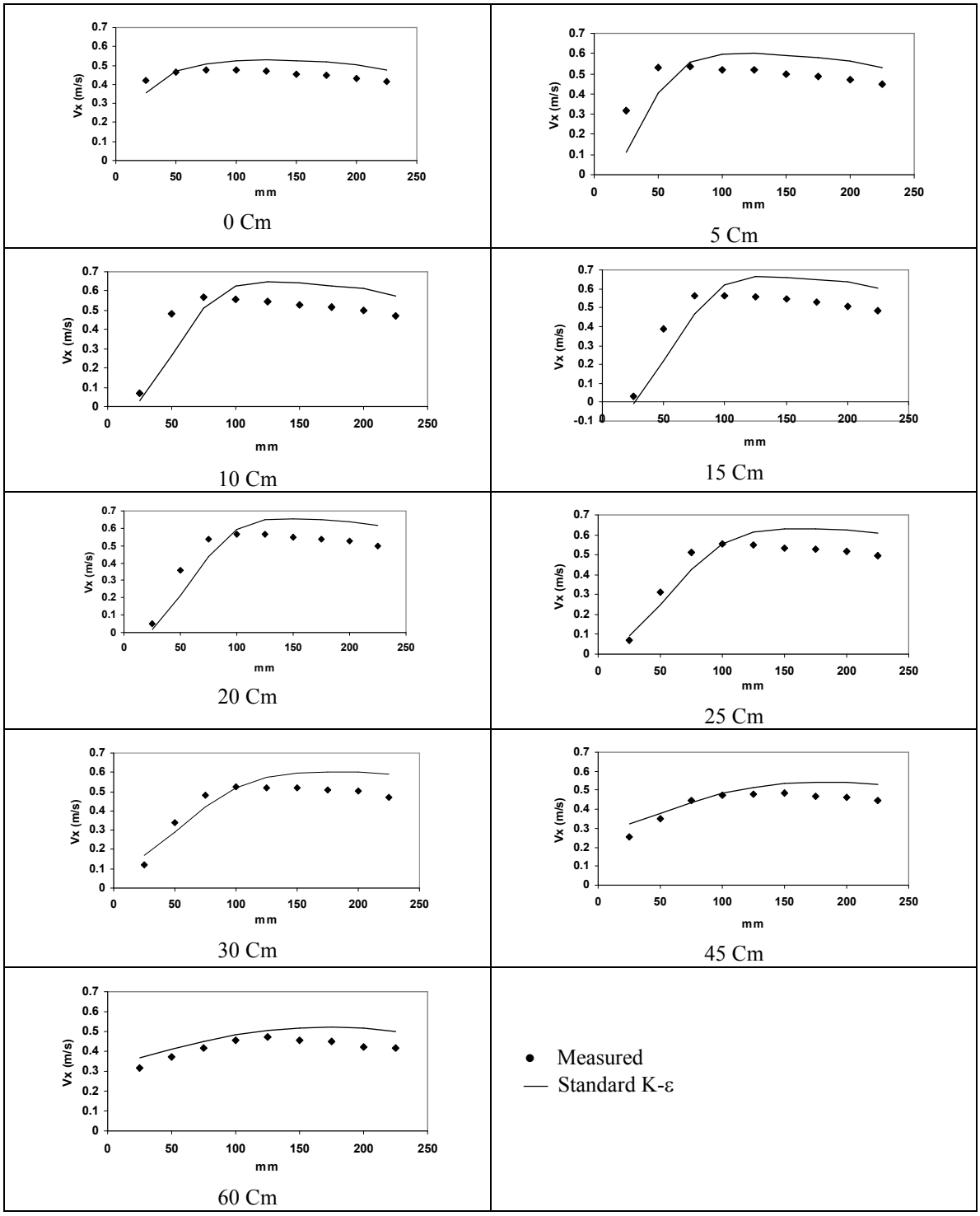



**شکل ۶. مقایسه سرعت محاسبه شده در جهت جریان از مدل RNG K-ε با مقادیر اندازه‌گیری شده در کانال فرعی و در مقاطع مختلف از ورودی برای عمق ۱۴ سانتی‌متر**



[ Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-27 ]

[ DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.1.2.2 ]

