

## بررسی عددی و آزمایشگاهی میدان جریان متلاطم در بین دو ریبیل در کف کانال روباز

سیدهدایت‌اله نبوی دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، بخش مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز  
 علیرضا کشاورزی دانشیار بخش مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز  
 محمدجواد کاظم‌زاده استادیار بخش مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شیراز  
 پاریسی  
 بهرننگ سیستانی تکنیسین آزمایشگاه هیدرولیک رسوب، بخش مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

### چکیده

در این مقاله میدان جریان متلاطم در بین دو ریبیل به صورت عددی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق از دستگاه سرعت‌سنج سه‌بعدی اولتراسونیک Micro-ADV جهت اندازه‌گیری میدان سرعت در اطراف و روی ریبیل‌ها استفاده شد. برای این منظور سرعت سیال در ۱۲۸ نقطه بر روی یک شبکه منظم، به صورت سه‌بعدی اندازه‌گیری شد. پس از اندازه‌گیری سرعت، برای رسم خطوط جریان و مشخص کردن ناحیه جداسازی از روش ردیابی خطوط جریان (Stream tracing) استفاده شد. علاوه بر آن میدان جریان متلاطم توسط روش حجم محدود با استفاده از چهار مدل اغتشاشی  $k-\epsilon$  Standard،  $k-\epsilon$  RNG،  $k-\omega$  Standard و  $k-\omega$  SST به کمک نرم‌افزار Fluent محاسبه گردید. نتایج نشان داد که مدل‌های تلاطمی  $k-\epsilon$  Standard و  $k-\epsilon$  RNG از هم‌خوانی بهتری نسبت به دیگر مدل‌های تلاطمی با نتایج آزمایشگاهی برخوردار است. کلمات کلیدی: ریبیل، جریان متلاطم، اندازه‌گیری میدان سرعت، مدل‌های تلاطمی.

## Numerical and Experimental Study of Turbulent Flow Field Between Two Ripples in Open Channels

S. H. Nabavi Water Engineering Department, Shiraz University  
 A. R. Keshavarzi Water Engineering Department, Shiraz University  
 M. J. Kazemzadeh-Parsi Mechanical Engineering Dept., Islamic Azad University, Shiraz Branch  
 B. Sistani Water Engineering Department, Shiraz University

### Abstract

In this paper, the turbulent flow structure between two ripples is investigated numerically and experimentally. In this study, a 3D ultrasonic Micro-ADV is used to measure the flow field velocity components in 128 separate points over a structured grid around the ripples. The velocity components are then used to draw the streamlines and determination of separation region. In addition the flow field is also modeled numerically by the finite volume method and using four turbulent models: Standard  $k-\epsilon$ , RNG  $k-\epsilon$ , Standard  $k-\omega$  and SST  $k-\omega$ . The results show that the turbulent models Standard  $k-\epsilon$  and RNG  $k-\epsilon$  are more compatible with experimental results.

**Key words:** Ripple, Turbulent flow, Velocity field measurement, Turbulent models.

## ۱- مقدمه

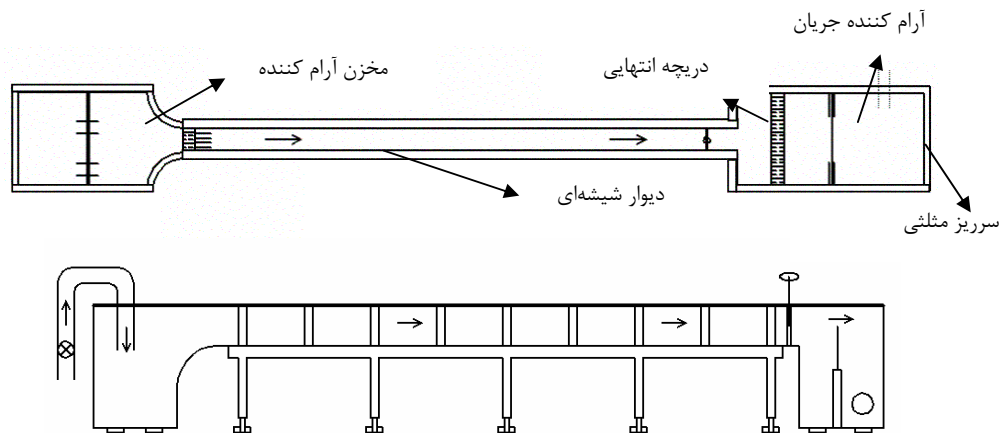
خصوصیات جریان متلاطم در جریان غیر یکنواخت را توسط دستگاه سرعت سنج سه بعدی ADV مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق دیده شد که ساختار جریان تأثیر قابل توجهی بر روی پروفیل تلاطم و تنش رینولدز دارد.

