

# تحلیل عددی و آزمایشگاهی تاثیر نسبت دبی های کانال آبگیر به کانال اصلی بر جداسدگی جریان در آبگیر ۴۵ درجه با انتهای باز

علیرضا کشاورزی\* و محمد جواد کاظم زاده پارسی\*\*

بخش آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز  
بخش مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز

(دریافت مقاله: ۸۲/۳/۲۷ - دریافت نسخه نهایی: ۸۳/۶/۲۸)

چکیده - جداسدگی جریان در دهانه آبگیرها از جمله عواملی است که باعث افزایش افت و کاهش آبدی آبگیر می شود. بنابراین مطالعه ساختار جریان، شکل و اندازه ناحیه جداسدگی در طراحی بهینه آبگیرها از اهمیت زیادی برخوردار است. آبگیرها معمولاً با زاویه ۹۰ درجه در کنار کانال اصلی ساخته می شوند. ساختار جریان در این نوع آبگیرها همراه با حداکثر جداسدگی و تولید گرداب است. در این تحقیق اثر نسبت جریان آبگیر به جریان کانال اصلی ( $Q_r$ ) بر مکان، شکل و اندازه ناحیه جداسدگی در آبگیرهای ۴۵ درجه با روشهای آزمایشگاهی و حل عددی جریان متلاطم مورد بررسی قرار گرفت. سرعتهای نقطه‌ای سیال در دوجبهت جریان در صفحه افقی و در فواصل و مقاطع مختلف از ابتدای دهانه آبگیر توسط یک دستگاه سرعت سنج الکترومگنتیک اندازه گیری شد. نتایج نشان داد که مکان و شکل ناحیه جداسدگی تابعی از نسبت جریان در آبگیر ( $Q_r$ ) است. بدین طریق که در مقادیر زیاد ( $Q_r$ )، جداسدگی در پایین دست و مقادیر کم ( $Q_r$ )، جداسدگی در بالا دست دهانه آبگیر رخ می دهد. همچنین توانایی روشهای عددی مانند  $k-\epsilon$  استاندارد و  $RNG-k-\epsilon$  برای حل میدان جریان متلاطم در دهانه آبگیرها بررسی شد. نتایج نشان داد که حل عددی به روش  $k-\epsilon$  استاندارد در مقایسه با روش  $RNG-k-\epsilon$  همخوانی بهتری با نتایج آزمایشگاهی دارد.

واژگان کلیدی: آبگیر ۴۵ درجه، جداسدگی جریان، حل عددی، سازه های انحراف آب، شبکه های توزیع آب

## Numerical and Experimental Analysis of the Effect of Flow Discharge Ratio on Flow Separation at 45 Degree Open End Water Intake

A. Keshavarzi and M.J. Kazemzadeh Parsec

Water Department, College of Agriculture, Shiraz University  
Department of Mechanical Engineering, Shiraz University

**Abstract:** Flow separation at water intake is the main cause of head loss and flow discharge reduction. As a result, study of

\* - استادیار \*\* - دانشجوی کارشناسی ارشد

shape and size of separation is very essential when designing an optimum water intake. Water intake is normally built with a 90 degree angle to the main channel flow direction. However, the flow structure in this type of water intake consists of large separation size along with vortex generation. In this study, the effect of the ratio of discharge at water intake to the main channel discharge ( $Q_i$ ) on the location and size of separation is investigated numerically and experimentally. The velocity of the flow at each point is measured in two dimensions using electromagnetic velocity meter. The results from the experimental data indicate that the location and shape of separations are a function of flow discharge ratio ( $Q_i$ ). These results also indicate that at higher ratios of flow discharge, the separation occurs downstream the water intake, whereas at lower flow discharges, the flow separation occurs upstream the water intake. Additionally, the capabilities of numerical turbulence computation models including standard  $k-\epsilon$  and RNG  $k-\epsilon$  models are investigated in this study. The computed flow velocity from the turbulence models showed that the result of standard  $k-\epsilon$  model is approximately close to the experimental data when compared with RNG  $k-\epsilon$  model.

**Keywords:** 45degree intake, Flow separation, Numerical solution, Diversion structures, Water supply network

## ۱- مقدمه

دیفرانسیلی صورت می‌گیرد که به همراه معادلات حاکم بر جریان سیال حل می‌شوند. این معادلات تکمیلی حاوی ضرایب ثابتی‌اند که عموماً به طور تجربی معین و با انجام آزمایشات بهینه و برای کاربرد حل مسائل خاص به طور دقیق تنظیم می‌شوند.

مطالعات زیادی برای شناخت ساختار جریان از یک کانال اصلی به فرعی با زاویه ۹۰ درجه صورت گرفته است. لاکش مانا و همکاران [۱] در سال ۱۹۶۸ با انجام آزمایشات وسیع بر روی شناخت ساختار جریان ثانویه در دهانه آبرگیر نشان دادند که موقعیت خطوط جدا کننده جریان بین کانال اصلی و فرعی از کف بستر تا سطح آب در دهانه ورودی آبرگیر تغییر می‌کند. در همین راستا، نی یری و ادگارد [۲] در سال ۱۹۹۳ با انجام آزمایشات نشان دادند که خطوط جدا کننده جریان در دهانه آبرگیر در سطح آب نزدیک به دیواره‌اند در صورتی که در کف کانال از دیواره فاصله می‌گیرند.

برای شبیه سازی عددی جریان در دهانه آبرگیر، در سال ۱۹۹۹ نی یری و همکاران [۳] با انجام یک حل عددی سه بعدی میدان جریان در یک آبرگیر ۹۰ درجه با استفاده از مدل تلاطم  $k-\omega$  نشان دادند این مدل تا حدودی می‌تواند ساختار جریان در چنین مسائلی را با دقت قابل قبولی پیش بینی کند. در سال ۱۳۸۱ رحیمی جمنانی [۴] با استفاده از نرم افزار SSIIM جریان سیال در دهانه آبرگیر طرح کوثر را شبیه سازی کرد. در سال ۱۳۸۲ صادقی باغنی و همکاران [۵] جریان در یک دهانه آبرگیر ۹۰ درجه را با یک روش عددی دو بعدی با دو مدل تلاطم لزجت ثابت و مدل پراپتلت حل کردند و نشان دادند که مدل پراپتلت ابعاد ناحیه جدانشدگی را بهتر تخمین می‌زند.

در بسیاری از تاسیسات هیدرولیکی تعیین ساختار جریان از یک کانال اصلی به کانالهای جانبی از اهمیت بالایی برخوردار است. آبرگیرها عموماً در شبکه های توزیع آب، کانالهای آبیاری و زهکشی، شبکه‌های فاضلاب، تاسیسات ورودی به نیروگاه تولید برق و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرند. جریان در این نوع سازه‌ها معمولاً از ساختاری کاملاً سه بعدی برخوردار است و فرض جریان یک بعدی یا دو بعدی برای بررسی جزئیات ساختار جریان در دهانه آبرگیر کافی نیست. هنگامی که جریان سیال از کانال اصلی به کانال فرعی وارد می‌شود یک ناحیه محدود به نام ناحیه جدانشدگی جریان از دیواره ایجاد می‌شود. در این ناحیه از جریان، ذرات سیال در فاصله‌ای از دیواره به دور خود در حرکت‌اند و در واقع این ناحیه از کانال جانبی تأثیری در مقدار تخلیه جریان نخواهد داشت. به عبارت دیگر ناحیه جدانشدگی از سطح مقطع مؤثر آبرگیر می‌کاهد.

بررسی پدیده تلاطم در دینامیک سیالات از جمله مسائلی است که در دهه‌های اخیر توجه بسیاری از پژوهشگران در زمینه‌های مختلف مهندسی را به خود جلب کرده است. تاکنون یک نظریه ریاضی کامل و جامع که بتواند پدیده‌های مختلف تلاطمی را مدل کند ارائه نشده است. بنابراین معمولاً برای بررسی جریانهای متلاطم باید به شبیه سازی این پدیده‌ها پرداخت. در مدل‌هایی که امروزه مورد استفاده قرار می‌گیرند معمولاً سرعت‌های لحظه‌ای سیال به مقدار سرعت میانگین ارتباط داده می‌شود و از این طریق اقدام به حل مسئله می‌کنند. ایجاد این ارتباط از طریق تعریف یک دسته معادلات جبری و یا

از میان مدل‌های مختلف تلاطم، مدل  $k-\varepsilon$  یک مدل عمومی است و به طور گسترده‌ای در شبیه‌سازی مسائل 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 در محیط‌های مختلف انجام گرفته و تاکنون نسخه‌های متفاوتی بر پایه این مدل ارائه شده است. لکن هیچ کدام از این مدل‌ها نتوانسته تخمین رضایت بخشی در طیف وسیع و شرایط مختلف جریان ارائه کند. برای بررسی کارایی مدل‌های  $k-\varepsilon$  در شرایط مختلف جریان، چن و لیان [۶] در سال ۱۹۹۲ مدل  $K-\varepsilon$  استاندارد را با داده‌های آزمایشگاهی پاپ و سالت [۷] در سال ۱۹۸۳، که مربوط به یک اتصال T شکل بود مقایسه کردند نتایج حاصل همخوانی قابل قبولی بین مدل عددی و داده‌های آزمایشگاهی نشان داد. ایسا و الیوریا [۸] در سال ۱۹۹۴ مدل  $K-\varepsilon$  استاندارد را به همراه تابع دیواره در حل میدان جریان در یک اتصال T شکل مورد استفاده قرار دادند و نتایج خوبی در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی گرفتند. شتار و مورتی [۹] در سال ۱۹۹۶ مدل  $K-\varepsilon$  استاندارد با تابع دیواره را در یک کانال روباز و در یک اتصال T شکل، با نسبت دبی ۰/۵۲ مورد آزمون و بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که مدل  $K-\varepsilon$  استاندارد همخوانی خوبی با داده‌های آزمایشگاهی، در نسبت دبی فوق دارد.

یاخوت و اورسزاگ [۱۰] در سال ۱۹۸۶، مدل تلاطمی  $k-\varepsilon$  RNG را پیشنهاد و پس از آن این مدل توسط یاخوت و همکاران [۱۱] در سال ۱۹۹۲ اصلاح شد. برادشاو [۱۲] در سال ۱۹۹۶ متذکر شد که علی‌رغم وجود بحثهایی بر سر چگونگی ورود طبیعت فیزیکی جریان در مدل، این مدل توانسته برای دسته خاصی از مسائل جواب قابل قبولی بدهد. در سال ۲۰۰۰ وانگ و چنگ [۱۳] علی‌رغم ادعای دستیابی به تخمین بهتر با استفاده از این مدل بیان داشتند که تاکنون مدل جامعی که بتواند در جریانهای متلاطم و در طیف وسیعی از مسائل، خصوصیات جریان را در محیط‌های مختلف و شرایط مختلف جریان به طور نسبتاً دقیق، تخمین بزند هنوز ارائه نشده است.

بر خلاف آبگیرهای ۹۰ درجه که تاکنون توسط بسیاری از محققان مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته مطالعات اندکی بر روی ساختار جریان در آبگیرهای ۴۵ درجه انجام شده است. بنابراین در این مقاله بررسی عددی و آزمایشگاهی ساختار جریان در آبگیرهای ۴۵ درجه و در نسبت‌های مختلف جریان انجام گرفته است. هدف مطالعه حاضر بررسی ساختار جریان در دهانه آبگیرهای ۴۵ درجه با انتهای بازو همچنین مطالعه اثر نسبت دبی آبگیر به دبی کانال اصلی بر شکل، اندازه و مکان ناحیه جداشدگی در دهانه آبگیر است. در این مطالعه از مدل‌های جریان متلاطم  $K-\varepsilon$  استاندارد و  $RNG-K-\varepsilon$  برای حل میدان جریان متلاطم استفاده شد و با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شد.

