

برآورد توزیع سرعت جریان در کانال‌های روباز با کف صاف با استفاده از تئوری آنتروپی و برنامه‌ریزی ژنتیک

داود فرسادی زاده^{1*}، علی حسین زاده دلیر¹، محمدعلی قربانی¹ و سعید صمدیان فرد²

تاریخ دریافت: 88/4/24 تاریخ پذیرش: 89/5/25

1- دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

مسئول مکاتبه E-mail: farsadi_d@yahoo.com

چکیده

با توسعه تئوری آنتروپی بر مبنای اصل حداکثر آنتروپی و برنامه‌ریزی ژنتیک بر اساس اصل تکامل طبیعی، این روش‌ها در طیف وسیعی از علوم مهندسی از جمله مکانیک سیالات و هیدرولیک به کار برده شده‌اند. در این تحقیق از تئوری آنتروپی و برنامه‌ریزی ژنتیک و همچنین روش‌های متداول شامل روابط لگاریتمی، توانی و ونونی برای برآورد توزیع سرعت جریان در کانال‌های باز استفاده شده است. جهت مقایسه روش‌های مذکور، آزمایش‌هایی در کانال آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تبریز با بستر صاف و دبی‌های مختلف در محدوده 4/8 تا 32/89 لیتر بر ثانیه انجام شد و پروفیل‌های سرعت با دقت 0/1 سانتی‌متر بر ثانیه در بازه‌های یک سانتی‌متری از کف کانال تهیه گردید. نتایج بدست آمده نشان داد که تئوری آنتروپی و برنامه‌ریزی ژنتیک دقت بیشتری نسبت به روابط لگاریتمی، توانی و ونونی در برآورد توزیع سرعت جریان دارند. همچنین تئوری آنتروپی در مقایسه با روش برنامه‌ریزی ژنتیک خطای محاسباتی کمتری داشته و از این روش می‌توان برای برآورد توزیع سرعت در کانال‌های باز با دقت خوبی استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: برنامه‌ریزی ژنتیک، تئوری آنتروپی، توزیع سرعت، کانال‌های باز

Estimation of Flow Velocity Distribution in Smooth-Bed Open Channels with a Smooth Bed Using Entropy Theory and Genetic Programming

D Farsadizadeh¹, A Hosseinzadeh Dalir¹, MA Ghorbani¹ and S Samadian Fard²

Received: 15 July 2009 Accepted: 16 August 2010

¹Assoc. Prof., Dept. of Water Engin., Univ. of Tabriz, Iran

²MSc Student, Irrig. and Drain., Univ. of Tabriz, Iran

*Corresponding author E-mail: farsadi_d@yahoo.com

Abstract

With developing of entropy theory and genetic programming based on maximum entropy and natural evolution, respectively, these methods have been applied extensively to the variety of engineering sciences such as fluid mechanics and hydraulics. In this study, entropy, genetic programming and conventional methods such as logarithmic, power law and Vanoni relations were used for estimation water flow velocity distribution in open channels. For comparing the mentioned methods, experiments were carried out in an experimental flume with a smooth bed in the hydraulic laboratory of the University of Tabriz. The flow discharges ranged from 4.8 to 32.89 Lit/s. For each flow discharge, the vertical velocity profiles were prepared with a precision of 0.1 cm/s and at 1 cm intervals from the channel bottom. Results showed that entropy and genetic programming methods were more accurate than the other methods for estimating the velocity distribution. Moreover the entropy method in comparison with the genetic programming showed higher accuracy and therefore it could be used for estimating the velocity profiles with a good accuracy in open channel flows.