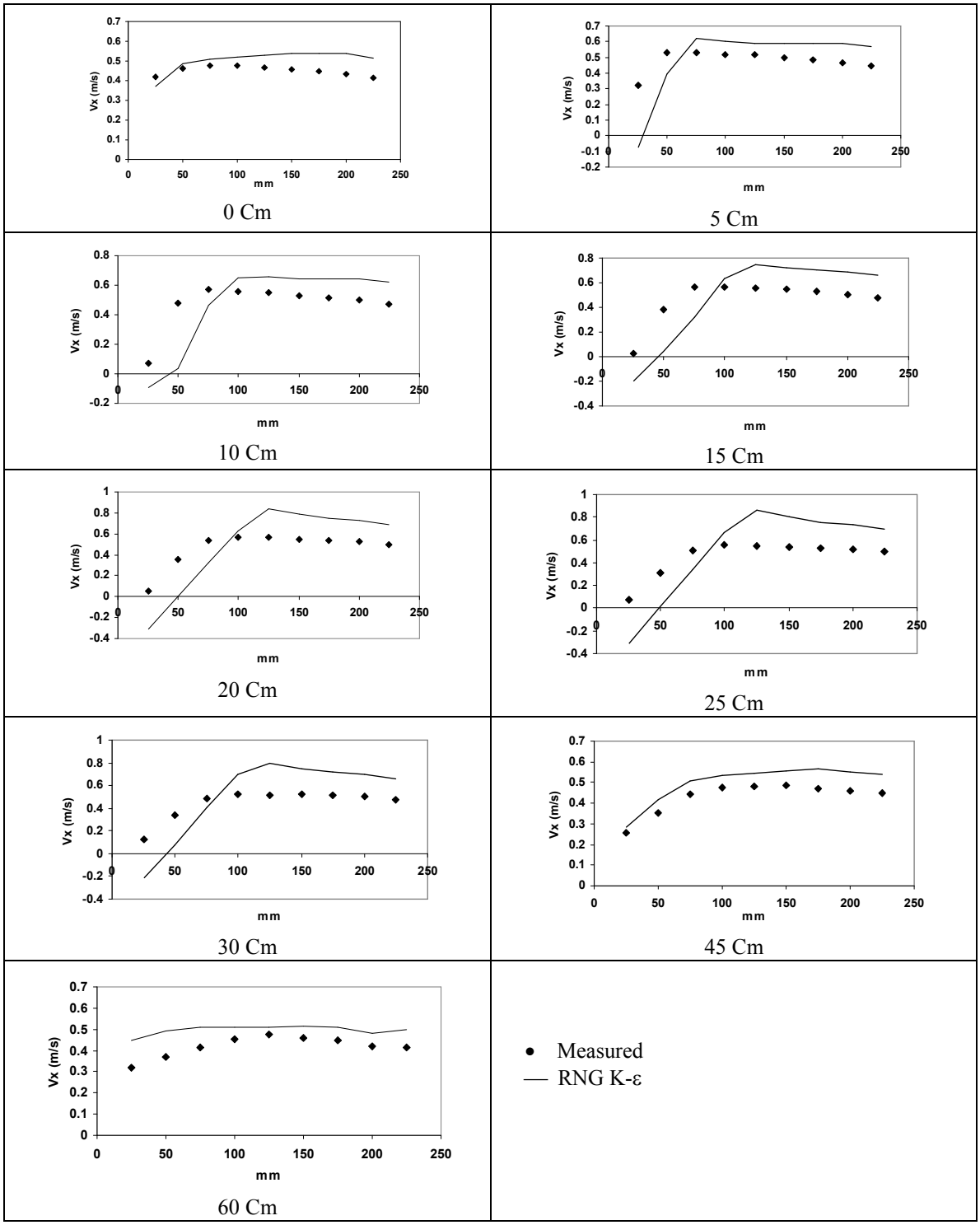



**شکل ۷. مقایسه سرعت محاسبه شده در جهت جریان از مدل Standard K-ε با مقادیر اندازه‌گیری شده در کانال فرعی و در مقاطع مختلف از ورودی برای عمق ۲۰ سانتی‌متر**



[ Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-27 ]

[ DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.1.2.2 ]