## ۲- مواد و روشها

### ۲-۱- معادله‌های حاکم بر جریان سیال

معادله‌های حاکم بر جریان سیال عبارت است از معادلات بقای جرم و بقای اندازه حرکت که به همراه معادله‌های تلاطم حل می‌شوند. معادله‌های میانگین بقای اندازه حرکت (معادله‌های ناویر-استوکس) و معادله بقای جرم به شکلهای زیر نوشته می‌شوند:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (v + v_t) \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad i = 1, 2, 3 \quad (2)$$

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

$$v_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3)$$

$$k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i} \quad (4)$$

$$\varepsilon = v \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \quad (5)$$

در معادلات فوق  $k$  انرژی جنبشی تلاطمی،  $\varepsilon$  شدت پخش تلاطمی و  $C_{\mu}$  ضریب ثابت بدون بعد است. معادله‌های جابه‌جایی برای  $k$  و  $\varepsilon$  در رینولدزهای بالا به صورت زیر است:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u}_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = P - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) \quad (6)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{u}_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) \quad (7)$$

در این معادله‌ها  $P$  تولید تلاطم است که از معادله زیر به دست می‌آید:

$$P = 2v_t \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij} \quad (8)$$

که در آن  $\bar{S}$  برابر با میانگین شدت تانسور کرنش است و از معادله زیر به دست می‌آید.

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (9)$$

در معادله‌های (6) و (7) مقادیر ثابت  $C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$  ضرایب ثابتی‌اند که به طور تجربی معین می‌شوند.

## ۲-۲- مدل آزمایشگاهی

آزمایشات در یک فلوم آزمایشگاهی از جنس بتون به طول موثر 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 سانتی متر و عرض ۵۰ سانتی متر و در کنار آن یک کانال فرعی با زاویه انحراف ۴۵ درجه به شکل  $\gamma$  به عرض ۲۵ سانتی متر و عمق ۴۰ سانتی متر ساخته شد. در ابتدای کانال اصلی یک حوضچه آرام کننده جریان و در انتهای کانالهای اصلی و فرعی دو دریچه تنظیم کننده برای تقسیم دلخواه جریان بین کانالهای اصلی و فرعی و تنظیم عمق جریان نصب شد. دو سر ریز مثلثی ۹۰ درجه که قبلاً کالیبره و واسنجی شده بودند برای اندازه‌گیری دبی عبوری در انتهای کانال اصلی و فرعی نصب شد. 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 مدل آزمایشگاهی در شکل (۱) نشان داده شده است.

بررسی آزمایشگاهی برای عمقهای ۱۴ و ۲۰ سانتی‌متر و برای دبیهای ۱۶ و ۳۵ لیتر در ثانیه و نسبتهای متفاوت جریان بین کانال فرعی اصلی انجام گرفت. در این آزمایشات نسبت دبی به صورت زیر تعریف شد:

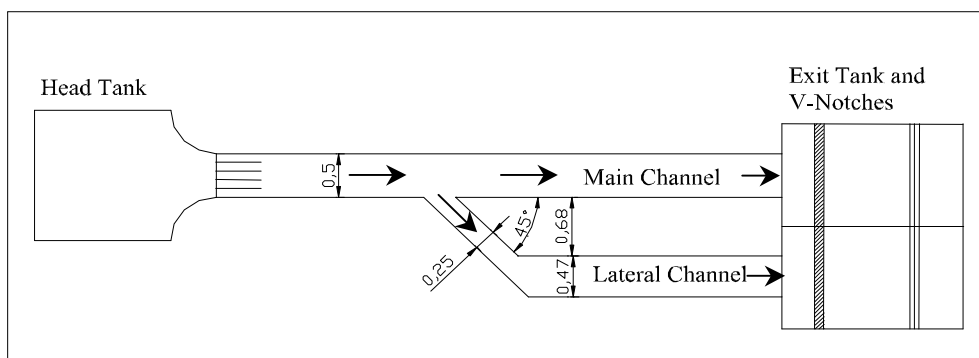
$$Q_r = \frac{Q_L}{Q_{mu}} \quad (10)$$

که در آن  $Q_r$  نسبت دبی،  $Q_L$  دبی جریان در کانال فرعی و  $Q_{mu}$  دبی جریان در کانال اصلی و در بالادست است. در این تحقیق چهار نسبت دبی متفاوت:  $Q_r = 0.2$ ،  $Q_r = 0.4$ ،  $Q_r = 0.6$  و  $Q_r = 0.8$  مورد بررسی قرار گرفت. در هر آزمایش سرعت سیال در ۸۱ نقطه مطابق شکل (۲) در کانال فرعی (دهانه آبیگیر) اندازه‌گیری و ثبت شد. در این مقاله تنها نتایج مربوط به دبی جریان ۱۶ لیتر در ثانیه مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفته و ارائه شده است. شرایط جریان در آزمایشات فوق در جدول (۱) نشان داده شده است.

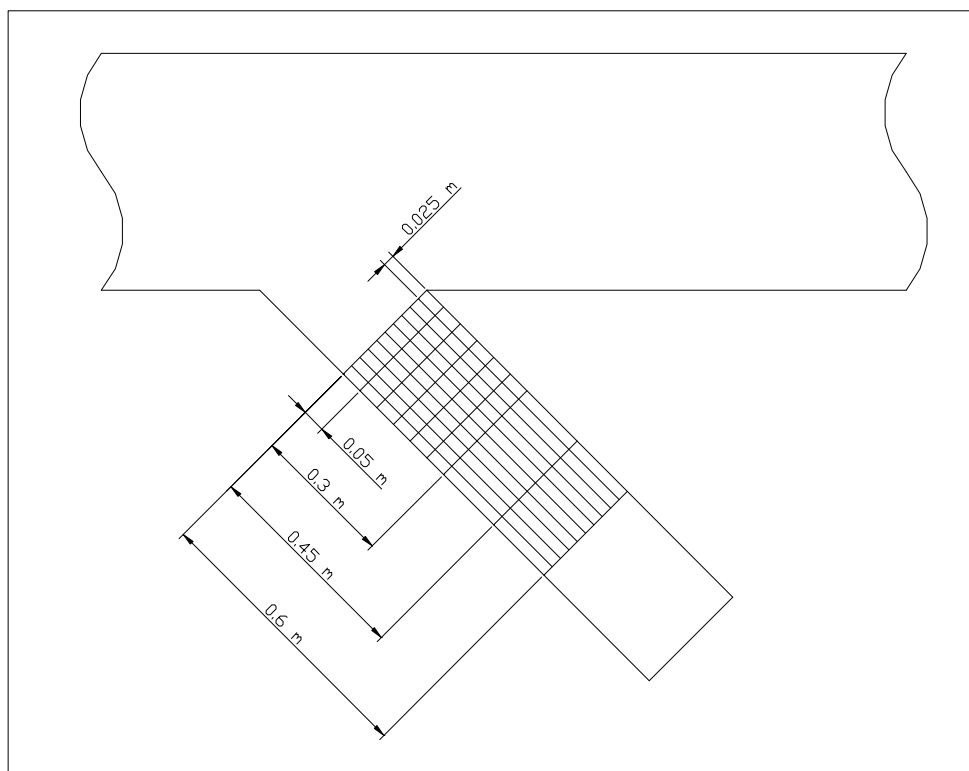
برای اندازه‌گیری سرعت نقطه‌ای سیال از یک دستگاه سرعت سنج الکترومگنتیک از نوع PEMS-30, Ellipsoid استفاده شد سرعت لحظه‌ای در دو جهت در یک صفحه افقی و با فرکانس نمونه برداری ۱۰ نمونه در ثانیه در مقاطع صفر، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ سانتی‌متری از ابتدای کانال فرعی اندازه‌گیری شد. در هر مقطع سرعت جریان در فواصل عرضی ۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰، ۱۲۵، ۱۵۰، ۱۷۵، ۲۰۰ و ۲۲۵ میلی‌متری از دیواره پایین دست، در عمق ۵/۶ سانتی‌متری از کف و در یک شبکه ۹×۹ اندازه‌گیری شد. شکل (۲) محل اندازه‌گیری سرعتها را نشان می‌دهد. سرعتهای اندازه‌گیری شده مستقیماً به رایانه منتقل و ذخیره شد. در شکل (۳) نمونه‌ای از نوسانات سرعت لحظه‌ای در یک نقطه از سیال نشان داده شده است. در این مطالعه سرعت متوسط زمانی در نقاط مختلف جریان به عنوان معیار مقایسه استفاده شد.

## ۲-۳- جزئیات حل عددی

شبیه‌سازی عددی سه بعدی میدان جریان متلاطم در درون کانال فرعی با انشعاب ۴۵ درجه توسط نرم افزار Fluent 6.2.3



شکل ۱- طرح شماتیک فلوم آزمایشگاهی (انتهای کانال اصلی باز) بدون مقیاس



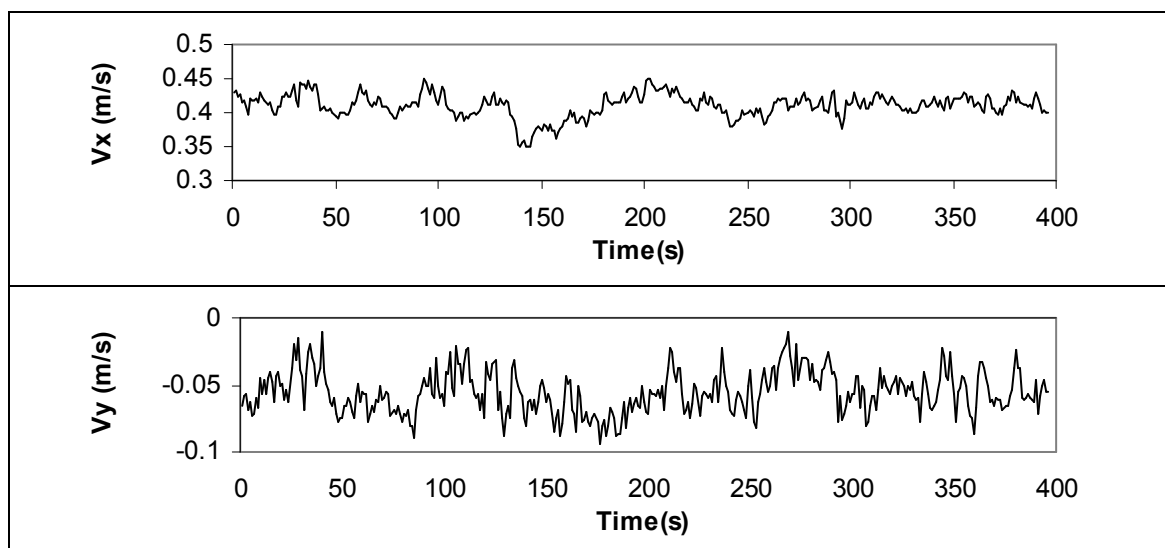
شکل ۲- شبکه نقاط اندازه‌گیری سرعت در کانال فرعی

زیادی در دقت نتایج دارد که عبارت‌اند از یکی اندازه ناحیه محاسباتی و دیگری تعداد و توزیع مناسب نقاط گرهی در شبکه. در این مطالعه به منظور انتخاب مناسب تعداد گره‌های محاسباتی از چهار اندازه متفاوت درشتی شبکه استفاده شد. تعداد سلولها در این چهار شبکه‌ها عبارت‌اند از:  
 ۱- ۹۶۷۰۰، ۲- ۱۱۹۰۰۰، ۳- ۱۵۰۰۰۰ و ۴- ۲۴۷۰۰۰ سلول.