Keywords: Entropy theory, Genetic programming, Open channels, Velocity distribution

مقدمه

این موضوع با حل معادلات هیدرودینامیک ناویر-استوکس که با مدل‌های متلاطم ترکیب شده است، بررسی می‌گردد. این مدل‌ها به قوانین محاسبات فیزیکی وابسته هستند که جریان مایع را به عنوان مسائل مقدار مرزی در نظر می‌گیرند و بر اساس آن محاسبات را انجام می‌دهند. چپو (1987) روش جدیدی را برای بررسی توزیع سرعت در کانال‌های باز پیشنهاد نمود. چپو (1989 و 1987) معادله توزیع سرعت را با استفاده از مفهوم احتمال و اصل

برآورد توزیع سرعت نقش بسیار مهمی در شناخت پدیده‌های هیدرولیکی در کانال‌های باز دارد. توزیع سرعت در مقطع عرضی یک کانال تحت تاثیر شکل هندسی، ناهمواری‌ها و وجود پیچ و خم در کانال‌هاست و قبل از حل انواع مسائل هیدرولیکی در کانال‌های باز، باید مطالعه و بررسی شود (چاو 1959). توزیع سرعت در کانال‌های باز در طول سالیان طولانی مورد مطالعه قرار گرفته و در سال‌های اخیر،

و چایوو (1983) روش برآورد پارامتر را برای مدل ریاضی سه‌بعدی جریان در کانال‌های باز پیشنهاد نمودند که نیازی به داده‌های سرعت نداشت. این روش در مطالعه توزیع سرعت جریان در کانال‌های باز مستطیلی مورد استفاده قرار گرفت.

برنامه‌ریزی ژنتیک تعمیم یافته الگوریتم ژنتیک می‌باشد که برای اولین بار توسط کزا (1992) بر اساس تئوری داروین ارائه شد. به این ترتیب که جمعیتی در جهت تکامل به صورت انتخابی، جمعیت نامناسب را رها کرده و فرزندان اصلاح شده ایجاد می‌کنند. برنامه‌ریزی ژنتیک یک تکنیک برنامه‌ریزی خودکار می‌باشد که راه حل مسئله را با استفاده از برنامه کامپیوتری ارائه می‌کند. در این روش در ابتدای فرآیند هیچگونه رابطه تابعی در نظر گرفته نشده و این روش قادر به بهینه‌سازی ساختار مدل و مؤلفه‌های آن می‌باشد. برنامه‌ریزی ژنتیک بر خلاف الگوریتم ژنتیک روی ساختار درختی فرمول‌ها به جای سلسله ارقام دودویی عمل می‌کند. ساختارهای درختی از مجموعه توابع (عملگرهای ریاضی مورد استفاده در فرمول‌ها) و ترمینال‌ها (متغیرهای مسئله و اعداد ثابت) ایجاد می‌شوند.

آیتک و کیشی (2008) با استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیک پدیده حمل رسوب رودخانه تانگو¹ در مونتانا² را با داده‌های روزانه مدل‌سازی کردند که نتایج حاصل از برنامه‌ریزی ژنتیک با نمودارهای شدت رسوب و مدل‌های رگرسیون چند خطی مطابقت خوبی نشان داد. آیتک و همکاران (2008) از شبکه‌های عصبی و برنامه‌ریزی ژنتیک برای مدل‌سازی بارش-رواناب روزانه حوضه رودخانه جونیتا در ایالت پنسیلوانیای آمریکا استفاده کرده و نتیجه گرفتند که برنامه‌ریزی ژنتیک با دقت بهتری نسبت به شبکه‌های عصبی فرآیند بارش-رواناب را مدل‌سازی می‌کند. اوستوریکار و دئو (2008) با به کارگیری برنامه‌ریزی ژنتیک در تخمین داده‌های ناقص مربوط به ارتفاع امواج در خلیج مکزیک دریافتند که این روش از دقت بسیار مطلوبی در

