

بررسی عددی و آزمایشگاهی جریان تدریج‌آمیختگی بر روی یک بستر شبیه سازی گوهای شکل در کanal روباز

دانشجوی کارشناسی، دانشکده مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

دانشجوی کارشناسی، دانشکده مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

استادیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

آمنه سعیدی

الهام قوشچی

*روح اله رفعی

چکیده

در این مقاله بررسی الگوی جریان سطح آزاد تدریج‌آمیختگی بر روی مانع شبیدار گوه ای شکل در کanal مستطیلی با مقایسه نتایج شبیه سازی و آزمایشگاهی انجام شده است. از روش حجم سیال (VOF) جهت مدلسازی سطح آزاد در جریان دوفازی مورد نظر استفاده شده است. نتایج مدل‌های آشفتگی $k - \epsilon$, RNG $k - \epsilon$, SST $k - \omega$, Realizable $k - \epsilon$ و $k - \omega$ برای تعیین وضعیت سطح آزاد، با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردیده است. با مقایسه نتایج پروفیل سطح آب به دست آمده از شبیه سازی و نتایج آزمایشگاهی، این نتیجه حاصل شد که پروفیل سطح آب حاصل در آزمایشها به مدل $k - \epsilon$ استاندارد نزدیک تر است. نتایج نشان می‌دهد که وضعیت سطح آزاد پیش‌بینی شده در ناحیه ای که جریان تدریج‌آمیختگی نمی‌تواند به نتایج آزمایشگاهی بسیار نزدیک است. با این حال در ناحیه ای که جریان سریعاً متغیر است و پرش هیدرولیکی اتفاق می‌افتد، مدل‌های آشفتگی نمی‌توانند پیش‌بینی خوبی از جریان ارائه دهند. همچنین کارکرد $k - \epsilon$ -استاندارد در تعیین وضعیت سطح آزاد آب در دیهای مختلف بررسی شده است.

واژه‌های کلیدی: جریان سطح آزاد، جریان سریعاً متغیر، شبیه سازی عددی، روش حجم سیالی (VOF).

Numerical and Experimental Study of the Gradually and Rapidly Varied Flow over a Wedge-shaped Bed in Open Channel

A. Saeedi

Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

E. Ghoushchi

Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

R. Rafee

Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

Abstract

In this paper, free surface flows over a wedge with gradually and rapidly varied depths in a rectangular open channel are studied by comparing the simulation results and experimental data. The volume of fluid (VOF) method is used to model the two phase flow. The results of the standard $k - \epsilon$, RNG $k - \epsilon$, Realizable $k - \epsilon$, $k - \omega$, and SST $k - \omega$ models were compared experimental results. The results show that the standard $k - \epsilon$ model gives better results in comparison with experimental data. The results of the simulations are very close to the experimental data at the gradually varied portion of the flow. However, at rapidly varied section of the flow, the turbulence models fail to predict good results. Performance of this model in different volumetric flow rate is also investigated in detail.

Keywords: Free Surface Flow, Rapidly Varied Flow, simulation, Volume of Fluid (VOF).

لیکن جریان با فرض پروفیل سرعت ثابت، در هر مقطع و استفاده از فرمول شزی مانینگ برای محاسبه افت اصطکاکی مدل شده است که دارای خطای است. روش دیگر بررسی، حل عددی معادلات می‌باشد که با حل معادلات میانگین گیری شده ناویر استوکس، پرش هیدرولیکی، جریان دائمی و غیردائمی در کanalهایی با مقاطع مختلف مورد مطالعه قرار می‌دهد. زانگ و لیونگ^[۴] سطح آزاد کanal روباز منحنی شکل را به صورت عددی مورد مطالعه قرار داده اند. آنها از مدل آشفتگی $k - \epsilon$ و الگوریتم حل SIMPLE^۱ استفاده کرده اند و این نتیجه را گرفته اند که این الگوریتم برای تعیین سطح آزاد سیال مفید می‌باشد. تاناکا و تومیدوکرو^[۵] با حل سه بعدی و روش توربولنسی $k - \epsilon$ کanal روباز را شبیه سازی نموده اند. ناگایو، لیو و تومیناگا^[۶] نیز کanal روباز دارای نوار زبری را مدلسازی نموده اند و به این

۱- مقدمه

پرش هیدرولیکی از نوع جریان سریعاً متغیر است که با تغییر حالت جریان از فوق بحرانی به زیر بحرانی در جریان‌های با سطح آزاد تشکیل می‌شود. عمق جریان در فاصله کوتاهی به میزان زیادی تغییر می‌کند. این پدیده همراه با اختلاط هوا در جریان آب می‌باشد. در این پدیده مقدار قابل توجهی از انرژی جریان در محدوده پرش تلف می‌شود. مدل سازی این پدیده مورد توجه محققان زیادی بوده است. از طرفی جریان‌هایی با عمق تدریج‌آمیختگی، بخش عمدۀ ای از جریان در کanal های روباز را تشکیل می‌دهد به همین دلیل در این مقاله سعی شده است جریان‌های ترکیبی تدریج‌آمیختگی و سریعاً متغیر بررسی شوند.

وطن خواه^[۳-۱] با حل تحلیلی و با استفاده از فرمول شزی و مانینگ عمق آب در طول کanal را در مقاطع مختلف محاسبه نموده است.