و با استفاده از مدل‌های تلاطمی  $k-\epsilon$  استاندارد و  $RNG-k-\epsilon$  برای دبی ۱۶ لیتر در ثانیه و برای شرایط مختلف آزمایشگاهی و نسبت‌های دبی ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶ و ۰/۸ انجام شد. شبکه محاسباتی مورد نیاز توسط نرم افزار Gambit ساخته شد. ساخت شبکه محاسباتی یکی از مهمترین قسمتهای حل عددی به ویژه در دینامیک سیالات محاسباتی به شمار می‌رود. در شبیه‌سازی عددی دو عامل تاثیر

جدول ۱- شرایط جریان در آزمایشات انجام شده در این مطالعه

شماره آزمایش	عمق جریان سانتیمتر	دبی ورودی لیتر بر ثانیه	نسبت دبی	دبی کانال اصلی لیتر بر ثانیه	دبی کانال فرعی لیتر بر ثانیه	عدد رینولدز در دهانه آبگیر	عدد فرود در دهانه آبگیر
۱	۱۴	۱۶	۰/۸	۳/۲	۱۲/۸	۳۹۰۰۰	۰/۳۱
۲	۱۴	۱۶	۰/۶	۶/۴	۹/۶	۲۹۰۰۰	۰/۲۳
۳	۱۴	۱۶	۰/۴	۹/۶	۶/۴	۲۰۰۰۰	۰/۱۵
۴	۱۴	۱۶	۰/۲	۱۲/۸	۳/۲	۹۸۰۰	۰/۰۸
۵	۱۴	۳۵	۰/۸	۷	۲۸	۸۶۰۰۰	۰/۶۸
۶	۱۴	۳۵	۰/۶	۱۴	۲۱	۶۴۰۰۰	۰/۵۱
۷	۱۴	۳۵	۰/۴	۲۱	۱۴	۴۳۰۰۰	۰/۳۴
۸	۱۴	۳۵	۰/۲	۲۸	۷	۲۱۰۰۰	۰/۱۷
۹	۲۰	۱۶	۰/۸	۳/۲	۱۲/۸	۳۹۰۰۰	۰/۱۸
۱۰	۲۰	۱۶	۰/۶	۶/۴	۹/۶	۲۹۰۰۰	۰/۱۴
۱۱	۲۰	۱۶	۰/۴	۹/۶	۶/۴	۲۰۰۰۰	۰/۰۹۱
۱۲	۲۰	۱۶	۰/۲	۱۲/۸	۳/۲	۹۸۰۰	۰/۰۴۶
۱۳	۲۰	۳۵	۰/۸	۷	۲۸	۸۶۰۰۰	۰/۴
۱۴	۲۰	۳۵	۰/۶	۱۴	۲۱	۶۴۰۰۰	۰/۳
۱۵	۲۰	۳۵	۰/۴	۲۱	۱۴	۴۳۰۰۰	۰/۲
۱۶	۲۰	۳۵	۰/۲	۲۸	۷	۲۱۰۰۰	۰/۱



شکل ۳- نمونه نوسانات سرعت لحظه‌ای سیال در طول زمان و برای یک نقطه خاص

چهار شبکه فوق برای حل یکی از حالتها که عبارت است از شرایط جریان برای نسبت دبی ۰/۲ که مربوط به آزمایش شماره ۴ است استفاده شد و مقادیر سرعت در هر نقطه از روش k-ε استاندارد برای چهار شبکه فوق محاسبه و مورد مقایسه قرار گرفت. خطای نسبی سرعتها در نقاط مختلف و برای سه شبکه اول نسبت به ریزترین شبکه (۲۴۷۰۰۰ سلولی) بر اساس معادله زیر محاسبه شد.

$$e = \frac{\frac{1}{N} \sum |v_{i_n} - v_{i_{finest}}|}{\frac{1}{N} \sum |v_{i_{finest}}|} \times 100 \quad (11)$$

که در این معادله N تعداد نقاط،  $v_{i_n}$  مقدار سرعت در نقطه iام مربوط به شبکه‌های ۱، ۲ و ۳ و  $v_{i_{finest}}$  مقدار سرعت در همان نقطه و محاسبه شده با استفاده از ریزترین شبکه (۴۷۰۰۰ سلولی) است. مقادیر خطای نسبی در جدول (۲) نشان داده شده است. نتایج نشان داد که حداکثر مقدار خطاها برابر ۶/۴۱، ۴/۹۲ و ۳/۴۳ درصد به ترتیب برای شبکه‌های ۹۶۷۰۰، ۱۱۹۰۰۰ و ۱۵۰۰۰۰ سلولی است. لذا با توجه به اختلاف اندک خطا بین شبکه ۱۱۹۰۰۰ و ۱۵۰۰۰۰ و از طرف دیگر زمان محاسباتی زیادی که شبکه ریزتر به خود اختصاص می‌دهد شبکه ۱۱۹۰۰۰ سلولی برای انجام محاسبات بعدی در حالت‌های آزمایشات با عمق ۱۴ سانتیمتر انتخاب شد. از این الگو استفاده و برای مسائل با عمق جریان ۲۰ سانتیمتر از شبکه‌ای با تعداد ۱۸۴۰۰۰ گره استفاده 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 آزاد آب عبارت‌اند از یکی صفر بودن سرعت عمود بر سطح و دیگری صفر بودن فشار، که در حالت کلی در صورتی می‌توان چنین شرایطی را اعمال کرد که مسئله به صورت یک مسئله دارای سطح آزاد حل شود و پروفیل سطح آب از ابتدا مجهول فرض شده و در طی مراحل حل به دست آید. اما در صورتی که عدد فرود جریان، کم باشد تغییرات پروفیل سطح آب کم بوده و می‌توان از آنها صرف‌نظر

کرد. در این صورت سطح آب به صورت یک سطح تخت فرض شد و فقط شرط صفر بودن سرعت عمودی به صورت شرط مرزی تقارنی اعمال می‌شود. واضح است که در چنین حالتی دیگر فشار روی سطح آب صفر نخواهد ماند. اما همان طور که گفته شد به دلیل کم بودن عدد فرود جریان، این انحراف از حالت واقعی قابل چشم‌پوشی خواهد بود.

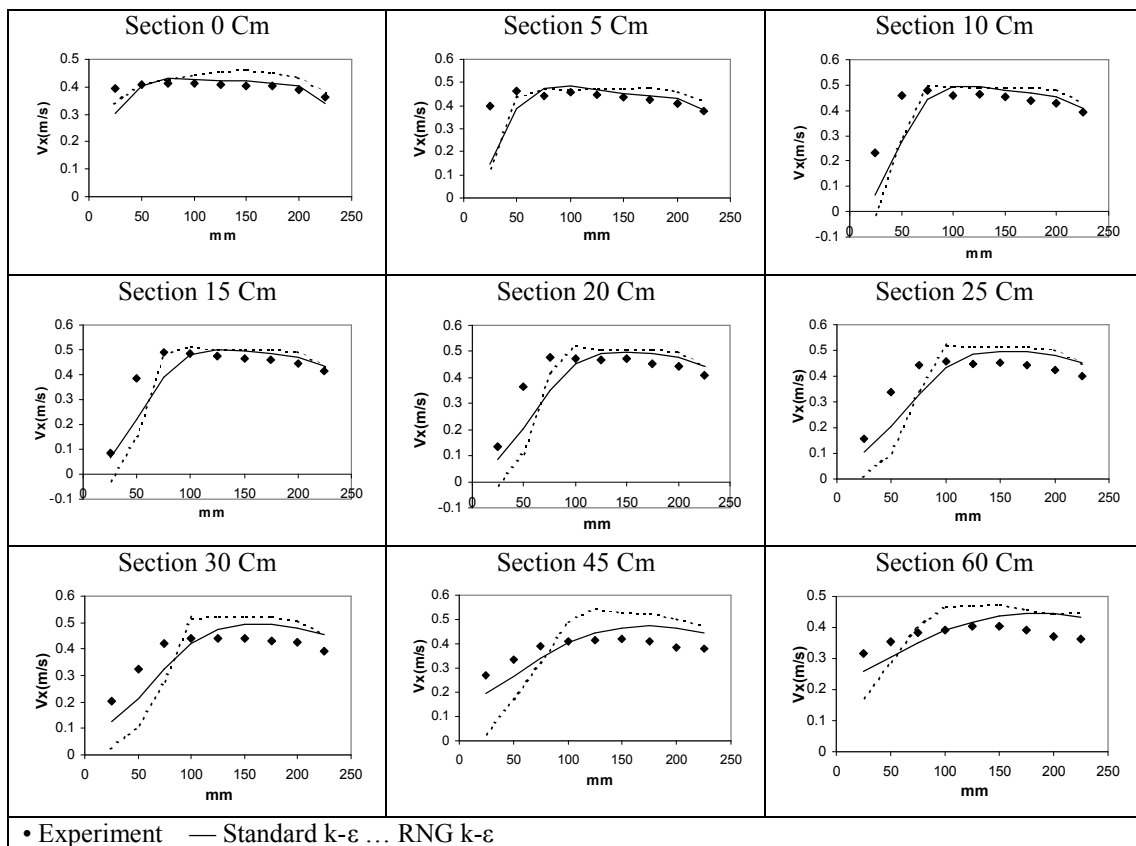
شرایط مرزی ورودی کانال در بالا دست از نوع شرط مرزی سرعت ورودی تعریف شده و توزیع سرعت ورودی به صورت یک توزیع کاملاً گسترش یافته که به نوبه خود از حل جریان درون یک کانال مستقیم و طولانی به دست آمده بود اعمال شد. در پایین دست کانال شرط مرزی جریان خروجی انتخاب شد. برای گسسته‌سازی معادله‌های حاکم از تقریب مرتبه دوم بالا دست و از الگوی سیمپل برای گسسته‌سازی جمله فشار در معادله استفاده شد.