بیشینه‌سازی آنتروپی بیان نمود. معادله توزیع سرعت چپو می‌تواند مقادیر سرعت را در جهت‌های عمودی و عرضی با فرض اینکه سرعت بیشینه بر روی سطح آب یا زیر آن باشد، برآورد کند. این معادله، محدودیت‌ها و نواقص سایر معادلات رایج را نداشته و توزیع سرعت بر اساس آن در فضای فیزیکی با یک توزیع احتمال توانی مطابقت دارد. این توزیع دارای پارامتر M با نام "پارامتر آنتروپی" است که مقدار آن به عنوان شاخصی برای مقایسه الگوهای مختلف توزیع سرعت جریان در کانال‌های باز مورد استفاده قرار می‌گیرد. پارامتر آنتروپی در یک کانال از طریق ارتباط بین سرعت‌های میانگین و بیشینه تعیین می‌شود زیرا نسبت سرعت‌های میانگین و بیشینه در یک کانال تابعی از M است (چپو و سید 1995). این نسبت در یک کانال ثابت بوده (چپو 1996) و نمایانگر ویژگی‌های کلی سیستم جریان و کنترل‌کننده متغیرهایی است که با کانال در تعامل هستند (زیا 1997، چن 1998، چپو و تانگ 2000). معادله چپو (1987) توزیع سرعت را نه تنها بر روی محور عمودی، بلکه در کل کانال نیز می‌تواند توصیف نماید. توزیع سرعت در کل به صورت دویبعی است، اگرچه جریان در کانال باز حالت سه‌بعدی دارد. مولفه سرعت در محور طولی، سرعت اصلی نامیده می‌شود و مولفه‌های دیگر در محور عرضی، سرعت‌های ثانویه هستند که حرکت چرخشی را در اطراف محور موازی با جریان اصلی شکل می‌دهند. جریان‌های ثانویه نقش مهمی در کانال‌های باز دارند و بیش از یک قرن مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. تعیین مولفه‌های اصلی و ثانویه سرعت در یک کانال باز می‌تواند به درک ویژگی‌های جریان کمک کند.

چپو و لین (1983) از دستگاه مختصات خمیده در تحلیل هیدرولیکی جریان استفاده نمودند. معادله آنها توانست الگوهای مختلف توزیع سرعت را در حالتی که سرعت بیشینه در سطح آب یا زیر آن باشد، شبیه‌سازی کند. آنها از داده‌های واقعی سرعت در برآورد پارامترهای مدل استفاده نمودند تا به بررسی جریان سه‌بعدی ناهمگون و نامتقارن بپردازند، ولی در بسیاری از موارد چنین داده‌هایی موجود نیستند. چپو

¹Tango²Montana

$x_{\max} = 1$ (در این حالت در معادله 2، $y = D - h$) می‌باشد، بنابراین معادله 1 با $x_0 = 0$ معادله 3 را نتیجه می‌دهد:

$$u = \frac{u_{\max}}{M} \ln \left[1 + (e^M - 1) \frac{y}{D-h} \exp \left(1 - \frac{y}{D-h} \right) \right] \quad [3]$$

(2) u_{\max} بر روی سطح آب رخ می‌دهد و $h = 0$ ، بنابراین $x_{\max} = 1$ معادله 3 به معادله 4 تبدیل می‌شود:

$$u = \frac{u_{\max}}{M} \ln \left[1 + (e^M - 1) \frac{y}{D} \exp \left(1 - \frac{y}{D} \right) \right] \quad [4]$$

معادله 4 نشان می‌دهد که در سطح آب $du/dy = 0$ می‌باشد. بنابراین می‌تواند منحنی سرعتی را توصیف نماید که بر سطح آب عمود است.

(3) u_{\max} بر روی سطح آب رخ می‌دهد و $h < 0$ (در این حالت $du/dy > 0$) دیگر همان معنای فیزیکی را که در حالت‌های 1 و 2 داشت، ندارد و تنها یک ضریب است که می‌تواند انحنا را توزیع سرعت را تعیین کند. حداکثر مقدار x عبارت است از:

$$x_{\max} = \frac{D}{D-h} \exp \left(1 - \frac{D}{D-h} \right) \quad [5]$$

بنابراین معادله 4 به معادله 6 تبدیل می‌شود.

$$u = \frac{u_{\max}}{M} \ln \left[1 + (e^M - 1) \frac{y}{D} \exp \left(\frac{D-y}{D-h} \right) \right] \quad [6]$$

از آنجائی که h به بی‌نهایت منفی نزدیک می‌شود، معادله 6 به معادله 7 تبدیل می‌شود:

$$u = \frac{u_{\max}}{M} \ln \left[1 + (e^M - 1) \frac{y}{D} \right] \quad [7]$$

معادله 7 توزیع سرعت را در کانال‌های باز توصیف می‌کند. پارامتر M از رابطه غیر صریح نسبت سرعت میانگین به سرعت بیشینه به صورت زیر به دست می‌آید (چپو 1989).

$$\frac{\bar{u}}{u_{\max}} = f = \frac{e^M}{e^M - 1} - \frac{1}{M} \quad [8]$$

معادله توزیع لگاریتمی سرعت

با توجه به رابطه تنش برشی در کانال و فرضیات پرناتل و با در نظر گرفتن زیر لایه مرزی ورقه‌ای،

پیش‌بینی داده‌های مربوط به سری‌های زمانی برخوردار است.