همانطور که گفته شد در اکثر تحقیقات انجام شده بر روی جریان‌های دارای شکل بستر ناهموار، خصوصیات کلی جریان در نظر گرفته شده و تاکنون کمتر به بررسی ساختار چنین جریان‌هایی از دیدگاه تشکیل جریان‌های گردابی و نواحی جدا شده پرداخته شده است. بنابراین با توجه به ناکافی بودن تحقیقات انجام شده در این زمینه و اهمیت شناسایی ساختار جریان با بستر ناهموار در بررسی پدیده‌های انتقال رسوب، در این مقاله به بررسی مشخصات و شناسایی ساختار چنین جریان‌هایی پرداخته شده و ساختار جریان سیال متلاطم بر روی دو ریپل به طور آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. در این آزمایشات بستر ناهموار توسط انباشت رسوبات در کف فلوم آزمایشگاهی ساخته شده و مقادیر سرعت نقطه‌ای توسط دستگاه سرعت سنج اولتراسونیک سه بعدی Micro ADV اندازه‌گیری شد. علاوه بر آن میدان جریان به طور عددی نیز مدل‌سازی شد و مسئله توسط چهار مدل تلاطمی  $\text{Standard } k - \epsilon$ ،  $\text{RNG } k - \epsilon$ ،  $\text{Standard } k - \omega$  و  $\text{SSTk} - \omega$  مورد بررسی قرار گرفت. سپس مقادیر سرعت در جهت جریان و خطوط جریان برای مدل‌های عددی و آزمایشگاهی با یکدیگر کاملاً مقایسه و مورد بررسی قرار گرفت.

## ۲- مدل آزمایشگاهی

در این تحقیق کلیه آزمایشات، در آزمایشگاه هیدرولیک رسوب بخش مهندسی آب دانشگاه شیراز انجام گردید. آزمایشات در یک فلوم شیشه‌ای با شیب طولی قابل تغییر به طول ۱۵ متر، عرض ۰/۷ متر و عمق ۰/۶ متر انجام گردید. جریان آب درون فلوم، از یک استخر توسط یک پمپ با حداکثر آب‌دهی ۵۰ لیتر در ثانیه تأمین می‌گردد و پس از عبور از فلوم مجدداً به استخر باز می‌گردد. نرخ جریان عبوری از فلوم توسط یک سرریز مثلثی شکل با زاویه راس ۹۰ درجه که قبلاً کالیبره شده بود اندازه‌گیری گردید. در انتهای فلوم یک دریچه کشویی جهت کنترل عمق جریان نصب گردید. در شکل (۱) شماتیکی از این فلوم آزمایشگاهی رسم شده است.