### ۳- نتایج و بحث

نمودار توزیع سرعت‌های اندازه‌گیری شده سیال در مقاطع مختلف کانال فرعی و برای آزمایشات مختلف به همراه مقادیر محاسبه شده توسط مدل‌های k-ε استاندارد و RNG-k-ε در شکل‌های (۴) تا (۱۱) رسم شده است. در این نمودارها محور قائم سرعت سیال در جهت جریان یا به عبارت دیگر سرعت در امتداد کانال جانبی بر حسب متر بر ثانیه و محور افقی بیانگر فاصله نقطه مورد نظر از دیوار پایین دست کانال است. در این صورت نقطه صفر بر روی بر روی محور افقی متناظر با یک نقطه روی دیواره پائین دست بوده و نقطه ۲۵۰ میلیمتری بر روی دیواره بالا دست کانال فرعی واقع می‌باشد. در این شکلها سرعت در ۹ مقطع متفاوت در طول کانال جانبی که عبارت‌اند از مقاطع صفر، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ سانتیمتری از دهانه آبگیر نشان داده شده است. در تمامی این نقاط سرعت در عمق ۰/۶ از سطح اندازه‌گیری شده است. در شکل‌های ۴ الی ۱۱ مقادیر سرعت اندازه‌گیری شده در آزمایشات با لوزیهای پرنرنگ نشان داده شده است و مقادیر سرعت محاسبه شده از مدل

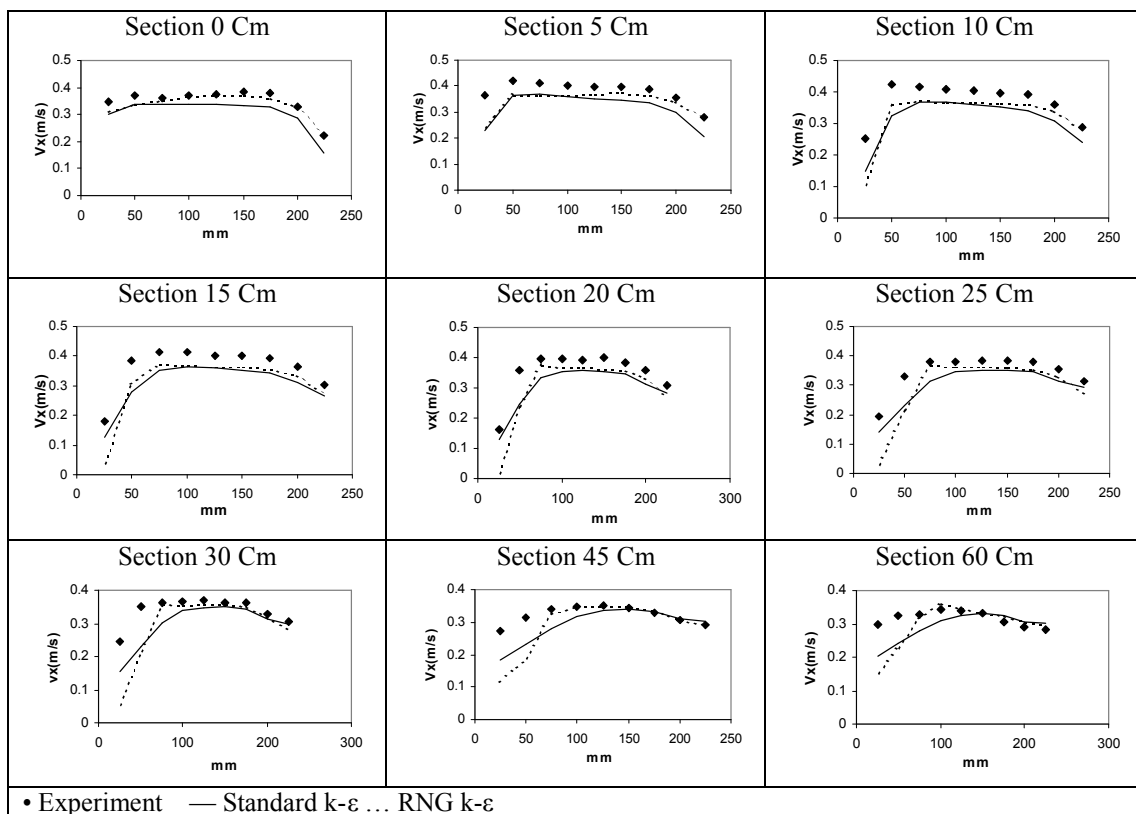
جدول ۲- درصد خطای نسبی شبکه‌های مختلف نسبت به نتایج حاصل از شبکه با ۲۴۷۰۰۰ سلول

شبکه ۱۵۰۰۰۰	شبکه ۱۱۹۰۰۰	شبکه ۹۶۷۰۰	مقطع (cm)
۱/۸۰	۱/۸۲	۲/۰۱	۰
۲/۱۷	۲/۲۷	۲/۳۴	۵
۲/۶۳	۳/۰۵	۳/۱۶	۱۰
۲/۹۲	۳/۴۱	۳/۹۸	۱۵
۳/۰۹	۳/۹۰	۴/۶۳	۲۰
۳/۲۵	۴/۲۹	۵/۳۰	۲۵
۳/۴۳	۴/۶۶	۵/۸۹	۳۰
۲/۸۴	۴/۹۲	۶/۴۱	۴۵
۰/۸۹	۳/۱۸	۴/۳۵	۶۰

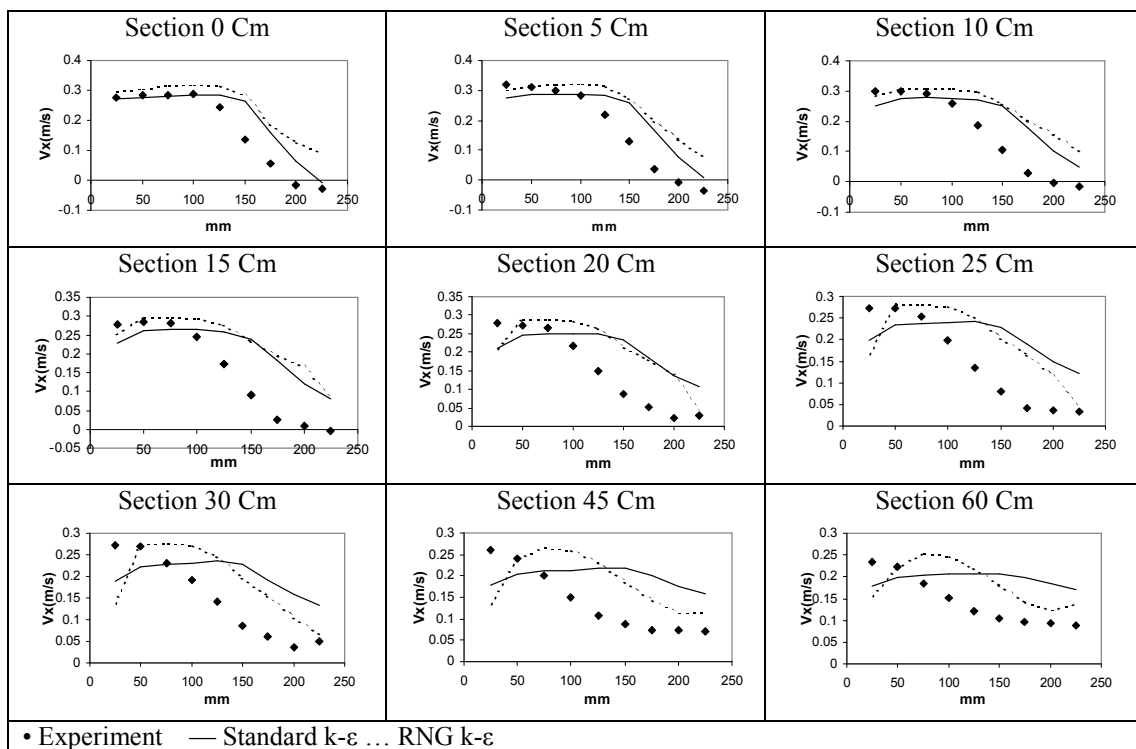


شکل ۴- نمودار توزیع سرعتها برای آزمایش ۱ در عمق ۱۴ سانتیمتری و نسبت دبی ۰/۸

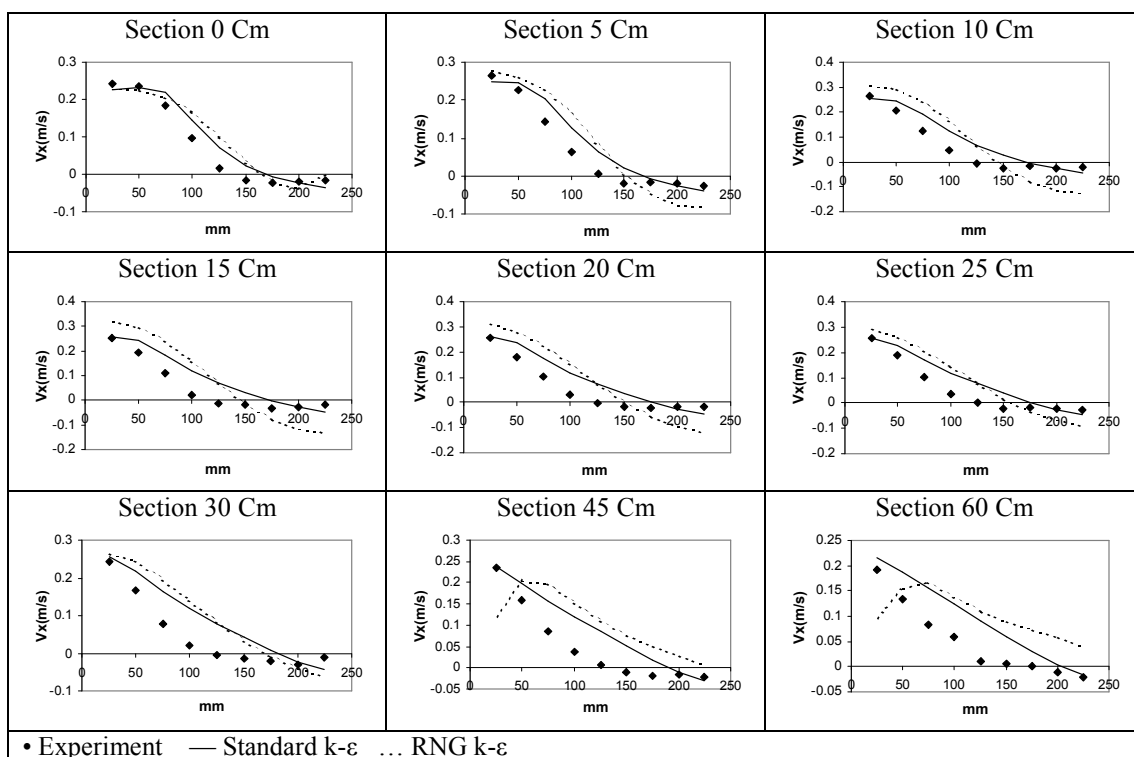




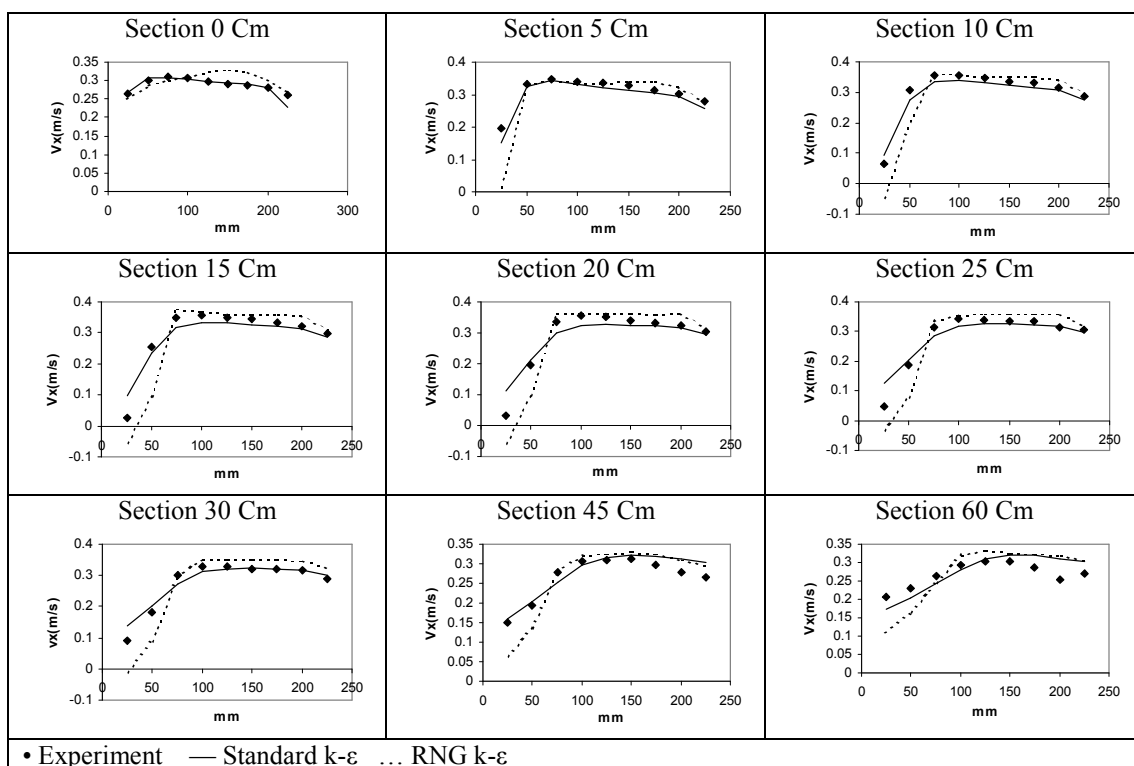
شکل ۵- نمودار توزیع سرعتها برای آزمایش ۲ در عمق ۱۴ سانتیمتری و نسبت دبی ۰/۶