هدف از این تحقیق بررسی تئوری‌های نوین آنتروپی و برنامه‌ریزی ژنتیک در محاسبه پروفیل سرعت جریان در کانال‌های باز و سه روش متداول در محاسبه توزیع سرعت شامل لگاریتمی، توانی و ونونی³ و مقایسه این پنج روش با داده‌های مشاهداتی می‌باشد.

مواد و روش‌ها

معادله توزیع سرعت براساس تئوری آنتروپی

چپو (1989) با به کار بردن مفهوم احتمال و اصل حداکثر آنتروپی، معادله جدید توزیع سرعت را برای جریان سیال معرفی کرد. شکل کلی این معادله عبارت است از:

$$u = \frac{u_{\max}}{M} \ln \left[1 + (e^M - 1) \frac{x - x_0}{x_{\max} - x_0} \right] \quad [1]$$

که در آن، u سرعت که به صورت یکنواخت همراه با x افزایش می‌یابد، u_{\max} سرعت بیشینه در مقطع عرضی یک کانال، x ضریبی است که مقدار آن روی هر خط هم سرعت تعیین می‌شود، x_{\max} حداکثر مقدار x که در آن $u = u_{\max}$ می‌باشد، x_0 حداقل مقدار x که در بستر کانال رخ می‌دهد و روی خط همسرعتی است که در طول آن $u = 0$ است و M پارامتر آنتروپی می‌باشد.

برای توزیع سرعت یک بعدی بر روی محور y که از این بعد به عنوان محور قائم تعریف می‌شود و u_{\max} بر روی آن رخ می‌دهد، x را می‌توان به صورت زیر بیان داشت (چپو 1988).

$$x = \frac{y}{D-h} \exp \left(1 - \frac{y}{D-h} \right) \quad [2]$$

که در آن y فاصله هر نقطه از بستر کانال، h فاصله هر نقطه از سطح آب و D عمق آب در کانال می‌باشد. با به کار بردن معادله 1 به همراه x توصیف شده در معادله 2 برای بررسی توزیع سرعت یک‌بعدی سه حالت زیر وجود خواهد داشت:

1) سرعت بیشینه u_{\max} در فاصله h ($h > 0$) زیر سطح آب رخ می‌دهد یا در عمق y بالای بستر کانال

³Vanoni

معادله توزیع سرعت توانی

معادله توزیع سرعت توانی برای جریان‌های یکنواخت در کانال‌های عریض به صورت زیر بیان می‌شود (چاو 1959):

$$\frac{u}{u_{\max}} = \left(\frac{y}{h} \right)^{1/m} \quad [15]$$

در این رابطه، u سرعت جریان، u_{\max} سرعت بیشینه که در سطح آزاد آب فرض شده است ($y = h$)، y فاصله قائم از کف کانال، h عمق جریان و $1/m$ نمای رابطه می‌باشد.

برنامه‌ریزی ژنتیک

عوامل زیر قبل از مراحل اجرایی برنامه‌ریزی ژنتیک در گام‌های مقدماتی تعیین می‌شوند (آیتک و کیشی، 2008).

1- مجموعه ترمینال‌ها (متغیرهای مسئله، اعداد ثابت تصادفی)
2- مجموعه عملگرهای ریاضی مورد استفاده در فرمول‌ها

3- انتخاب تابع برازش مناسب ($RRSE, MSE, R, \dots$) برای سنجش برازش فرمول‌ها
4- پارامترهای کنترل کننده اجرای برنامه (اندازه جمعیت، احتمال مربوط با استفاده از عملگرهای ژنتیکی و جزئیات دیگر مربوط به اجرای برنامه)
5- معیار پایان و ارائه نتایج اجرای برنامه (مثل، تعداد تولید جمعیت جدید، تعیین یک مقدار مشخص برای برازش فرمول‌ها که اگر میزان برازش برابر یا بیشتر از آن مقدار شد، اجرا متوقف شود).
در شکل 1 طرح کلی گام‌های مقدماتی برنامه‌ریزی ژنتیک نشان داده شده است.