در اغلب جریان‌های دو فازی با نرخ انتقال رسوب بالا، شکل کف بستر هموار نبوده بلکه معمولاً با پستی و بلندی‌هایی مثل ریپل‌ها، تل‌ماسه‌ها و یا پادتل‌ماسه‌ها همراه است. در چنین شرایطی خصوصیات جریان مانند مقاومت جریان، میانگین سرعت، و نرخ انتقال رسوب نسبت به جریان بر روی بسترهای هموار کاملاً متفاوت می‌باشد. عموماً در تحقیقاتی که در زمینه جریان بر روی بستر ناهموار انجام شده خصوصیات کلی جریان مانند ضریب اصطکاک و یا نرخ انتقال رسوب مدنظر قرار گرفته است. به عنوان مثال در تحقیقات لوورا و کندی در سال ۱۹۶۹ و مک لین در سال ۱۹۹۲ و تحقیقات رادکیوی در سال ۱۹۹۰، تنها مشخصات کلی جریان بر روی بسترهای ناهموار، مورد بررسی قرار گرفته است. چنین رویکردی به مسئله، دربرگیرنده فرضیات بسیاری برای ساده‌سازی مسئله است و استفاده از چنین فرضیاتی باعث نادیده گرفتن بسیاری از پدیده‌هایی است که در چنین محیط جریانی ممکن است به وقوع بپیوندند. از بین پژوهش‌هایی که برای شناسایی ساختار جریان در کانال‌ها با بستر ناهموار انجام شده می‌توان به پژوهش‌های ایکدا و آسیدا در سال ۱۹۸۳ اشاره نمود. در این تحقیق مشاهده گردید که جریان درون یک کانال با بستر ناهموار شامل ریپل، دارای نواحی جدادگی و جریان‌های گردابی نعلی شکل در قسمت پایین دست ریپل‌ها می‌باشد و حداکثر انتشار تلاطم نیز در این نقاط اتفاق می‌افتد. کاردوسو و همکاران نیز در سال ۱۹۹۱، ساختار جریان با شتاب تدریجی در یک کانال مستقیم را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق از دستگاه اندازه‌گیری Hot Wire برای اندازه‌گیری سرعت نقطه‌ای سیال استفاده شد. مطالعات دیگری که توسط سجادی و همکاران در سال ۱۹۹۶ بر روی ساختار جریان بر روی بسترهای باشکل ریپل انجام شد نشان داد که جریان‌های گردابی تشکیل شده در پشت ریپل‌ها تأثیر بسیاری بر روی حرکت رسوب در چنین مسائلی خواهد داشت. از جمله تحقیقاتی که برای شبیه‌سازی عددی جریان حامل رسوب بر روی ریپل‌ها انجام شده است می‌توان به زدler و استریت در سال ۲۰۰۱ اشاره کرد. در این تحقیق از روش Large-Eddy Simulation برای شبیه‌سازی میدان جریان استفاده و نشان داده شده است که گردابه‌های تشکیل شده نزدیک بستر مانند گردابه‌های گوردتلر عامل تعیین کننده در حرکت رسوبات می‌باشند. سونگ و چو در سال ۲۰۰۱



شکل ۱- طرح شماتیکی از نمای بالا و جانبی فلوم آزمایشگاهی

محاسباتی با تمرکز مناسب برای هر کدام از آزمایشات، از تعدادی شبکه با درشتی متفاوت استفاده شده است. برای این منظور ۸ شبکه ساخته شد.

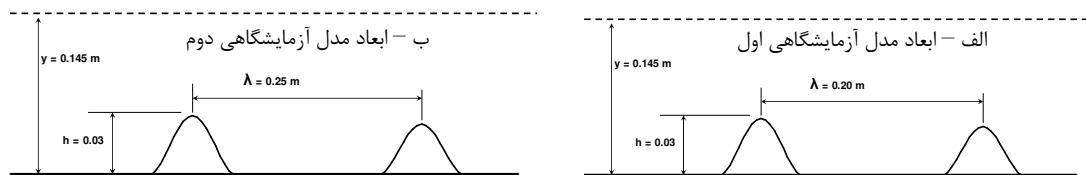
#### ۴- نتایج

پس از انجام آزمایشات و اجرای مدل‌های عددی، به منظور مقایسه مدل‌های مختلف و بررسی توانایی آنها در شبیه‌سازی چنین جریان‌هایی، نمودار سرعت‌های اندازه‌گیری شده و محاسبه شده رسم گردید. علاوه بر مقایسه سرعت‌ها، خطوط جریان برای داده‌های آزمایشگاهی و مدل‌های عددی در دو آزمایش در شکل‌های (۴) و (۵) رسم شده‌اند. همان‌طور که از این شکل‌ها پیداست برای داده‌های آزمایشگاهی (شکل ۴- الف) دو جریان گردابی در طول مقطع آزمایش دیده می‌شود. جریان گردابی اول که در بین دو ریپل شکل گرفته است از قسمت پایین دست ریپل اول شروع و تا قبل از رسیدن به ابتدای بالا دست ریپل دوم ادامه دارد. ارتفاع این جداسازی از ارتفاع ریپل متجاوز نمی‌باشد.