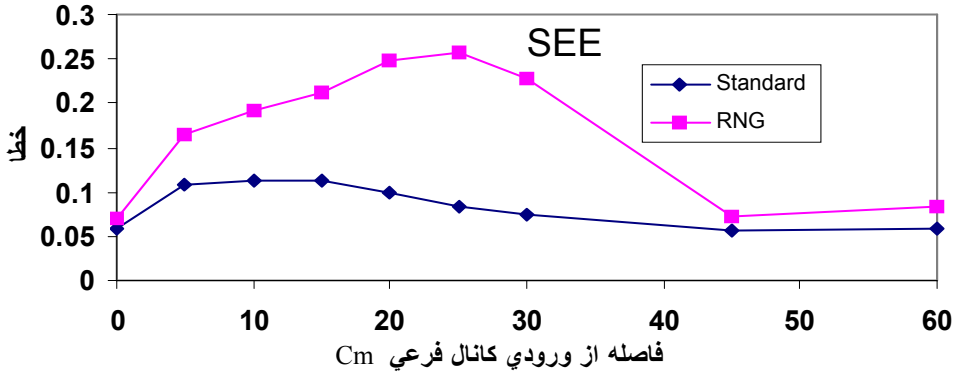



**شکل ۸. مقایسه سرعت محاسبه شده در جهت جریان از مدل RNG K-ε با مقادیر اندازه‌گیری شده در کانال فرعی و در مقاطع مختلف از ورودی برای عمق ۲۰ سانتی‌متر**

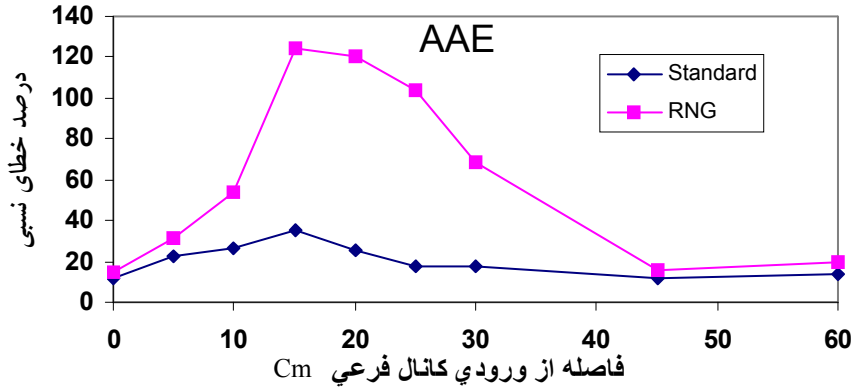


[ Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-27 ]

[ DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.1.2.2 ]




**شکل ۹. خطای SEE در محاسبه سرعت در مقاطع مختلف کانال فرعی و برای عمق ۲۰ سانتی‌متر**




**شکل ۱۰. درصد خطای نسبی در محاسبه سرعت در مقاطع مختلف کانال فرعی برای عمق ۲۰ سانتی‌متر**

رسم شده است.

همان گونه که از شکل ۵ و ۷ پیداست سرعت‌های اندازه‌گیری شده و محاسبه شده از مدل Standard K-ε در ابتدای کانال فرعی نسبتاً با یکدیگر همخوانی دارند. ولی به تدریج در مقطع‌های ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ سانتی‌متری اختلاف زیادی در نزدیکی دیواره‌ها دیده می‌شود و این اختلاف به خاطر تشکیل ناحیه جداشدگی است که طول آن تا ۳۰ سانتی‌متری از ورودی کانال ادامه دارد و به تدریج که از ناحیه جداشدگی دور می‌شویم در مقاطع ۴۵ و ۶۰ سانتی‌متری داده‌های اندازه‌گیری شده و محاسبه شده به یکدیگر نزدیک خواهند شد.

در شکل ۶ و ۸ سرعت‌های محاسبه شده از حل عددی و از مدل RNG K-ε با داده‌های حاصل از آزمایش‌ها مقایسه شده است. همان طور که در شکل مشاهده می‌گردد این مدل به طور نسبی تنها در مقطع صفر از ورودی توانسته با داده‌های آزمایشگاهی هم‌خوانی داشته باشد. در سایر مقاطع مدل نتوانسته با نتایج اندازه‌گیری از آزمایش‌ها هم‌خوانی داشته باشد. به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که مدل Standard K-ε به جز در چند نقطه که از جواب‌های واقعی دور شده است، توانسته است تخمین بهتری از سرعت جریان در کانال فرعی ارائه کند.