فرآیند اجرایی گام به گام برنامه‌ریزی ژنتیک به صورت مراحل زیر است (آیتک و کیشی 2008):

1- تولید جمعیت اولیه از فرمول‌ها که این فرمول‌ها از ترکیب تصادفی مجموعه توابع (عملگرهای ریاضی مورد استفاده در فرمول‌ها) و ترمینال‌ها (متغیرهای مسئله و اعداد ثابت) ایجاد می‌شوند.

رابطه عمومی توزیع سرعت پرانتل- فون کارمن به صورت زیر حاصل می‌شود (چاو 1959):

$$u = 5.75u_* \text{Log} \frac{y}{y'} \quad [9]$$

در رابطه 9، u_* سرعت برشی می‌باشد که برابر است با:

$$u_* = \sqrt{gRS} \quad [10]$$

y' ضخامت لایه مرزی ورقه‌ای، R شعاع هیدرولیکی و S شیب بستر کانال می‌باشد.

رابطه 9 نشان می‌دهد که سرعت در منطقه متلاطم تابع لگاریتمی نسبت به y است. در صورتی که بستر کانال صاف باشد، مقدار y' به سرعت برشی و ضریب گرانروی سینماتیک بستگی دارد. در سطوح صاف می‌توان نوشت:

$$y' = \frac{n}{9u_*} \quad [11]$$

با جایگذاری مقدار y' در رابطه 9 می‌توان نوشت:

$$\frac{u}{u_*} = 5.75 \text{Log} \frac{u_* y}{n} + 5.5 \quad [12]$$

معادله توزیع سرعت ونونی

ونونی (1941) نشان داد که رابطه عمومی توزیع سرعت پرانتل - فون کارمن در مورد کانال‌های با بستر صاف به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{u - u_{\max}}{\sqrt{gRS}} = 5.75 \text{Log} \frac{y'}{y} \quad [13]$$

رابطه 13 بر حسب سرعت بیشینه ارائه شده است. در این رابطه، y عمق آب در کانال، u سرعت در فاصله y' از کف کانال، u_{\max} سرعت بیشینه که در سطح آزاد آب فرض شده است و u_* سرعت برشی می‌باشد که مقدار آن از رابطه 10 محاسبه می‌شود. رابطه ونونی (1941) بر حسب سرعت متوسط به صورت زیر در می‌آید:

$$u = u_m + 2.5\sqrt{gRS} \left(1 + 2.3 \text{Log} \frac{y'}{y} \right) \quad [14]$$

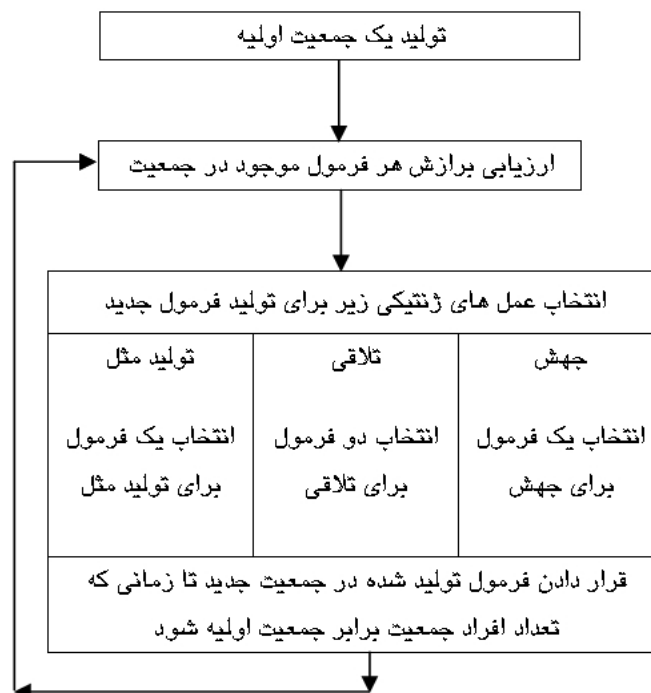
که u_m سرعت متوسط در امتداد پروفیل سرعت می‌باشد.