^۱ Semi-Implicit Method for Pressure Linked

در این مقاله جریان کanal روباز مستطیلی با وجود مانع دو بعدی گوه ای شکل به صورت دو بعدی در جریان تدریجاً متغیر و سریعاً متغیر مدل سازی شده است و سطح آزاد و عمق جریان در طول های مختلف کanal محاسبه و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردیده است. مزیت این مدل سازی ایجاد شرایط مشابه رودها و رودخانه ها در طبیعت می باشد و بررسی عمق و پروفیل سطح آب در رودها می تواند بشر را برای آمادگی در مقابل حوادث طبیعی مانند سیل یاری دهد.

برای بررسی و پیش‌بینی مسیر حرکت سیال درون رودها و جوی ها، مدل سازی آزمایشگاهی و عددی پیشنهاد می شود. از آنجا که انجام آزمایش دشوار و هزینه بر می باشد، استفاده از روش های عددی حجم محدود کاربردی تر است. این مدل سازی بر اساس معادلات دینامیک سیالات محاسباتی مانند بقاعی جرم و بقاعی مومنتوم می باشد. برای این منظور از روش حجم سیالی (VOF) برای حل معادلات حاکم و تعیین مراتزهای مایع و هوا استفاده شده است. همچنین برای اعتبارسنجی نتایج و بررسی کارکرد مدلها، ابتدا نتایج آزمایشگاهی در پنج دی مختلف به دست آمده است و سپس مدل‌های آشفتگی مختلف برای شبیه سازی جریان در نرم افزار مورد استفاده قرار گرفته است.

۲- مشخصات مقاله

۲-۱- مشخصات مدل عددی

پرش هیدرولیکی در این آزمایش به وسیله مانع دو بعدی گوه ای شکل ایجاد شده است اما پیش از قرار گرفتن هر نوع مانع، پله یا دیواره، جریانی که در کanal برقرار است از نوع جریان تدریجاً متغیر است.

بعاد کanal مستطیلی مورد بررسی ۰/۲۵ × ۰/۷۵ × ۰/۱۶۷ می باشد که یک مانع مثلثی با طول ۰/۲۸۵ متر و ارتفاع ۰/۰۵ متر در فاصله ۰/۳ متر از ابتدای کanal قرار داده شده است که ارتفاع ورودی آب در ورودی کanal در هر دی می به عنوان متغیر در نظر گرفته شد.

شبکه بندی میدان حل کanal در نرم افزار Gambit Software، شرایط مرزی توزیع فشار به صورت هیدرواستاتیکی در ورودی و خروجی در نظر گرفته شد و برای کف کanal نیز شرط مرزی دیواره قرار داده شد.

نتیجه رسیده اند که بیشینه مقدار انرژی جنبشی توربولانسی در گوشه بالادست نوار زبری رخ می دهد.

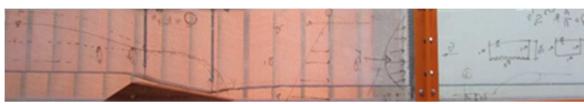
هاگر و نوسچک [۷] در مطالعه خود به تحلیل پرش هیدرولیکی در کanal مثلثی پرداختند و مشخصات طول پرش، توزیع سرعت و پروفیل سطح را مشخص کردند و در نهایت نتایج به دست آمده را با نتایج حاصل از کanal مستطیلی مقایسه کردند. رحمان و چادری [۸] پرش هیدرولیکی را با شبکه ایمن‌طباق پذیر شبیه سازی کردند. از آنجا که توزیع شبکه مناسب می تواند نقش بسیار مهمی در پیش‌بینی و حل بازی کند، در مطالعه ایشان دو طرح مختلف عددی همراه با معادلات بوزینسک برای شبیه سازی جریان در اعداد فروض مختلف به کار گرفته شد. در نهایت این نتیجه به دست آمد که دقت و صحت طرح بالاتر از مرتبه دوم اثر کمی بر روی راه حل زمانی که تحت شرایط مرزی و اولیه یکسان حل شده است، دارد. علاوه بر این، اهمیت شرط بوزینسک در معادله حاکم است مورد بحث قرار گرفته و اثرات آن بر پیش‌بینی جریان بررسی شده است. لیو و همکارش [۹] با استفاده از روش ریاضی و عددی پرش هیدرولیکی را به صورت دو بعدی در یک کanal مستطیلی پیش‌بینی کردند. آنها این نتیجه را گرفتند که این روش حل که با استفاده از تکنیک مک‌کورمک است روشی مناسبی برای پیش‌بینی مشخصات پرش هیدرولیکی است. زیر و همکارانش [۱۰] به اندازه گیری تجربی بر روی ویژگی های آشفتگی در منطقه انتقالی از پایان یک پرش هیدرولیکی برای باز کردن جریان در یک کanal مستطیلی پرداختند. سرعت متوسط، شدت آشفتگی، تنش رینولدز و انرژی جنبشی متلاطم برای دو عدد فروض فوق اندازه گیری شد. در نهایت این نتیجه حاصل شد که عدد فروض فوق بحرانی به عنوان یک مقیاس موثر برای به دست آوردن ویژگی های آشفتگی است. بایون و همکارانش [۱۱] به تجزیه و تحلیل مقایسه ای عملکرد روش عددی در دو نرم افزار افزار Flow و Open Foam 3D با تمرکز بر جریان آشفته سه بعدی همراه با پرش هیدرولیکی ثابت با عدد رینولدز پایین پرداختند. آنان با استفاده از روش حجم سیال و مدل های آشفتگی RANS و RNG به شبیه سازی پرداختند و نتیجه گرفتند که هر دو مدل می توانند پرش هیدرولیکی و اتلاف انرژی را در اعداد رینولدز پایین به خوبی شبیه سازی کنند. کاتب و همکارانش [۱۲] پرش هیدرولیکی را به صورت نظری و تجربی در یک کanal ذوزنقه ای شبی دار مورد بررسی قرار دادند. این آزمایش با هدف تعیین تأثیر شبی کanal بر نسبت عمق مزدوج پرش هیدرولیکی در پنج شبی مثبت انجام شد. آصفی و ضیائی [۱۳] مدل آشفتگی k-ε استاندارد را در دو تابع مختلف تابع دیواره استاندارد و نبود تابع دیواره استاندار با نتایج آزمایشگاهی برای یک سطح شبیدار معکوس همراه با پله مقایسه نمودند و به این نتیجه رسیدند که پروفیل پیش‌بینی شده سطح پرش با استفاده از تابع دیواره استاندارد به نتایج آزمایشگاهی نزدیک تر است. شکری و همکاران [۱۴] مدل‌های آشفتگی دو معادله ای k-ε استاندارد، RNG k-ε، Realizable k-ε را برای پرش هیدرولیکی شبیه سازی عددی گرفتند که k-ε با نتایج آزمایشگاهی مقایسه نمودند و این نتیجه را گرفتند که RNG با نتایج آزمایشگاهی مطابق بود. فرموند و همکارانش [۱۵] پرش هیدرولیکی در کanalی با بستر مواج با دو مدل k-ε استاندارد، RNG k-ε شبیه سازی کردند و با نتایج