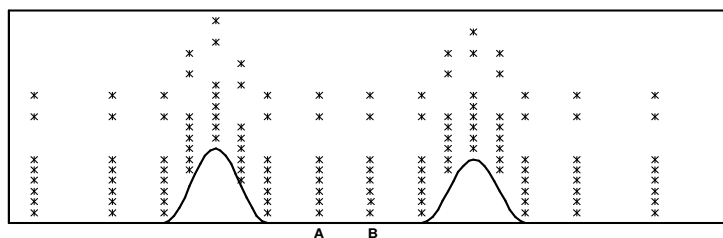
در این تحقیق از دو طول موج ۲۰ و ۲۵ سانتیمتر و ارتفاعی برابر ۳ سانتیمتر برای مدل‌سازی ریپل‌ها استفاده شد. ابعاد ریپل‌ها در شکل (۲) نشان داده شده است. دانه‌بندی رسوبات مورد استفاده در این آزمایش طوری انتخاب شد که قطر میانگین رسوبات برابر  $d_{50} = 0.6mm$  و مقدار ضریب دانه‌بندی برابر  $C_D = 1.58$  و مقدار ضریب انحناء نیز برابر  $C_u = 1.003$  باشد. پس از ساخت ریپل‌ها برای تنظیم عمق جریان و قرار دادن رسوبات در آستانه حرکت، از دریچه پایین دست فلوم استفاده گردید. سرعت سیال در ۱۲۸ نقطه در نقاط مختلف توسط دستگاه سرعت سنج سه بعدی micro-ADV اندازه‌گیری شد. مکان نقاط اندازه‌گیری سرعت در شکل (۳) نشان داده شده است.

#### ۳- حل عددی

برای حل عددی این مسئله از نرم‌افزار Fluent استفاده شده است. مدل‌سازی عددی به صورت دو بعدی انجام گردید. برای محاسبه میدان جریان متلاطم از چهار مدل تلاطمی  $SST k - \omega$ ،  $Standard k - \omega$ ،  $RNG k - \epsilon$ ،  $Standard k - \epsilon$  استفاده شد. برای تحلیل شبکه و دستیابی به یک شبکه