شکل 1- طرح کلی گام‌های مقدماتی برنامه‌ریزی ژنتیک

منفردهای با برآزش بهتر به منفردهای نامرغوب ترجیح داده می‌شوند و این بدان معنی نیست که حتماً منفردهای نامرغوب حذف می‌شوند).
 پ) از عملگر ژنتیکی انتخاب شده برای تولید فرزند (فرمول جدید) استفاده می‌شود.
 فرزند (فرمول جدید) تولید شده در یک جمعیت جدید وارد می‌شود.
 ت) مدل مورد نظر با استفاده از تابع برآزش ارزیابی می‌شود.
 4- گام سوم تا نیل به حداکثر تعداد تولید، تکرار خواهد شد. طرح کلی گام‌های اجرایی برنامه‌ریزی ژنتیک در شکل 2 نشان داده شده است.

2- هر یک از افراد جمعیت مذکور با استفاده از توابع برآزش مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.
 3- تولید جمعیت جدید از فرمول‌ها، که مراحل زیر برای تولید آن انجام می‌شود:
 الف) یکی از عملگرهای ژنتیکی تلاقی، جهش و تولید مثل انتخاب می‌شود (این سه عملگر ژنتیکی، مهمترین عملگرهای ژنتیکی مورد استفاده در برنامه‌ریزی ژنتیک می‌باشند. عملگرهای دیگری مثل اصلاح ساختار و... نیز با احتمال کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرند).
 ب) تعداد مناسبی از افراد جمعیت حاضر انتخاب می‌شوند (انتخاب فرد یا افرادی از جمعیت مذکور به صورت احتمالاتی می‌باشد که در این انتخاب احتمالاتی



شکل 2- طرح کلی گام‌های اجرایی برنامه‌ریزی ژنتیک

آزمایش‌ها و داده‌های مورد استفاده

به منظور بررسی تئوری آنتروپی و برنامه‌ریزی ژنتیک در محاسبه پروفیل سرعت در کانال‌های باز و مقایسه با سه روش متداول توزیع سرعت شامل لگاریتمی، توانی و ونونی آزمایشاتی انجام شد. آزمایشات در کانال مستطیلی آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تبریز به عرض 25 سانتی‌متر، طول 10 متر و شیب طولی 0/002 انجام گردید. محدوده دبی‌های جریان در این آزمایش‌ها 4/8 تا 32/89 لیتر بر ثانیه بود. عدد رینولدز مرزی $R_e^* = \frac{u_* D_s}{\nu}$ برای بستر کانال در شرایط مختلف جریان برابر با 2/18-2/54 محاسبه شد که کوچکتر از 5 بوده و نشان می‌دهد بستر صاف است. پروفیل قائم سرعت در یک مقطع از کانال در هر دبی جریان تهیه شد. این مقطع در فاصله 8 متری از ابتدای کانال قرار داشته و لایه مرزی متلاطم در منطقه مزبور به حالت توسعه کامل رسیده بود. اندازه‌گیری سرعت در این مقطع توسط میکرومولینه با دقت 0/1 سانتی‌متر بر ثانیه در بازه‌های یک سانتی‌متری از کف کانال تا سطح آب انجام گرفت. لازم به ذکر است که در هر مرحله، دبی جریان در کانال بر اساس پروفیل سرعت

در مقطع کانال نیز تعیین و با مقادیر اندازه‌گیری شده توسط سرریز مثلثی مقایسه و کنترل گردید. در آزمایشات انجام شده در این تحقیق 30 پروفیل قائم سرعت برداشت شد. مشخصات جریان و مقادیر سرعت میانگین و بیشینه در هر آزمایش در جدول 1 نشان داده شده است.