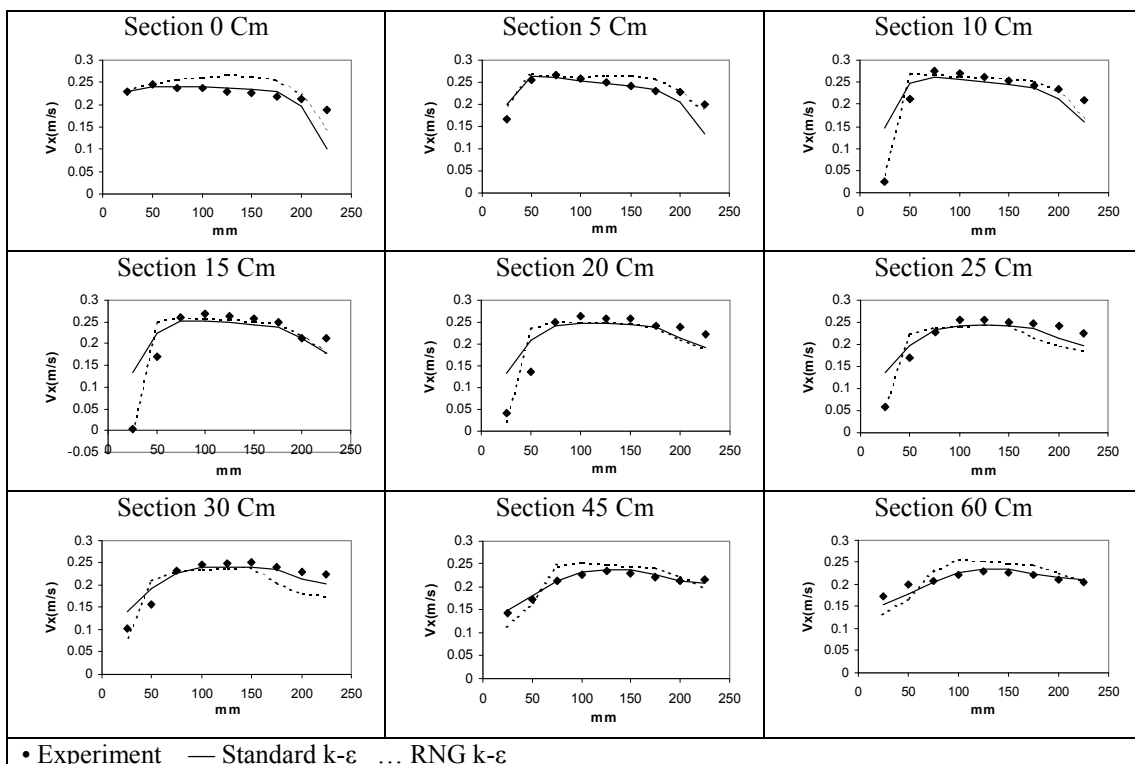
شکل ۶- نمودار توزیع سرعتها برای آزمایش ۳ در عمق ۱۴ سانتیمتری و نسبت دبی ۰/۴



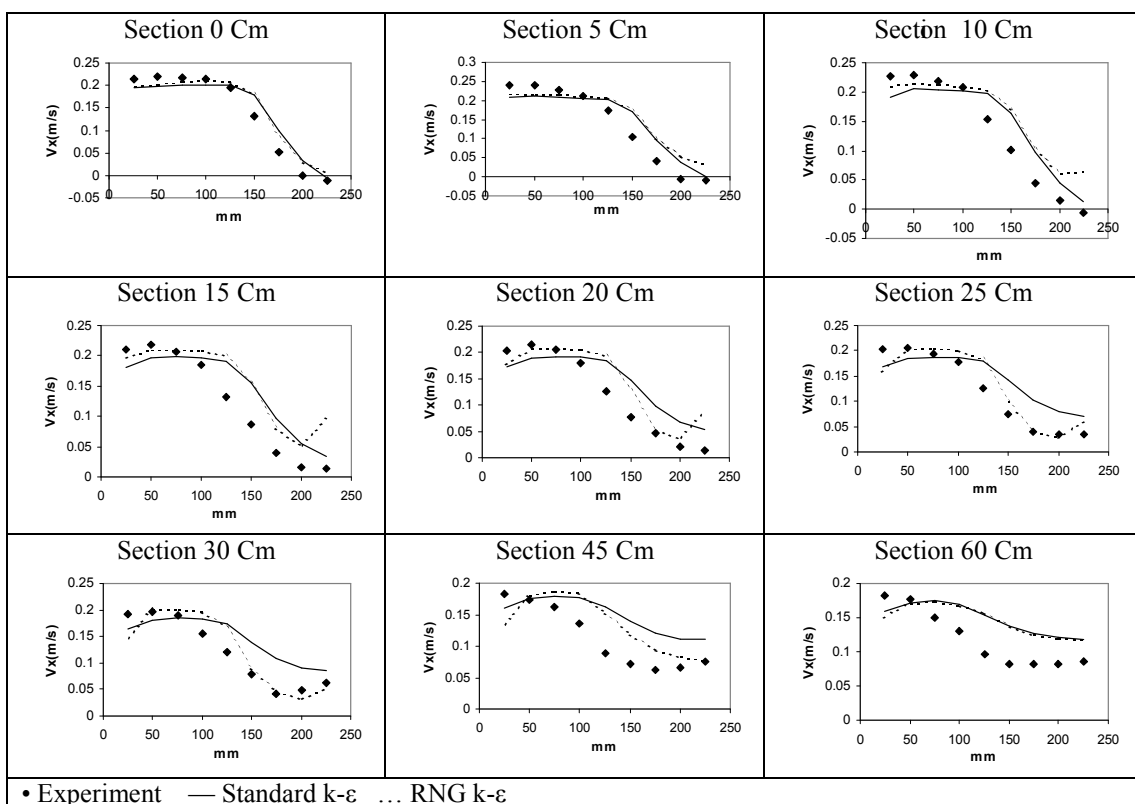
شکل ۷- نمودار توزیع سرعتها برای آزمایش ۴ در عمق ۱۴ سانتیمتری و نسبت دبی ۰/۲



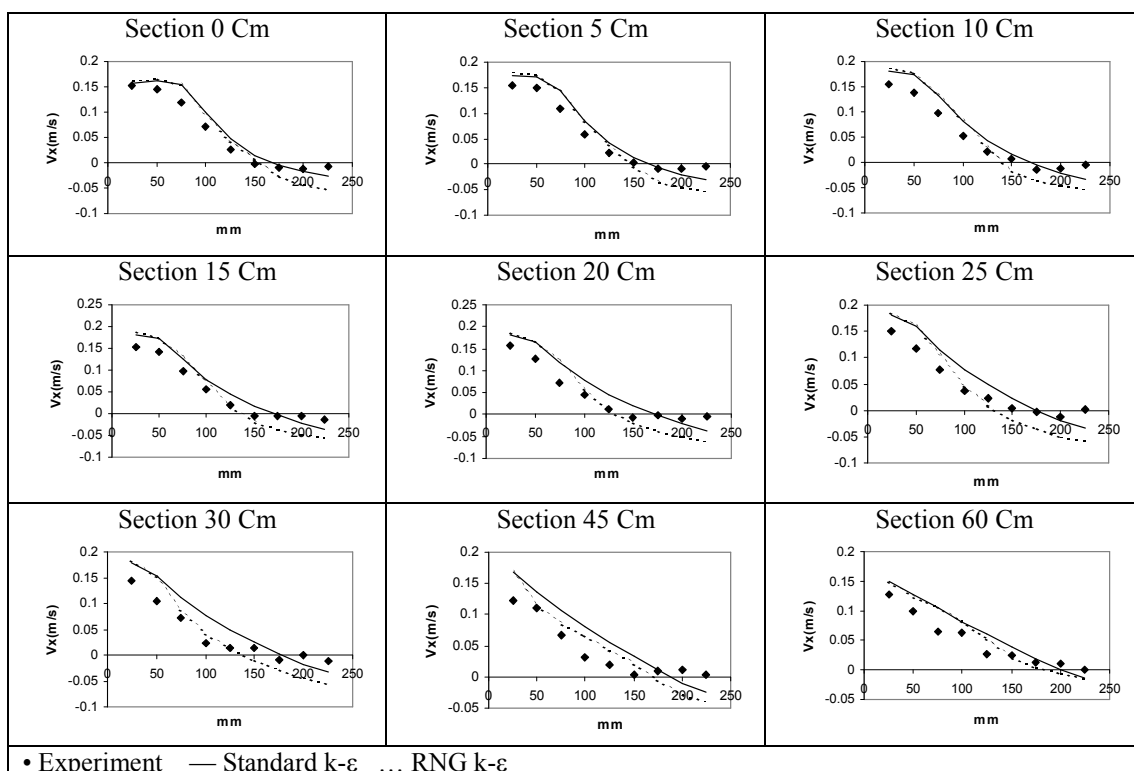
شکل ۸- نمودار توزیع سرعتها برای آزمایش ۹ در عمق ۲۰ سانتیمتری و نسبت دبی ۰/۸



شکل ۹- نمودار توزیع سرعتها برای آزمایش ۱۰ در عمق ۲۰ سانتیمتری و نسبت دبی ۰/۶



شکل ۱۰- نمودار توزیع سرعتها برای آزمایش ۱۱ در عمق ۲۰ سانتیمتری و نسبت دبی ۰/۴



شکل ۱۱- نمودار توزیع سرعتها برای آزمایش ۱۲ در عمق ۲۰ سانتیمتری و نسبت دبی ۰/۲

عرض ناحیه جدانشدگی جریان به اندازه ۵۰ میلیمتر است. زیرا نقطه انحراف سرعتها دقیقا در فاصله ۵۰ میلیمتری از دیواره قرار دارد. در فاصله ۱۵ سانتیمتری از ورودی نقطه انحراف سرعتها به ۷۵ میلیمتر تغییر یافته است. حد اکثر جدانشدگی جریان در آزمایش ۱ شکل ۴) در فاصله ۳۰ سانتیمتری اتفاق می افتد. بعد از مقطع ۳۰ سانتیمتری به تدریج متوسط توزیع سرعت در مقاطع به خط افقی نزدیک می شود. این نمایانگر پایان ناحیه جدانشدگی جریان است.