شود سپس صفر قسمت متوجه خط کش با صفر قسمت ثابت آن رو به روی هم قرار می‌گیرد و پیچ کنار میله محکم می‌گردد، بعد از جاری آب درون کانال نوک قسمت متوجه خط کش بر روی سطح آب مماس گردیده و عدد نشان داده شده بر حسب به میلی متر قرائت می‌گردد. آخرین کار عکس گرفتن از پروفیلهای سطح آب بر روی سطح شبیدار می‌باشد سپس داده های ورودی لازم برای حل عددی استخراج می‌شود. با پردازش تصویر و تعیین موقعیت عمق آب مکانهای مختلف، نتایج با آنچه که از شبیه سازی عددی حاصل می‌شود مقایسه گردید. داده های اولیه که از آزمایش به دست آمده است در جدول ۱ ارائه گردیده است.

جدول ۱- داده های ورودی به نرم افزار

سرعت ورودی (m/s)	قطر هیدرولیکی خروجی	ارتفاع آب خروجی (m)	قطر هیدرولیکی ورودی (m)	ارتفاع آب ورودی (m)	مرحله
۰/۱۰	۰/۰۷۵۴	۰/۰۳۸	۰/۱۰۰۸	۰/۰۷۷	۱
۰/۱۶	۰/۰۸۷۱	۰/۰۵۲	۰/۱۰۴۸	۰/۰۸۷	۲
۰/۲۲	۰/۰۹۳	۰/۰۶۲	۰/۱۰۸۷	۰/۰۹۷	۳
۰/۲۶	۰/۰۹۸	۰/۰۷۲	۰/۱۱۱۰	۰/۱۰۷	۴
۰/۳۰	۰/۱۰۲۵	۰/۰۸۱	۰/۱۱۳۰	۰/۱۱۷	۵

پروفیل سطح آب حاصل از آزمایشها و کانتورهای چگالی جریان با نرم افزار Fluent و مدل k-e استاندارد در پنج دبی مختلف به دست آمده است که در ادامه قابل مشاهده است. همانطور که دیده می‌شود به کانتور قرمز رنگ مربوط به چگالی ۱۰۰۰ است که نشان دهنده وجود آب در ناحیه موردنظر می‌باشد. محل تغییر چگالی از چگالی آب به هوا به عنوان فصل مشترک شناخته شده و داده های آن پس از پردازش تصویر با داده های عددی مقایسه گردیده است. برای استخراج داده ها از تصویر از نرم افزار Get Data استفاده شده است.



شکل ۳-الف) وضعیت سطح آزاد آب در آزمایش برای دبی $0.00058\text{ m}^3/\text{s}$

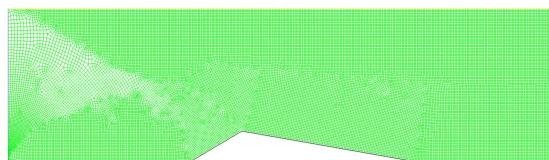


شکل ۳-ب) وضعیت سطح آزاد آب در شبیه سازی برای دبی $0.00058\text{ m}^3/\text{s}$



شکل ۴-الف) وضعیت سطح آزاد آب در آزمایش برای دبی $0.0010\text{ m}^3/\text{s}$

سه شبکه بندی مختلف با تعداد ۳۳۶×۵۰، ۵۰۴×۷۵ و ۱۰۰×۶۷۲ تولید شده است و در نتایج به دست آمده، کسر حجمی در آنها با هم مقایسه شده است که در بخش های بعدی به آنها اشاره خواهد گردید.



شکل ۱- نمونه ای از شبکه بندی کanal

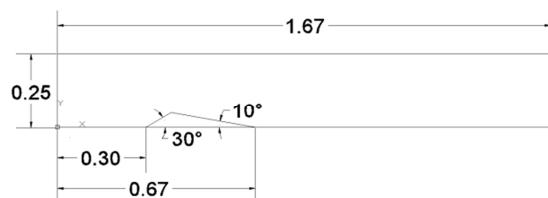
در این مقاله جریان به صورت گذرا^۱ و با بازه های زمانی 0.005 s حل شده است. دو فاز آب و هوا در نظر گرفته شده است.