شکل ۲- ابعاد ریپل‌ها در مدل‌های آزمایشگاهی اول و دوم



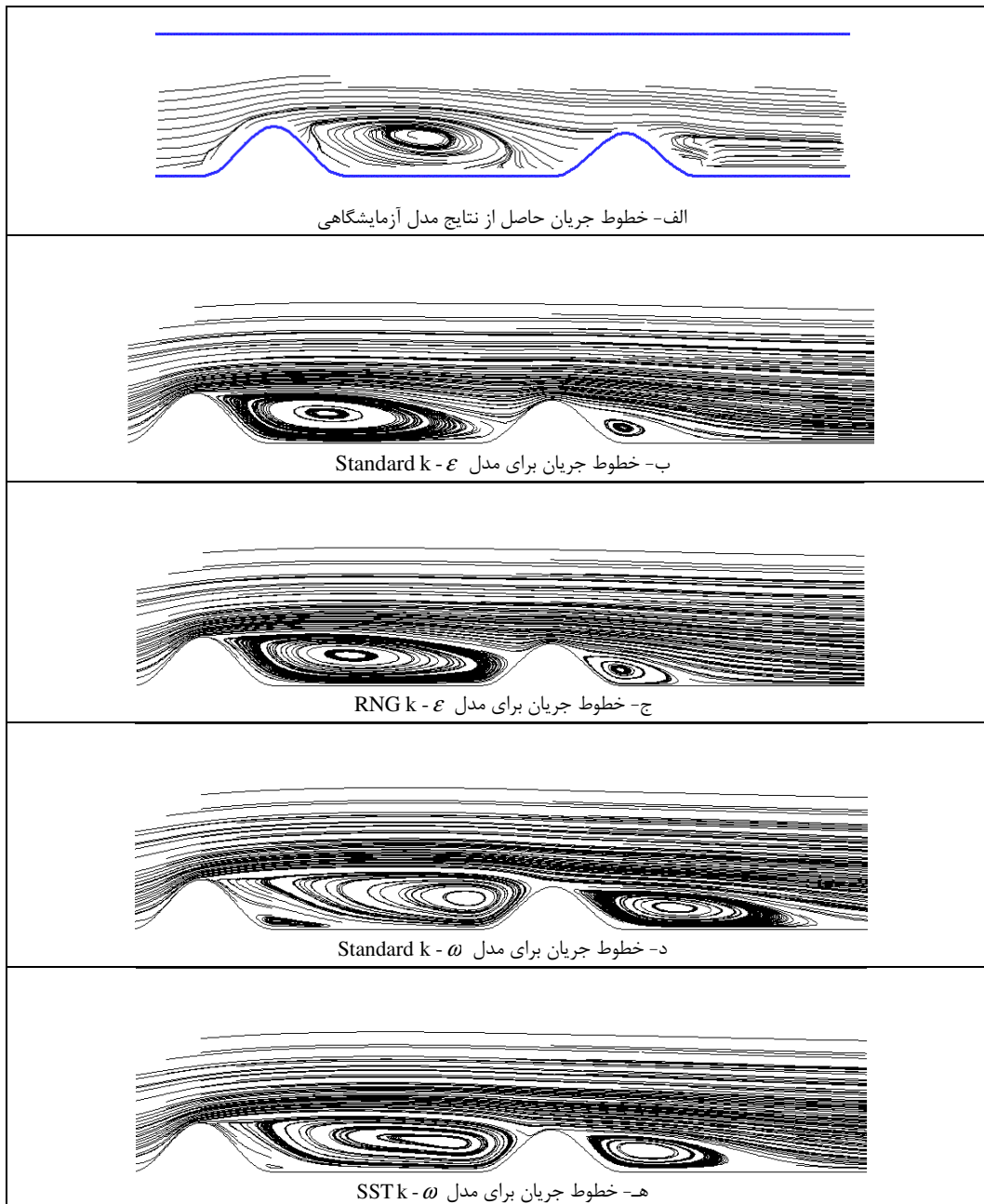
شکل ۳- نمای شماتیکی از ریپل‌ها و نقاط اندازه‌گیری سرعت

(۵-ج) خطوط جریان رسم شده بر اساس نتایج حاصل از مدل  $\text{Standard } k-\varepsilon$  و  $\text{RNG } k-\varepsilon$  رسم شده است همانطور که دیده می‌شود در این نمودارها شکل ناحیه جداشدگی به شکل واقعی بسیار نزدیک می‌باشد برخلاف آن در مدل‌های  $\text{Standard } k-\omega$  و  $\text{SST } k-\omega$  که خطوط جریان آن در شکل‌های (۵-د) و (۵-ه) رسم شده است دیده می‌شود که گردابه به وجود آمده در انتهای پایین دست ریپل دوم بسیار بزرگ‌تر از اندازه واقعی می‌باشد و علاوه بر این یک گردابه نسبتاً بزرگ نیز در زیر گردابه تشکیل شده در پایین دست ریپل اول بوجود آمده است که چنین الگویی با الگوی واقعی ناحیه جداشدگی کاملاً متفاوت می‌باشد.

#### ۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق مشاهده گردید که مدل‌های تلاطمی می‌توانند ساختارهای بسیار متفاوتی از جریان را ارائه کنند. به عبارت دیگر ساختار جریان گردابی و شکل ناحیه جداشدگی در مدل‌های تلاطمی  $\text{Standard } k-\varepsilon$  و  $\text{RNG } k-\varepsilon$  با ساختار جداشدگی در مدل‌های  $\text{Standard } k-\omega$  و  $\text{SST } k-\omega$  بسیار متفاوت می‌باشد. مشاهده شد که شکل جداشدگی جریان در دو مدل اول بسیار به شکل واقعی (آزمایشگاهی) ناحیه جداشدگی شبیه می‌باشد در صورتی که شکل ناحیه جداشدگی در دو مدل دیگر شباهت زیادی به شکل واقعی جداشدگی ندارد بویژه در آزمایش دوم این تفاوت بسیار چشمگیر است. با مقایسه نمودارهای سرعت و خطوط جریان دیده شد که مدل‌های تلاطمی  $\text{Standard } k-\varepsilon$  و  $\text{RNG } k-\varepsilon$  در مقایسه با دو مدل دیگر، از توانایی بیشتری برای شبیه‌سازی میدان جریان عبوری از روی سطوح ناهموار برخوردار می‌باشد.