در شکل ۵) نتایج مربوط به آزمایش ۲ و نسبت دبی ۰/۶، با مقایسه سرعت در مقاطع مختلف مشاهده می شود که جدانشدگی در این حالت نیز در پایین دست اتفاق افتاده است ولی حد اکثر جدانشدگی در مقاطع ۲۰ و ۲۵ سانتیمتری از ورودی و با ضخامت ۷۵ میلیمتر است. در فاصله ۴۵ سانتیمتری از ورودی ضخامت جدانشدگی تقریبا به صفر رسیده و جدا شدگی مشاهده نمی شود. نتایج روشهای عددی نیز نشان داد که محل جدانشدگی در پایین دست اتفاق خواهد افتاد. لکن مدل

k-ε استاندارد با خطوط پر رنگ و مقادیر محاسبه شده از مدل RNG-k-ε با خطوط بریده نشان داده شده است.

برای تشخیص و تعیین اندازه جدانشدگی از تغییر ناگهانی اندازه سرعت جریان استفاده شد. با مقایسه شکلهای (۴) الی (۷) مربوط به آزمایشات ۱ الی ۴ که به ترتیب برای نسبت دبی های متفاوت ۰/۸، ۰/۶، ۰/۴، ۰/۲ است می توان چنین نتیجه گیری کرد که مکان وقوع جدانشدگی بستگی به نسبت دبی جریان بین کانال اصلی و فرعی دارد. به عبارت دیگر بسته به نسبت تقسیم جریان، مکان جدانشدگی ممکن است در بالادست و یا در پایین دست دهانه ورودی کانال جانبی اتفاق افتد.

همان طور که مشاهده می شود در شکل (۴) مربوط به آزمایش ۱، و نسبت دبی ۰/۸، در مقطع صفر یا به عبارتی در ورودی دهانه آبگیر، سرعتهای اندازه گیری شده تقریبا بر روی یک خط افقی قرار دارند در این نقطه جدانشدگی وجود ندارد. در مقایسه سرعتها در مقاطع صفر و ۱۰ سانتیمتری مشاهده می شود که در مقطع ۱۰ سانتیمتری جدانشدگی تشکیل شده و

K-ε RNG طول ناحیه جداشدگی را بیشتر از مدل K-ε استاندارد تخمین زده است.

بر عکس آزمایشات ۱ و ۲ در آزمایش ۳، شکل (۶) مربوط به نسبت دبی ۰/۴، جداشدگی در بالادست ظاهر شده است و ناحیه بسیار طولانی را اشغال کرده است و تا انتهای کانال جانبی ادامه یافته است. این پدیده به دلیل غالب بودن جریان در بالادست است. با مقایسه داده‌های آزمایشگاهی و نتایج حل عددی مشاهده شد که مقادیر سرعت‌های محاسبه شده از حل عددی به طور کلی از مقادیر داده‌های آزمایشگاهی بیشتر است و تخمین بیشتری از سرعت را ارائه می‌دهند.

در شکل (۷) مربوط به آزمایش ۴ و نسبت دبی ۰/۲، جداشدگی جریان کاملاً در بالادست مشاهده می‌شود و تا انتهای کانال جانبی ادامه می‌یابد. همچنین نتایج مدل‌های عددی در مقایسه با آزمایش ۳ بهتر بوده و نتایج عددی با داده‌های آزمایشگاهی همخوانی بهتری نشان داده‌اند.

از مقایسه شکل‌های (۴) الی (۷) مربوط به آزمایشات ۱ الی ۴ که در نسبت‌های دبی ۰/۸ الی ۰/۲ انجام گرفت می‌توان نتیجه‌گیری کرد که انتقال جداشدگی از پایین دست به بالادست با تغییر نسبت دبی اتفاق می‌افتد. و مرز بحرانی انتقال در حدود نسبت ۰/۵ خواهد بود.

روند انتقال محل جدا شدگی در آزمایشات (۹) الی (۱۲)، شکل‌های (۸) الی (۱۱) که مربوط به عمق ۲۰ سانتیمتری و همان نسبت های دبی جریان است نیز مشاهده شد. این روند انتقال همانند آزمایشات ۱ الی ۴ اتفاق افتاد در آزمایشات ۱۱ و ۱۲ محل جداشدگی جریان به بالادست منتقل شده است همان طور که قبلاً ذکر شده این روند در آزمایشات ۳ و ۴ نیز مشاهده شد لذا نسبت دبی بین کانال‌های اصلی و فرعی عامل تعیین کننده در محل جداشدگی جریان است و محدوده انتقال جداشدگی تقریباً نسبت ۰/۵ است. این روند در مدل‌های عددی K-ε استاندارد و RNG- K-ε نیز مشاهده می‌شود لکن برای آزمایش ۱۱ که نسبت آن ۰/۴ است. مدل‌های عددی کمترین همخوانی را در محدوده جداشدگی با داده‌های آزمایشگاهی

نشان داده‌اند و در همه مقاطع تخمین مدل‌های عددی بیشتر از آزمایشات بوده است. در آزمایش ۱۲، شکل (۱۱) که نسبت دبی آن ۰/۲ است مدل‌های عددی همخوانی خوبی نسبت به مقادیر آزمایشگاهی دارند. اندازه جداشدگی جریان نیز در بالادست به تدریج به حداکثر مقدار خود می‌رسد.

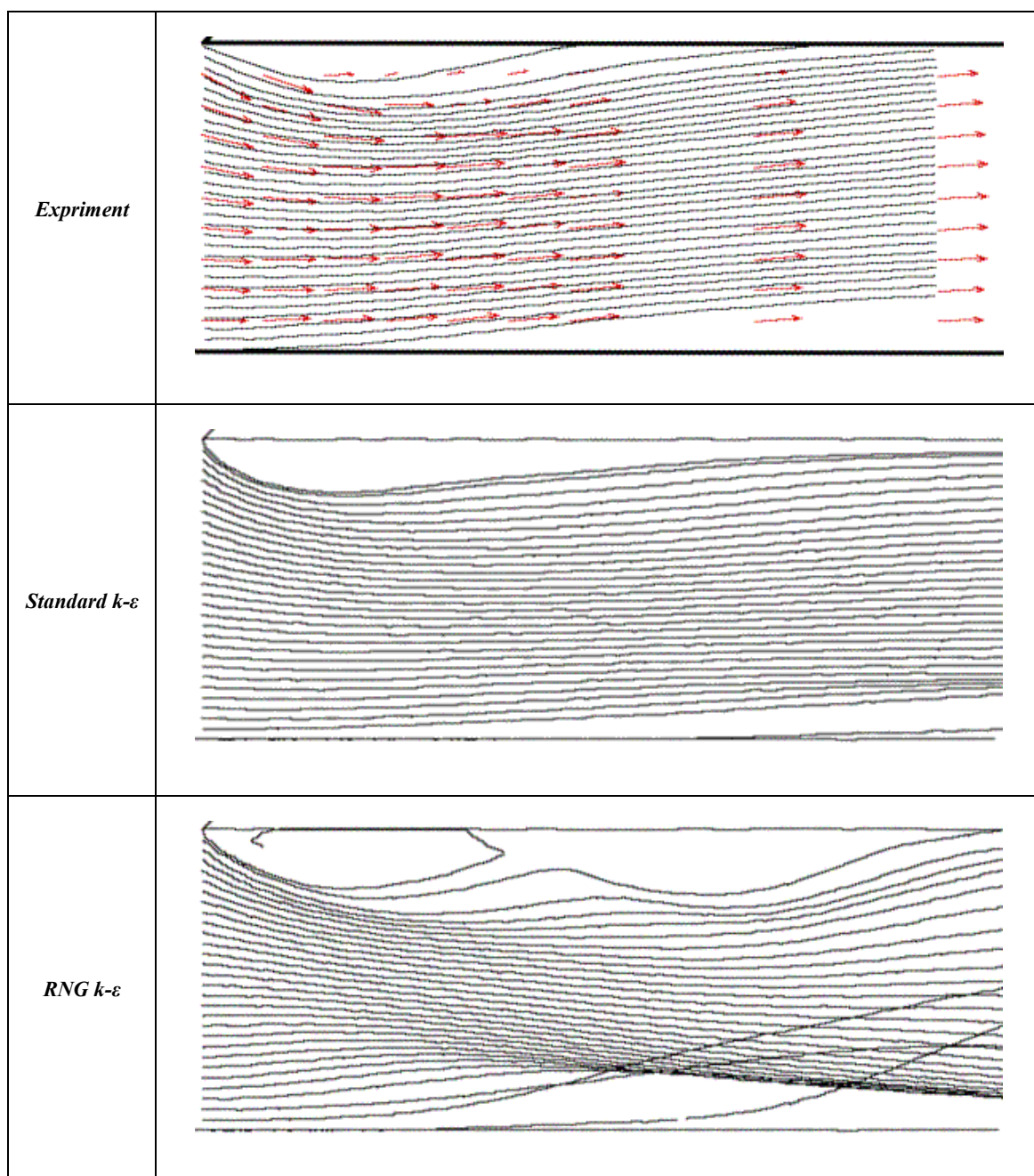
در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) نمودار خطوط جریان برای دو حالت نسبت جریان ۰/۲ و ۰/۴ در عمق ۱۴ سانتیمتری برای نتایج آزمایشگاهی و دو مدل تلاطم رسم شده است. محل شروع و پایان جداشدگی برای اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی و مدل‌های عددی K-ε استاندارد و RNG- K-ε مقایسه شده است. همان گونه که در این شکل‌ها دیده می‌شود خطوط جریان رسم شده بر اساس مدل K-ε استاندارد بسیار به خطوط جریان آزمایشگاهی شباهت دارد. برخلاف آن خطوط جریان حاصل از مدل تلاطم RNG-k-ε به دلیل بزرگ نمایی بیش از حد گردابه‌ها چندان به داده‌های آزمایشگاهی شباهت ندارند.

در شکل (۱۴) نحوه انتقال ناحیه جدا شدگی از پایین دست به بالا دست که توسط مدل K-ε استاندارد محاسبه شده توسط رسم خطوط جریان نشان داده شده است. همان طور که در شکل مشاهده می‌شود در نسبت دبی ۰/۸ ناحیه جداشدگی کاملاً در پایین دست اتفاق افتاده و در نسبت دبی ۰/۲ کاملاً به بالادست انتقال یافته است. پدیده انتقال ناحیه جداشدگی برای عمق‌های ۱۴ و ۲۰ سانتیمتری به طور یکسان مشاهده شد.