۲-۲-مشخصات مدل آزمایشگاهی

در این پژوهه از کanal مستطیلی به ابعاد $0.75\text{ m} \times 0.25\text{ m}$ در آزمایشگاه مکانیک سیالات دانشگاه سمنان استفاده شده است. نمایی از این دستگاه در شکل ۲ آورده شده است:



(الف)



(ب)

شکل ۲-الف) نمایی از کanal روباز آزمایشگاهی ب) ابعاد کanal روباز

برای انجام آزمایش ابتدا باید دستگاه روشن شود. قبل از باز کردن شیر آب، یک قطعه با سطح شبیدار از جنس چوب برقراری جریان تدریجاً و سریعاً متغیر در کanal قرار داده شده است. همان طور که در شکل مشخص است دو نقطه بر روی سطح شبیدار انتخاب می‌شود. در این آزمایش یک نقطه در بالا و نقطه دیگر در نزدیکی پرش انتخاب شده است. یک مخزن جداگانه در دستگاه وجود دارد که از طریق آن می‌توان دبی را با اندازه گیری حجم و زمان به دست آورد. در هر مرحله با باز کردن شیر به مقدار بیشتر دبی جدیدی به وجود می‌آید. این کار برای پنج دبی مختلف انجام شده است. برای هر دبی ابتدا عمق قسمت بالا دست و پایین دست کanal اندازه گیری می‌شود. سپس عمق آب در دو نقطه ای که قبلاً مشخص شده بود با استفاده از خط کش هایی که در شکل می‌باشد، اندازه گیری می‌شود. طریقه اندازه گیری عمق توسط خط کش ها به این صورت است که ابتدا نوک این خط کش ها در دو نقطه مورد نظر بر روی گوه مماس می‌شوند. این دو نقطه معمولاً در میان دو نقطه ای که قبلاً مشخص شده بودند قرار می‌گیرند. این دو نقطه معمولاً در میان دو نقطه ای که قبلاً مشخص شده بودند قرار می‌گیرند.

^۱ Transient

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) \quad (3)$$

معادله انتقال ε استاندارد:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) \quad (4)$$

$$= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k \\ + G_b - \rho \varepsilon + S_k$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \varepsilon u_j) \quad (5)$$

$$= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \\ + C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \\ + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) + S_\varepsilon$$

ثوابت مدل ε استاندارد در جدول ۲ آمده است:

جدول ۲- ثوابت مدل ε استاندارد

نام ثابت	مقدار
$C_{1\varepsilon}$	1.44
$C_{2\varepsilon}$	1.92
σ_k	1
σ_ε	1.3
G_k	$-\rho \bar{u}_i \bar{u}_j \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$
μ_t	$\rho c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$
c_μ	0.09

در تعیین شرایط مرزی برای مدل توربولنسی از توابع دیواره استاندارد استفاده می شود، پارامتر مهم در این زمینه فاصله بی بعد از دیواره است که به صورت زیر تعریف می شود:

$$y^+ = \frac{\rho u_\tau y}{\mu} \quad (6)$$

محدوده y^+ باید بین ۳۰ تا ۳۰۰ باشد که در این مقاله رعایت شده است.

۳- بررسی نتایج

یک نمونه از کانتور کسر حجمی فاز هوا که بصورت عددی به دست آمده است در شکل ۸ نشان داده شده است:



شکل ۴-ب) وضعیت سطح آزاد آب در شبیه سازی برای دبی ۰/۰۰۱۰
(m³/s)



شکل ۵-الف) وضعیت سطح آزاد آب در آزمایش برای دبی ۰/۰۰۱۶
(m³/s)



شکل ۵-ب) وضعیت سطح آزاد آب در شبیه سازی برای دبی ۰/۰۰۱۶
(m³/s)



شکل ۶-الف) وضعیت سطح آزاد آب در آزمایش برای دبی ۰/۰۰۲۱
(m³/s)



شکل ۶-ب) وضعیت سطح آزاد آب در شبیه سازی برای دبی ۰/۰۰۲۱
(m³/s)



شکل ۷-الف) وضعیت سطح آزاد آب در آزمایش برای دبی ۰/۰۰۲۶
(m³/s)



شکل ۷-ب) وضعیت سطح آزاد آب در شبیه سازی برای دبی ۰/۰۰۲۶
(m³/s)

برای هر پنج دبی همانند دو شکل بالا نمونه تهیه شد و با استفاده از نرم افزار Get Data مختصات مکانی سطح آزاد استخراج شده و پروفیل های سطح آب با هم مقایسه شد.