جریان گردابی دوم در انتهای قسمت پایین دست ریپل دوم قرار دارد که درای طول و ارتفاع کوچک‌تری است. از نمودار خطوط جریان رسم شده برای مدل  $\text{Standard } k-\varepsilon$  که در شکل (۴-ب) نشان داده شده است دیده می‌شود که گردابه اول از قسمت پایین دست ریپل اول شروع و تا قبل از رسیدن به ابتدای بالادست ریپل دوم امتداد می‌یابد. ارتفاع آن هم از ارتفاع ریپل بیشتر نیست و گردابه دوم هم تقریباً همانند گردابه دوم تشکیل شده در مدل آزمایشگاهی می‌باشد. در مدل  $\text{RNG } k-\varepsilon$  که خطوط جریان آن در شکل (۴-ج) رسم شده است دیده می‌شود که گردابه اول تمام طول بین دو ریپل را اشغال کرده و گردابه دوم هم از ابعاد بزرگ‌تری نسبت به مدل  $\text{Standard } k-\varepsilon$  و آزمایشگاهی برخوردار می‌باشد. در مدل  $\text{Standard } k-\omega$  (شکل ۴-د) علاوه بر این که گردابه فضای بین دو ریپل را به طور کامل اشغال کرده است مرکز گردابه‌ها به سمت ریپل دوم کشیده شده است و یک گردابه کوچک نیز در زیر گردابه اول و در قسمت پایین دست ریپل اول دیده می‌شود و گردابه دوم هم به طور کامل به وجود آمده و دارای ابعاد قابل ملاحظه‌ای می‌باشد. در مدل  $\text{SST } k-\omega$  (شکل ۴-ه) گردابه‌ها همانند مدل  $\text{Standard } k-\omega$  می‌باشد با این تفاوت که گردابه دوم کوچکتر و گردابه‌ها یک حالت کشیدگی نسبت به مدل قبلی را دارا می‌باشند. در آزمایش دوم خطوط جریان نیز برای این آزمایش در همه حالات آزمایشگاهی و عددی در شکل (۵) رسم شده است. همانطور که از شکل (۵-الف) دیده می‌شود در خطوط جریان رسم شده بر اساس داده‌های آزمایشگاهی یک گردابه در بین دو ریپل تشکیل شده که به سمت ریپل دوم تمایل دارد ارتفاع آن از ارتفاع ریپل بیشتر نیست و قبل از رسیدن به ریپل اول به اتمام رسیده است. گردابه بسیار کوچکی هم در انتهای پایین دست ریپل دوم به وجود آمده است. در شکل‌های (۵-ب) و