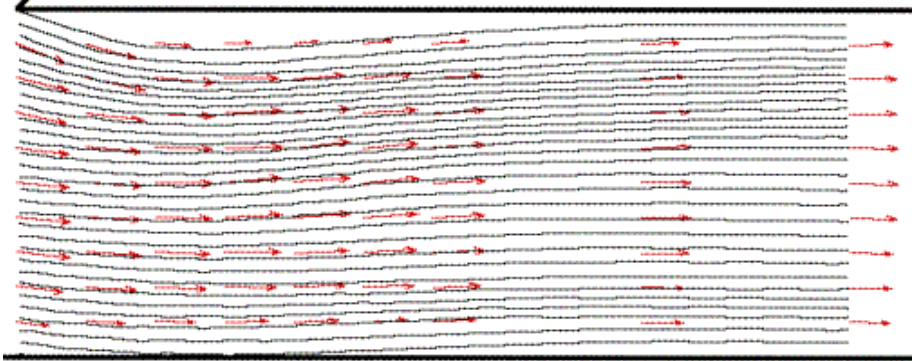
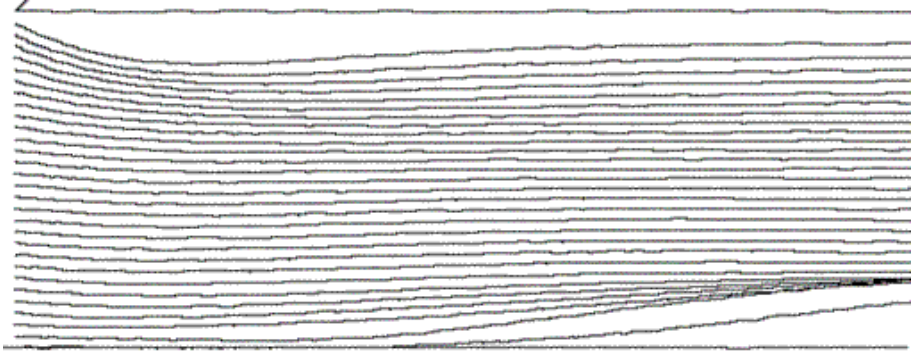
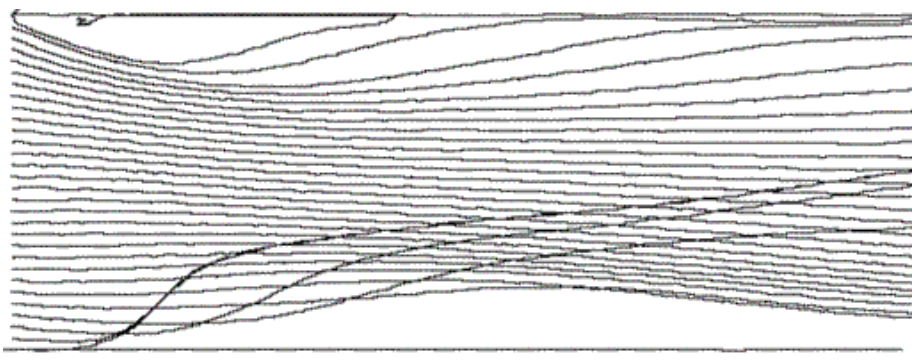
برای مقایسه نتایج مدل‌های عددی K-ε استاندارد و RNG-k-ε از معیار خطای مطلق آماری استفاده شد. خطای SEE بیانگر اختلاف بین مقادیر محاسبه شده و اندازه‌گیری شده است. در معادله زیر نحوه محاسبه این خطا آورده شده است:

$$SEE = \sqrt{\frac{\sum (U_{exp} - U_{num})^2}{N}} \quad (12)$$

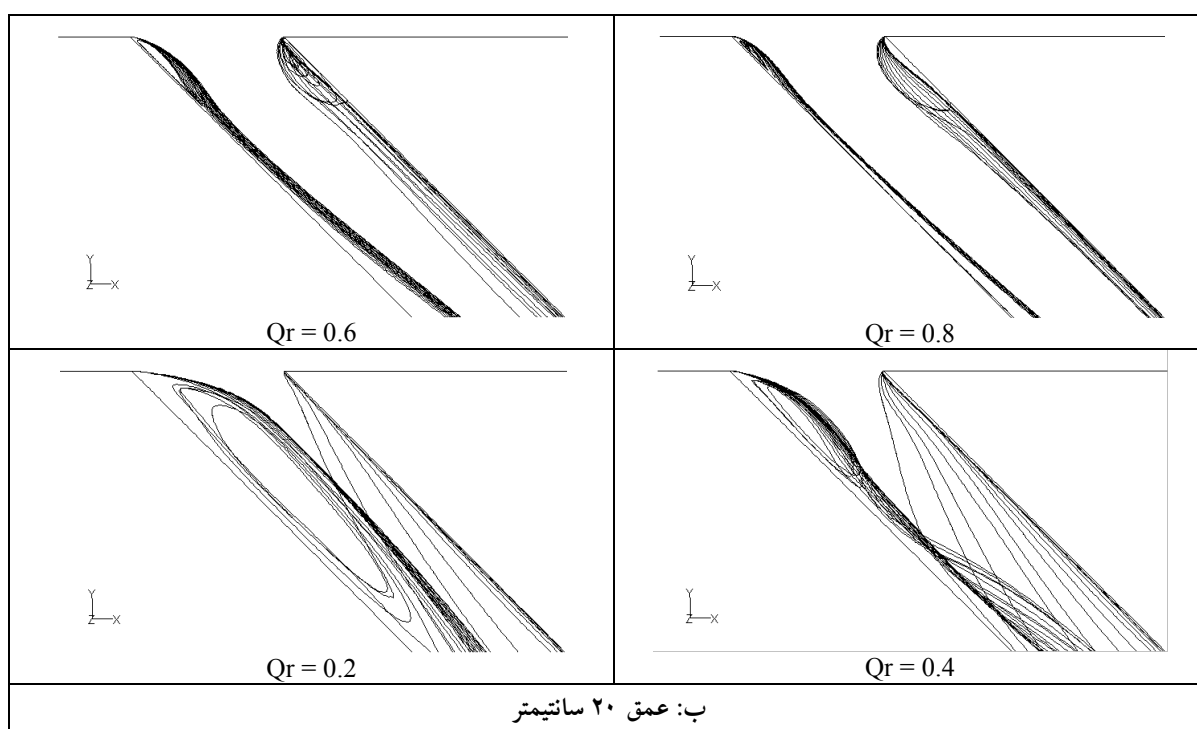
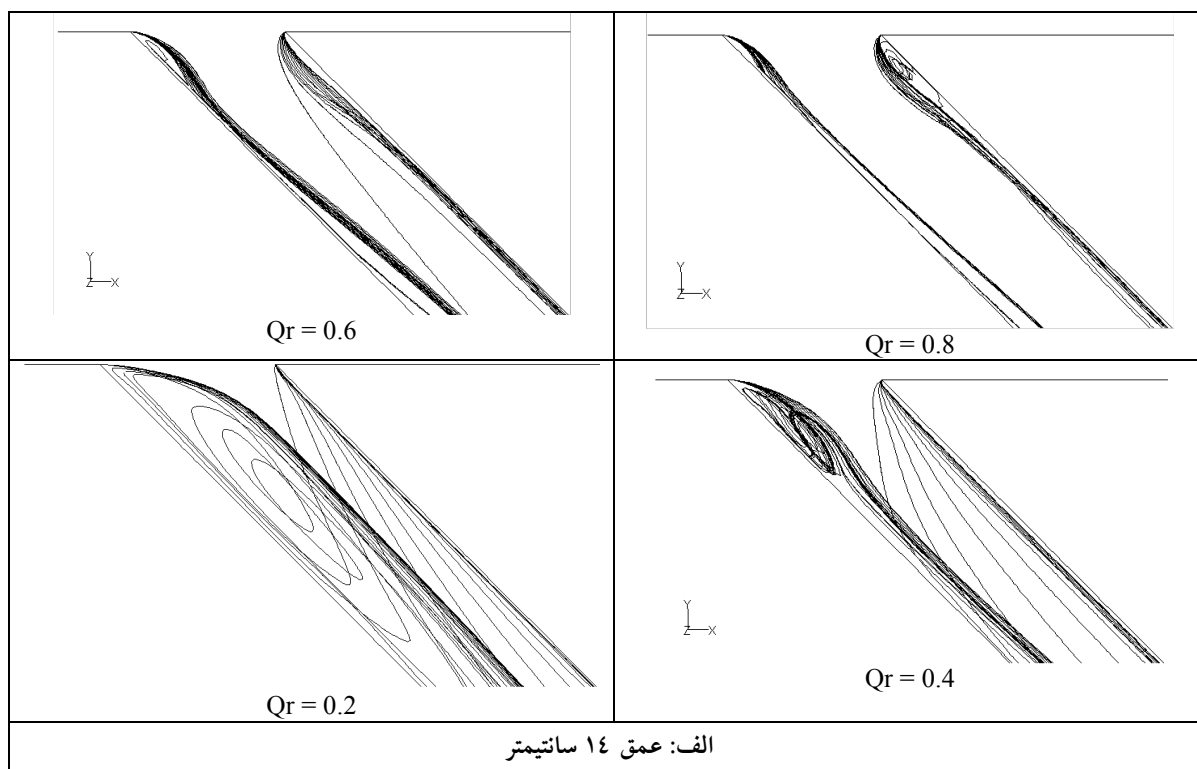
حداقل مقدار SEE برابر صفر است و آن بیانگر این است که هیچ گونه اختلافی بین مقادیر محاسبه شده و اندازه‌گیری شده وجود ندارد هر چه مقدار خطای مطلق کوچک باشد نشانه تخمین بهتر و دقیقتر مدل است در این تحقیق مقادیر



شکل ۱۲- رسم خطوط جریان براساس مقادیر آزمایشگاهی و دو مدل عددی در عمق ۱۴ سانتیمتری و نسبت دبی ۰/۲

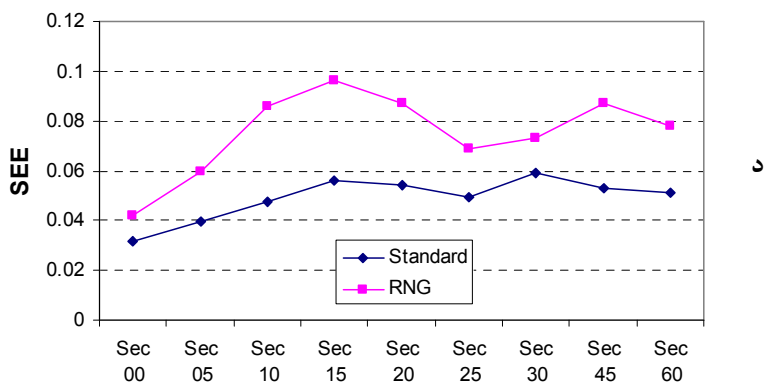
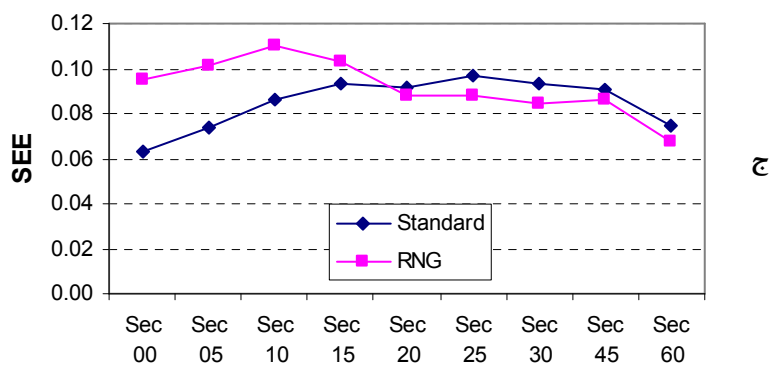
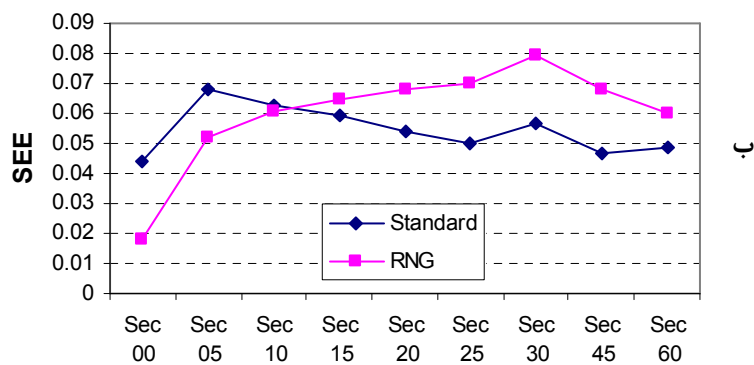
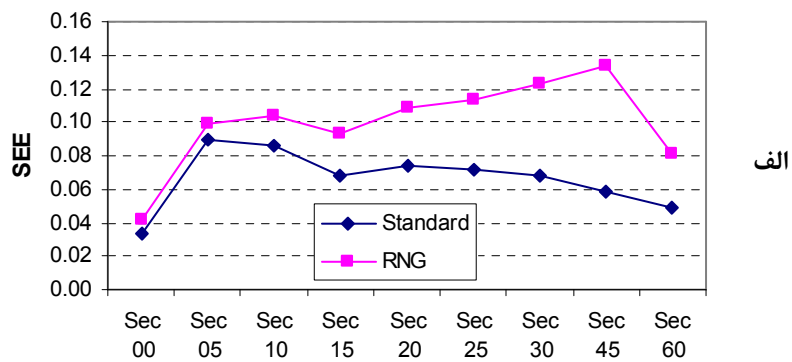
<p><i>Expriment</i></p>	
<p><i>Standard k-ε</i></p>	
<p><i>RNG k-ε</i></p>	