۳-۲- معادلات حاکم بر جریان سیال

معادله کسر حجمی فاز q ام مختلف در مدل حجم سیال (VOF) به صورت زیر داده می شود:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \vec{\nabla} \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{V}_q) = 0 \quad (1)$$

در رابطه فوق فرض شده است که در فصل مشترک مایع و گاز تغییر رخ ندهد. α_q کسر حجمی فاز q است و ρ_q چگالی فاز q می باشد
. ($\rho = \rho_w \rho_a + \rho_a \rho_w$)

معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial u_k}{\partial x_k} = 0 \quad (2)$$

معادله ناویر- استوکس:

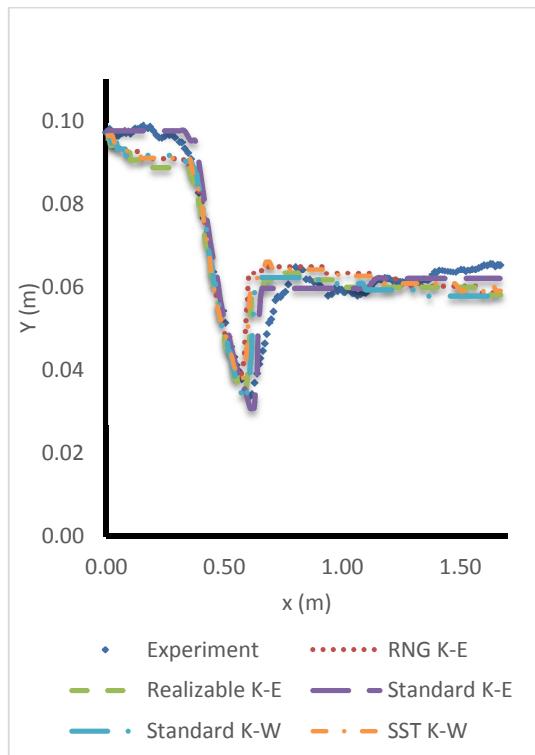
مقادیر با مشخصات مکانی ذکر شده، در شبیه سازی نرم افزاری به دست آورده شد که در جدول ۳ این مقادیر آورده شده است:

جدول ۳- نتایج آزمایشگاهی و شبیه سازی عددی γ_1 و γ_2

γ_2 حاصل از شبیه سازی (m)	γ_2 حاصل از آزمایش (m)	γ_1 حاصل از شبیه سازی (m)	γ_1 حاصل از آزمایش (m)	دبی ورودی (m^3/s)
۰.۰۲۴۶	۰.۰۲۵	۰.۰۵۷	۰.۰۶	۰.۰۰۰۵
۰.۰۲۷	۰.۰۳	۰.۰۷۰	۰.۰۷۲	۰.۰۰۱۰
۰.۰۳۲	۰.۰۳۵	۰.۰۷۹	۰.۰۸۲	۰.۰۰۱۶
۰.۰۳۹	۰.۰۴۲	۰.۰۸۷	۰.۰۹۰	۰.۰۰۲۱
۰.۰۴۵	۰.۰۴۷	۰.۰۹۶	۰.۰۹۸	۰.۰۰۲۶

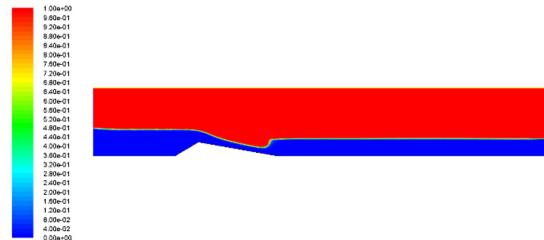
همان طور که مشاهده می شود مقادیر γ_1 و γ_2 در مدل آزمایشگاهی و شبیه سازی به هم نزدیک اند و ماتریسم خطای شبیه سازی جریان تدریجیاً متغیر $5/2$ درصد است.

با اعمال شرایط مرزی، جریان مورد نظر در شبیه سازی گردید. نتایج عمق آب بر حسب طول کanal حاصل از پنج مدل آشفته با هم مقایسه شد.



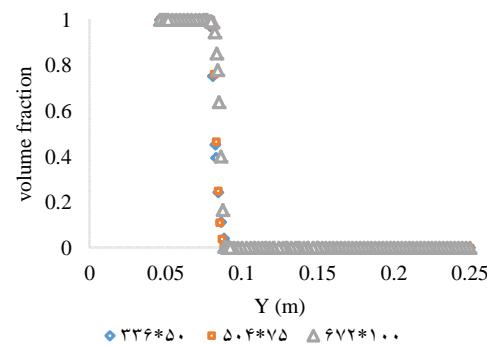
شکل ۱۱- برووفیل سطح آزاد پیش بینی شده برای دبی (m^3/s) 0.0016 با مدل های متفاوت

همانطور که دیده می شود در قسمت جریان تدریجیاً متغیر اختلاف بین نتایج شبیه سازی با مدل های توربولانسی مختلف و نتایج آزمایشگاهی بسیار کم است. لیکن در قسمتی که جریان دچار پرش

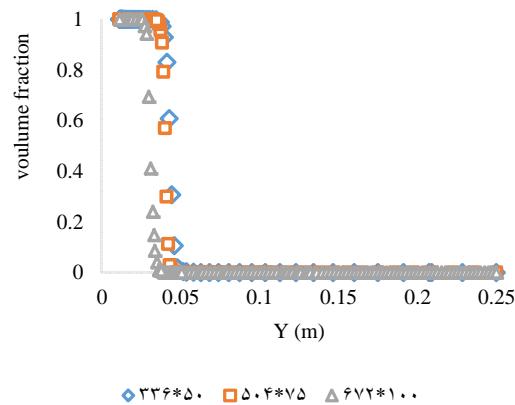


شکل ۸- نمونه ای از کانتور کسر حجمی فاز ها

برای نشان دادن استقلال جوابها از شبکه حل، دو نقطه بر روی سطح شبیدار گوه که قبل از روی دادن پرش هیدرولیکی قرار دارد و جریان از نوع تدریجاً متغیر می باشد، در نظر گرفته شده است. برای اطمینان از استقلال جوابها از شبکه حل، مقدار کسر حجمی آب بر حسب عمق آب (فاصله از دیواره جامد)، در دو ناحیه از سطح شبیدار در فاصله $0/405$ متری و $0/605$ متری از ابتدای کanal، در سه شبکه بندی با تعداد سلول مختلف 336×50 ، 504×75 و 672×100 در شکل های ۹ و ۱۰ مقایسه شده است:



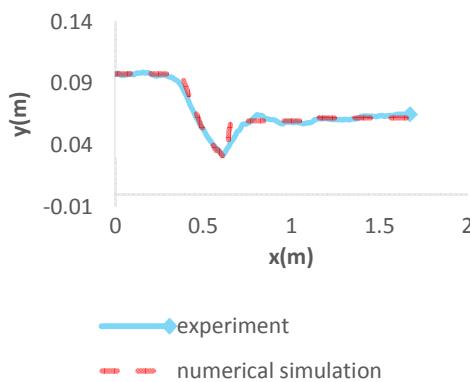
شکل ۹- تغییرات کسر حجمی با ارتفاع از کف کanal در $x=0/405$



شکل ۱۰- تغییرات کسر حجمی با ارتفاع از کف کanal در $x=0/605$

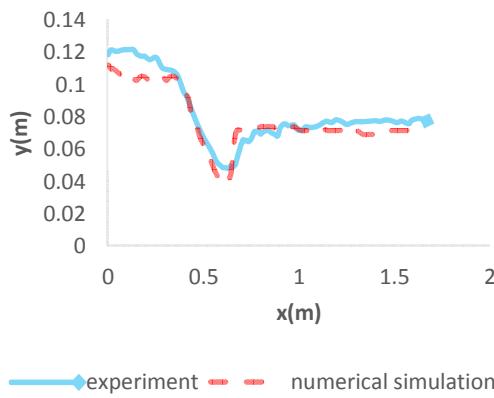
همانطور که دیده می شود، داده های شبکه هستند و لذا با شبکه ای با تعداد سلول 672×100 در راستای طولی و 100 در راستای عمق می توان جوابهای مستقل از شبکه دست یافت.

در بررسی های آزمایشگاهی مقادیر γ_1 (عمق آب در $x=0/405$) و γ_2 (عمق آب در $x=0/605$) با خط کش اندازه گیری شد و سپس این



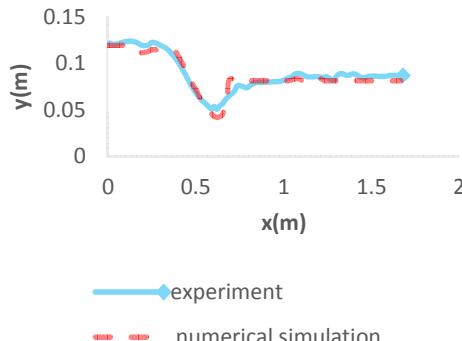
شکل ۱۴- پروفیل های سطح آزاد آب حاصل از آزمایش و نرم افزار برای دبی $0.0016 \text{ m}^3/\text{s}$

در شکل ۱۴ عدد فرود در ورودی جریان 0.22 می باشد و با توجه به نمودار، مقدار انحراف نتایج پروفیل سطح آب از نتایج آزمایشگاهی حداقل $22/13\%$ است.



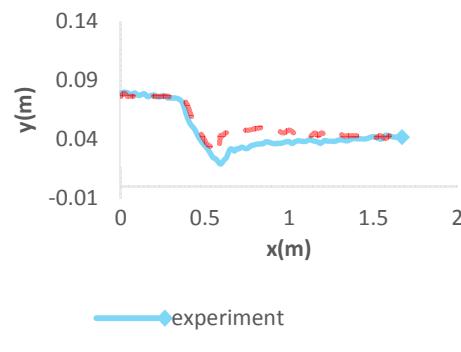
شکل ۱۵- پروفیل های سطح آزاد آب حاصل از آزمایش و نرم افزار برای دبی $0.0021 \text{ m}^3/\text{s}$

در شکل ۱۵ عدد فرود در ورودی جریان 0.25 می باشد و با توجه به نمودار، مقدار انحراف نتایج پروفیل سطح آب از نتایج آزمایشگاهی حداقل $21/81\%$ است.



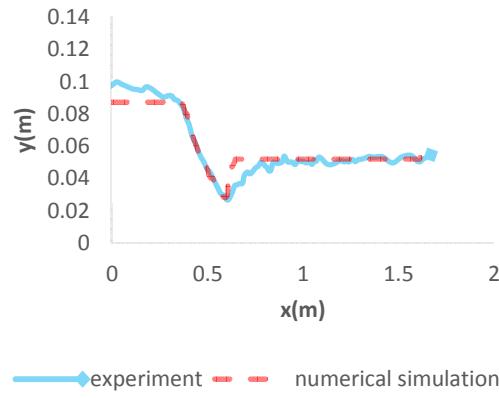
شکل ۱۶- پروفیل های سطح آزاد آب حاصل از آزمایش و نرم افزار برای دبی $0.0026 \text{ m}^3/\text{s}$

هیدرولیکی می شود این اختلافها قابل ملاحظه خواهد بود. با توجه به شکل ۱۱، مدل آشفتگی $k - \epsilon$ استاندارد نتایج نزدیک تری به پروفیل آزمایشگاهی دارد. در شکلها 12 تا 16 پروفیلهای سطح آزاد آب برای دبی های مختلف از 0.00058 تا 0.0026 متريک برابر ثانیه با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است:



شکل ۱۲- پروفیل های سطح آزاد آب حاصل از آزمایش و نرم افزار برای دبی $0.00058 \text{ m}^3/\text{s}$

در شکل ۱۲ عدد فرود در ورودی جریان 0.11 می باشد و با توجه به نمودار، مقدار انحراف نتایج پروفیل سطح آب از نتایج آزمایشگاهی حداقل $31/71\%$ است.