جهت بررسی اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده و نتایج به دست آمده از مدل‌های عددی مقادیر SEE (Standard Error of Estimation) و AAE (Average Absolute Error) در مقاطع مختلف و برای عمق ۲۰ سانتی‌متری از معادلات (۱۰ و ۱۱) محاسبه گردید. در شکل ۹ و ۱۰ مقدار خطاهای موجود بین مقادیر اندازه‌گیری



[ Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-27 ]

[ DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.1.2.2 ]

شده در آزمایش‌ها و محاسبه شده از مدل‌های عددی آورده شده است. به طور کلی نتیجه‌گیری شد که با توجه به مقادیر SEE و AAE مقدار خطاهای مدل RNG K-ε در محاسبه سرعت نسبتاً زیاد می‌باشد. ولی در مدل Standard K-ε خطاها در مقایسه با مدل RNG K-ε نسبتاً کم است. بنابراین مدل Standard K-ε تخمین بهتری از سرعت‌های جریان در کانال فرعی می‌دهد.

$$SEE = \sqrt{\frac{\sum \left(U_{exp} - U_{num}\right)^2}{N}} \qquad [10]$$

$$AAE = \frac{100}{N} \sum \left| \frac{U_{exp} - U_{num}}{U_{exp}} \right| \qquad [11]$$

در روابط فوق $U_{exp}$ و $U_{num}$ به ترتیب سرعت‌های اندازه‌گیری شده از آزمایش و محاسبه شده از مدل‌های عددی و N تعداد نقاط اندازه‌گیری در هر مقطع است.

## نتیجه‌گیری

در این بررسی ساختار جریان در یک آبگیر جانبی با زاویه ۴۵ درجه مورد بررسی قرار گرفت. این بررسی توسط مدل فیزیکی و مدل عددی انجام شد. جهت مدلسازی عددی از نرم‌افزار Fluent و مدل‌های اغتشاشی Standard K-ε و RNG K-ε به منظور حل میدان جریان متلاطم استفاده شد. الگوی جداشدگی جریان، اندازه و ابعاد ناحیه جداشدگی و سرعت‌های متوسط زمانی در نقاط مختلف عمق جریان ملاک صحت مدل قرار گرفت. از نظر الگوی جداشدگی جریان ، اندازه و ابعاد ناحیه جداشدگی و سرعت‌های اندازه‌گیری شده مشخص گردید که مدل Standard K-ε در تخمین جداشدگی و سرعت‌ها از دقت بهتری برخوردار است و وضعیت جریان را بهتر شبیه‌سازی می‌کند.

## منابع مورد استفاده


1. Bradshaw, P. 1996. Understanding and prediction of turbulent flow. Int. J. Heat and Fluid Flow (18):45-54.
2. Chen, H. and G. Lian. 1992. The numerical computation of turbulent flow in tee-junctions. J. Hydrodynamics, Amsterdam Ser. B (3):19-25.
3. Lakshmana, R.N.S., K. Sridharan and M.Y.A. Baig. 1968. Experimental study of the division of flow in an open channel. Australasian Conf. on Hydraul. and Fluid Mech., Sydney, Australia, 139-142.
4. Lien, F. S. and A. Leschziner. 1994. Assessment of turbulence transport models including nonlinear RNG eddy viscosity formulation and second moment closure for flow over a backward facing step. Computers & Fluids 23(8):983-1004.
5. Neary, V. S., F. Sotiropoulos and A. J. Odgaard. 1999. Three dimensional model of lateral intake inflows. J. Hydraul. Eng. ASCE 125(2): 126-140.
6. Neary, V. S. and A.J. Odgaard. 1993. Three dimensional flow structure at open channel diversions. J. Hydraul. Eng. ASCE 119(11): 1224-1230.
7. Neary, V. S., F. Sotiropoulos and A. J. Odgaard. 1995. Predicting 3-D flows at lateral water intakes. Proc. Int. Conf. and Exposition on Hydropower. Hydropower Division, ASCE, New York, 2305-2314.
8. Pop, M. and D. W. Sallet. 1983. Experimental investigation of one and two phase flow through a tee junction. Int. Conf. on the modeling of multi phase flow, Coventry, England, 67-88.
9. Shettar, A. S. and K. K. Murthy. 1996. A numerical study of division of flow in open channels. J. Hydraul. Res., Delft 34(5):651-675.
10. Speziale, C. G. and S. Thangam. 1992. Analysis of an RNG based turbulence model for separated flows. Int. J. Eng. Sci. 30(10):1379-1388.
11. Taylor, E. H. 1944. Flow characteristics at rectangular open channel junctions. Trans. ASCE 109:893-912.
12. Yakhot, V. and S. A. Orszag. 1986. Renormalized group analysis of turbulence: I. Basic theory. J. Sci. Comput. 1:3-51.
13. Yakhot, V., S. Thangam, T. B. Gatski and S. A. Orszag. 1992. Development of turbulence models for shear flow by a double expansion technique. Phys. Fluids 4(7):1510-1520


[ Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-27 ]

[ DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.1.2.2 ]