شکل ۱۳- رسم خطوط جریان براساس مقادیر آزمایشگاهی و دو مدل عددی در عمق ۱۴ سانتیمتری و نسبت دبی ۰/۴

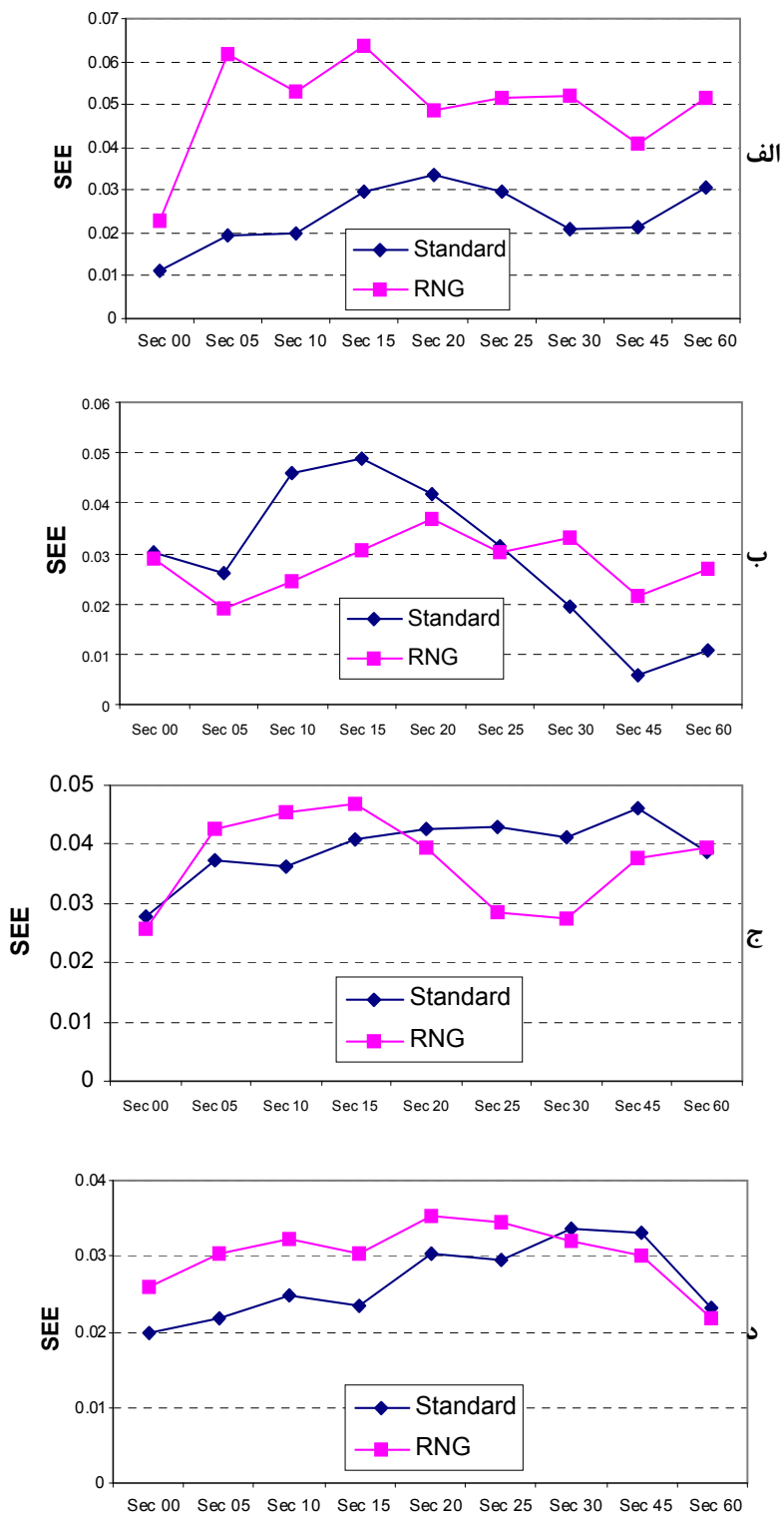


شکل ۱۴- رسم خطوط جریان در نسبت دبی‌های متفاوت و نحوه انتقال ناحیه جداشدگی با تغییر نسبت دبی برای مدل k-ε استاندارد و دبی کل ۱۶ لیتر بر ثانیه





شکل ۱۵ - تحلیل خطا برای نسبت دبی‌های مختلف برای عمق ۱۴ سانتیمتر الف: نسبت دبی ۰/۸ ،  
 ب: نسبت دبی ۰/۶ ، ج: نسبت دبی ۰/۴ ، د: نسبت دبی ۰/۲



شکل ۱۶- تحلیل خطا برای نسبت دبی های مختلف برای عمق ۲۰ سانتیمتری  
 الف: نسبت دبی ۰/۸ ، ب: نسبت دبی ۰/۶ ، ج: نسبت دبی ۰/۴ ، د: نسبت دبی ۰/۲

k-ε Standard توانسته در شرایط فوق نیز تخمین خوبی نسبت به مدل RNG-k-ε داشته باشد.

#### ۴- نتیجه گیری

در این تحقیق ساختار جریان و خصوصاً جداشدگی جریان در دهانه آبگیر با زاویه ۴۵ درجه مورد مطالعه قرار گرفت و تاثیر نسبت جریان بر روی شکل و اندازه جدا شدگی با استفاده از حل عددی و داده‌های آزمایشگاهی بررسی شد. نتایج سرعت اندازه‌گیری شده در جهت جریان با سرعت محاسبه شده از مدل‌های عددی K-ε استاندارد و RNG K-ε مقایسه شد. با استفاده از نتایج آماری و خطای مطلق نتیجه‌گیری شد که به طور کلی روش K-ε استاندارد توانسته مقادیر سرعت در جهت جریان را بهتر تخمین بزند علاوه بر این در این تحقیق نتیجه‌گیری شد که محل اتفاق جداشدگی جریان تابع نسبت دبی بین کانال اصلی و فرعی است. و مشخص شد که در نسبت‌های دبی زیاد جدا شدگی در پایین دست ولی در نسبت‌های کم جداشدگی در بالا دست آبگیر اتفاق می‌افتد و مشخص شد که مرز انتقال جداشدگی نسبت دبی ۰/۵ است.

خطای مطلق برای دو مدل k-ε استاندارد و RNG-k-ε محاسبه شد و در شکل‌های (۱۵) و (۱۶) رسم و مقایسه شد. همان طور که از شکل (۱۵) دیده می‌شود از ۳۶ مقطع اندازه‌گیری شده در شرایط مختلف و برای عمق ۱۴ سانتیمتر و در ۲۸ مقطع مقدار خطای مطلق در حالت k-ε استاندارد کمتر از مقدار خطای مطلق در حالت RNG-k-ε، دو مقطع دارای خطای مطلق تقریباً مساوی و در چهار مقطع مقدار خطای مطلق در حالت k-ε استاندارد بیشتر از مقدار خطای مطلق در حالت RNG-k-ε است. لذا به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که در این حالت مدل k-ε استاندارد به دلیل مقدار کم خطای مطلق در اکثر نقاط و مقاطع نسبت به حالت RNG-k-ε توانسته تخمین بهتری داشته باشد.

مقدار خطای مطلق برای مقاطع مختلف، نسبت‌های متفاوت دبی و عمق ۲۰ سانتیمتر بین داده‌های اندازه‌گیری شده و مدل‌های k-ε استاندارد و RNG-k-ε محاسبه و در شکل ۱۶ رسم شد. در این حالت از ۳۶ مقطع در کانال جانبی تعداد ۲۱ مقطع دارای خطای مطلق کمتر در مدل k-ε استاندارد نسبت به مدل RNG-k-ε بودند از مقاطع فوق تعداد ۶ مقطع دارای خطای مطلق تقریباً مساوی و در ۹ مقطع مقدار خطای مطلق در مدل k-ε استاندارد بیشتر از مقدار خطای مطلق در مدل RNG-k-ε است لذا به طور کلی می‌توان نتیجه‌گیری کرد که مدل

#### مراجع

1. Lakshmana, R.N.S., Sridharan, K. and Baig, M.Y.A. "Experimental Study of the Division of Flow in an Open Channel," *Australasian Conf. on Hydr. and Fluid Mech.*, Sydney, Australia, 139-142, 1968.
2. Neary, V. S. and Odgaard, A. J. "Three Dimensional Flow Structure at Open Channel Diversions," *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 119(11):1224-1230, 1993.
3. Neary, V.S., Sotiropoulos, F. and Odgaard, A.J. "Three Dimensional Model of Lateral Intake Inflows," *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 125(2):126-140, 1999.
۴. رحیمی جمنانی، م.، "استفاده از مدل سه بعدی جریان برای شبیه سازی دهانه آبگیر (مطالعه موردی آبگیر طرح کوثر)." ششمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ۱۳۸۱.
۵. صادقی باغنی، م.، کلاهدوزان، م و محمدیان، ع م.، "مطالعه آزمایشگاهی و عددی مدل‌های آشفتگی جریان در یک سازه آبگیر جانبی"، چهارمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشکده مهندسی دانشگاه شیراز، ۱۳۸۲.
6. Chen, H., and Lian, G., "The Numerical Computation of Turbulent Flow in Tee-Junctions," *J. Hydrodynamics, Amsterdam Ser. B (3):19 25*, 1992
7. Pop, M., and Sallet, D.W., "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, 1983.
8. Issa, R. I., and Oliveira, P. I, “Numerical Prediction of Phase Separation in Two Phase Flow Through T-Junctions,” *Computers and Fluids*, 23(2):347-372, 1994.
  9. Shettar, A.S., and Murthy, K.K, “A Numerical Study of Division of Flow in Open Channels,” *J. Hydr. Res., Delft, The Netherlands*, 34(5):651-675, 1996.
  10. Yakhot, V. and Orszag, S.A, “Renormalized Group Analysis of Turbulence: I. Basic Theory” *J. Scientific Computing*, (1):3-51, 1986
  11. Yakhot, V., S. Thangam, Gatski, T.B. and Orszag, S.A, “Development of Turbulence Models for Shear Flow by a Double Expansion Technique,” *Phys. Fluids A* 4(7):1510-1515, 1992.
  12. Bradshaw, P., Understanding and Prediction of Turbulent Flow,” *Int. J. Heat and Fluid Flow* (18):45-54, 1996.
  13. Wang, X and Cheng, L, “Three-Dimensional Simulation of Side Discharge into a Cross Channel Flow,” *Computers & Fluids*, 29:415-433, 2000.