شکل ۱۳- پروفیل های سطح آزاد آب حاصل از آزمایش و نرم افزار برای دبی $0.0010 \text{ m}^3/\text{s}$

در شکل ۱۳ عدد فرود در ورودی جریان 0.17 می باشد و با توجه به نمودار، مقدار انحراف نتایج پروفیل سطح آب از نتایج آزمایشگاهی حداقل $30/24\%$ است.

۱۵/۷۰ درصد است و در بدترین حالت، دبی $11/10$ مترمکعب بر ثانیه این مقدار به $1/71$ درصد نیز خواهد رسید.

۵- نماد ها

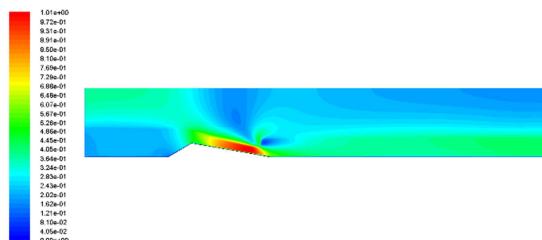
طول کanal (m)	x
عمق (m)	y
سرعت فاز q_f (m/s)	\vec{V}_q
چگالی (kg/m^3)	ρ
چگالی فاز q (kg/m^3)	ρ_q
آهنگ استهلاک بر واحد جرم (m^2/s^3)	ϵ
آهنگ مخصوص اتلاف ($1/s$)	ω
انرژی جنبشی توربولانسی (m^2/s^2)	k
لرجت دینامیکی ($kg/m.s$)	μ
سرعت نوسانی (m/s)	$\dot{\mu}_j$
لرجت ادی ($kg/m.s$)	μ_t
عدد پرانتل آشفتگی (مقدار ثابت)	σ_ϵ
عدد پرانتل آشفتگی (مقدار ثابت)	σ_ω
عدد پرانتل آشفتگی (مقدار ثابت)	σ_k
کسر حجمی فاز q	α_q
تأثیر مکوس عدد پرانتل	α_k
تولید انرژی جنبشی به علت گرادیان سرعت متوسط ($kg/m.s^3$)	G_b
تولید انرژی جنبشی به علت شناوری ($kg/m.s^3$)	\tilde{G}_k
تولید انرژی جنبشی ($kg/m.s^3$)	Γ_k
ضریب پخش موثر ($kg/m.s$)	Γ_ω
ضریب پخش موثر ($kg/m.s$)	C_1
مقدار ثابت	C_2
مقدار ثابت	$C_{1\epsilon}$
مقدار ثابت	$C_{2\epsilon}$
مقدار ثابت	$C_{3\epsilon}$

۶- مراجع

- [1] Vatankhah. A. R., Analytical integration of the equation of gradually varied flow for triangular, INT.J. Flow Measurement and Instrumentation, No. 21, PP. 546-549, 2010.
- [2] Vatankhah. A. R., Direct integration of Manning-based gradually varied flow equation, INT.J. Water Management, Vol. 164, PP. 257-264, 2011.
- [3] Vatankhah. A. R., Direct integration of Manning-based GVF Equation in trapezoidal channel, INT.J. Hydrologic Engineers, Vol. 17, PP. 455-462, 2012.
- [4] Lu. W. Z., Zhang. W. S., Cui. C. Z., Leung. A. Y. T., A numerical analysis of free-surface flow in curved open channel with velocity-pressure-free-surface correction, Computational Mechanics, Vol. 33, PP. 215-224, 2014.

در شکل ۱۶ عدد فرود در ورودی جریان $28/0$ می باشد و با توجه به نمودار، مقدار انحراف نتایج پروفیل سطح آب از نتایج آزمایشگاهی حداقل $15/70\%$ است.

از مقایسه شکل های ۱۲ تا ۱۶ چنین بر می آید که با افزایش دی توائمندی روش عددی در شبیه سازی پرش هیدرولیکی بیشتر گردیده است. باید توجه داشت که مدل k- ϵ استاندارد اصولاً در اعداد رینولدز کم (سرعت های کم) جریان در نواحی نزدیک به دیواره شبیه سازی مناسبی به دست نخواهد داد. در نمودارهای بالا دلیل دیگر اختلاف بین پروفیلهای شبیه سازی و آزمایشگاهی وجود زبری در کف کanal می باشد که در نرم افزار در نظر گرفته شده است. اعوجاج پروفیل سطح آب در نتایج آزمایشگاهی موجب ایجاد اختلاف با نتایج عددی می شود در نتیجه نرم افزار توائمندی مدل سازی پرش هیدرولیکی و اعوجاج موجود در سطح آب را به اندازه کافی ندارد.