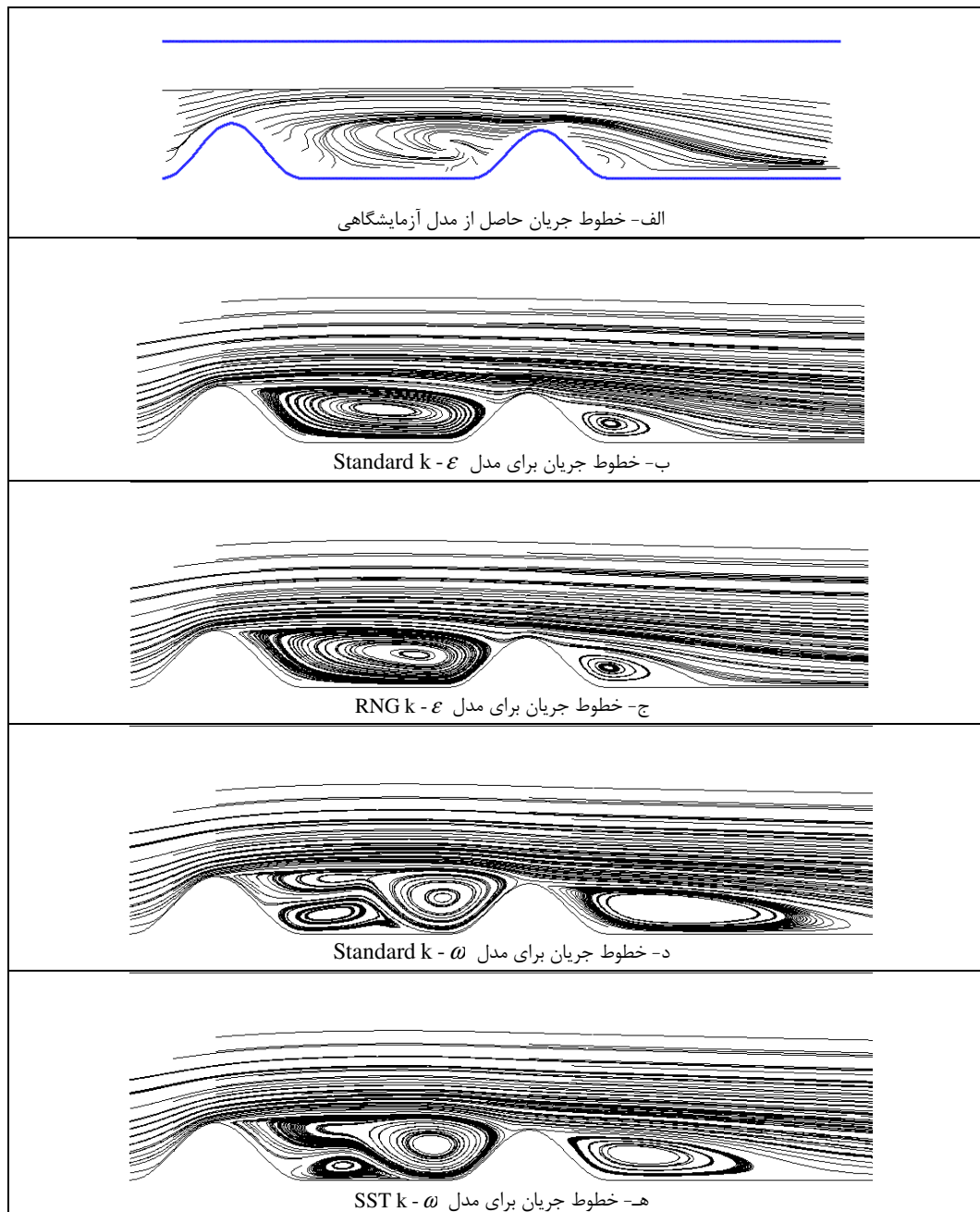
شکل ۴- نمودار خطوط جریان برای مدل‌های آزمایشگاهی و عددی برای آزمایش اول

- [3] Lovera, F. and Kennedy, J. F., (1969). Friction factor for flat-bed flows in sand channels. J. Hydr. Div., ASCE, 95, (4): 1227-1234.
- [4] Mclean, S. R., (1992). On the calculation of suspended load for non-cohesive sediments. J. Geophys. Res., 97, (c4): 5759-5770.
- [5] Raudkivi, A.J., (1990). Loose boundary hydraulics, 3<sup>rd</sup> Edition, Pergamon Press.

مراجع

- [1] Cardoso, A. H., Graf, W. H. and Gust, G., (1991). Steady gradually accelerating flow in a smooth open channel. J. Hydr. Res., Delft, The Netherlands, 29, (4): 525-543.
- [2] Ikeda, S. and Asaeda, T., (1983). Sediment suspension with rippled bed. J. Hydr. Eng. ASCE, 109, (3): 409-423.

- using Acoustic Doppler Velocimeter (ADV), J. Eng. Mech., 127, (3): 219-232.
- [8] Zedler, E. A. and Street, R. L., (2001). Large-eddy simulation of sediment transport: current over ripples, J. Hyd. Eng., 127, (6): 444-452.
- [6] Sajjadi, S. G., Aldridge, J. N. and Nicholas, D. J., (1996). Sediment transport mechanism over rippled sand beds. Estuarine and coastal modeling, M. L. Spaulding and R. T. Cheng, eds., ASCE, New York, 669-680.
- [7] Song, T. and Chiew, Y.M., (2001). Turbulence measurement in nonuniform open-channel flow



شکل ۵ - نمودار خطوط جریان برای مدل‌های آزمایشگاهی و عددی برای آزمایش دوم