شکل ۱۷- نمونه ای از کانتور سرعت در مدل آشفتگی k- ϵ استاندارد

در شکل ۱۷ میدان های سرعت شبیه سازی شده در امتداد خط جریان نشان داده شده است. حداقل سرعت در انتهای مانع و در ناحیه چرخشی پرش رخ می دهد و به سمت پایین دست پرش گرادیان سرعت کاهش می یابد. در نزدیکی سطح آب سرعت به صفر می رسد.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله شبیه سازی عددی پرش هیدرولیکی در کanal با مقطع مستطیلی با وجود مانع گوه ای به صورت دو بعدی با استفاده از نرم افزار فلوئنت با بکارگیری پنج مدل مختلف آشفتگی انجام شد و پروفیل سطح آزاد آب با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردید. نتایج حاصل از شبیه سازی نشان می دهد که مدل k- ϵ استاندارد وضعیت سطح آزاد آب را با دقت بهتری نسبت به مدل های آشفتگی دیگر شبیه سازی نموده است. وضعیت سطح آزاد پیش بینی شده در ناحیه ای که جریان تدریجاً متغیر می باشد، به نتایج آزمایشگاهی بسیار نزدیک است. ماکریم درصد خطای بین نتایج آزمایشگاهی و شبیه سازی عددی برای قسمت تدریجاً متغیر در $X=0/405$ برابر $3/6\%$ و در $X=0/605$ برابر $6/42\%$ می باشد. افزایش خطای در مقطع $X=0/605$ به دلیل نزدیکی این مقطع به محل پرش هیدرولیکی است. در ناحیه ای که جریان سریعاً متغیر است و پرش هیدرولیکی اتفاق می افتد، به دلیل اعوجاج بالا و سریع، مدل های آشفتگی نمی توانند به خوبی شبیه سازی را انجام دهند. در بهترین حالت، در دبی $28/0$ مترمکعب بر ثانیه انحراف ماکریم نتایج شبیه سازی عددی از نتایج تجربی به مقدار

- [5] Tomidokoro. G., Tanaka. Y., Three-Dimensional Numerical Model of Open channel flow using $k - \omega$ Turbulence Model, Japan Society of Civil Engineering, Vol. 5, PP. 336-361, 2010.
- [6] Liu. J., Tominaga. A., Nagao. M., Numerical Study of Turbulent Flow over Circular STRIP Roughness in Open Channel, Proceedings of Hydraulic Engineering 01, Vol. 40, PP. 1077-1082, 2010.
- [7] Hanger W. H., Wanoscak R., Hydraulic jump in triangular channel, Int. J. Journal of Hydraulic Research, Vol. 25, No. 5, PP. 564-549, 1987.
- [8] Rahman M., Chaudry M. H., Simulation of hydraulic jump with grid adaptation, Int. J. Journal of Hydraulic Research, Vol. 33, No. 4, PP. 555-569, 1995.
- [9] Liu M., Liu Y. L., Numerical Simulation of Hydraulic Jump, Int. J. Advanced Materials Research, Vol. 374-377, PP. 643-646, 2011.
- [10] Hasan Zobeyer A. T. M., Jahan N., Islam Z., singh G., Rajaratnam N., Turbulence characteristics of the transition region from hydraulic jump to open channel flow, Int. J. Journal of hydraulic Research, Vol. 45, No. 3, PP. 399-395, 2010.
- [11] Bayon A., Valero D., Garica-Bartual R., Valles-Moran F. J., Lopez-Jimenez P. A., Performance assessment of OpenFOAM and FLOW-3D in the numerical modeling of low Reynolds number hydraulic jump, INT.J. Enviornmental Modelling & Software, No. 80, PP. 322-335, 2016.
- [12] Kateb. S., Debabeche. M., Riguet. F., Hydraulic jump in a sloped trapezoidal channel, INT.J. Internatioal Conference on Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability, No. 74, PP. 251-257, 2015.
- [13] آصفی محروم، ضیایی علی نقی، شبیه سازی عددی دو بعدی پرش هیدرولیکی روی سطوح شیبدار معکوس همراه با پله در انتهای با نرم افزار فلوقنت، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، ۱۳۹۰، NCCE06_0833
- [14] شکری یونس، جوان میترا، اقبال زاده افшиان، محمودی نیا شراره، مقایسه مدل های آشفتگی دو معادله ای در شبیه سازی عددی پرش هیدرولیکی مستغرق، یازدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، ۱۳۹۱ IHC11_042
- [15] فرومند سید علیرضا، اسماعیلی کاظم، خداشان سعید رضا، ضیایی علی نقی، مدل سازی پرش هیدرولیکی در کاتالی با بستر مواد با استفاده از فلوقنت، دوازدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، ۱۳۹۲ IHC12_130
- [16] صاحبی فرزانه، فرسادی زاده داود، اسماعیلی ورکی مهدی، عباسپور اکرم، بررسی کارایی مدل آشفتگی $\epsilon - k$ در شبیه سازی پرش هیدرولیکی در مقطع مستطیلی واگرا، نهمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه، ۱۳۹۱ IREC09_220
- [17] حسینی محمد، مروج محسن، حسینی علی، شبیه سازی سه بعدی پرش هیدرولیکی با در نظر گرفتن مدل های مختلف آشفتگی تحت اعداد فرود پایین با استفاده از نرم افزار FLOW 3D سومین کنفرانس برنامه ریزی و مدیریت محیط زیست، ۱۳۹۲ ESPME03_778
- [18] Pritchard P. J., Leylegian J. C., Fox and McDonald's Introduction to Fluid Mechanics, eight edition, John Wiley & Sons, 2011.
- [19] Cengel Y. A., Cimbala J. M., Fluid Mechanics Fundamentals and Applications, fourth edition, McGraw-Hill, 2006.
- [20] Fluent User's Guide, www.fluent.com.