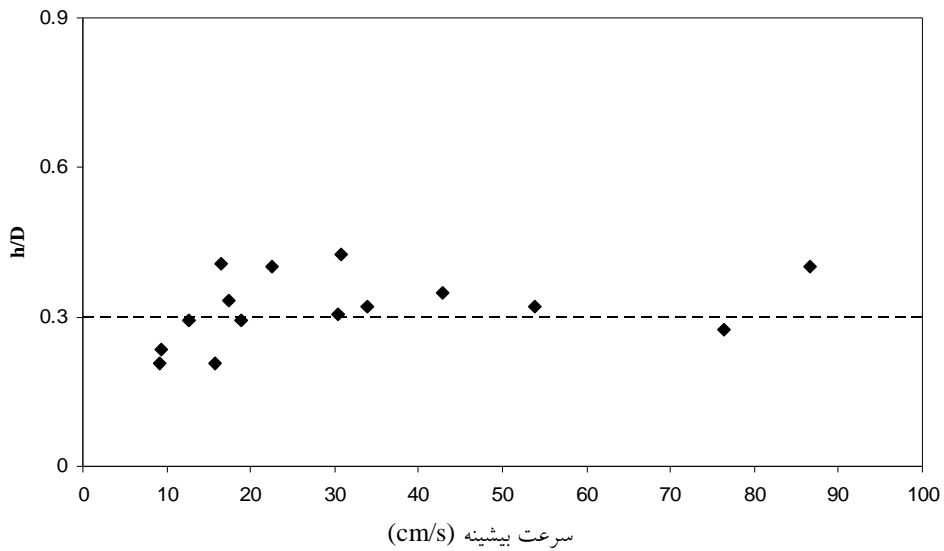
نتایج و بحث

واسنجی روش آنتروپی با تعیین پارامتر M

به منظور واسنجی روش آنتروپی و تعیین پارامتر M ، از 15 پروفیل سرعت برداشت شده استفاده گردید. بدین منظور، مقادیر h/D (نسبت عمقی که در آن سرعت بیشینه است به عمق آب در کانال) بر اساس داده‌های سرعت و عمق در پروفیل‌های مرحله واسنجی تعیین شد. مقادیر h/D برحسب سرعت بیشینه در شکل 3 نشان داده شده است. چنانچه در شکل 3 مشاهده می‌شود، مقدار میانگین h/D برابر 0/3 می‌باشد و بدین معنی است که به طور متوسط سرعت بیشینه در 0/3 عمق از سطح آب اتفاق می‌افتد.

جدول 1- مشخصات جریان و مقادیر سرعت در هر آزمایش

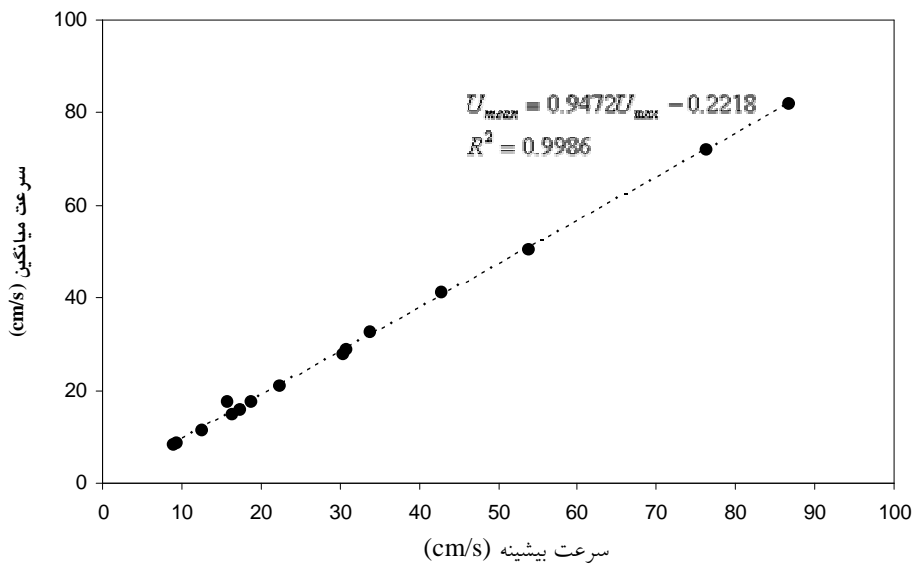
شماره آزمایش	دبی (Lit/s)	سرعت میانگین (cm/s)	سرعت بیشینه (cm/s)	عمق آب (cm)
1	4/8	11/3	12/6	17/5
2	6/76	15/0	16/1	19/4
3	7/08	15/7	17/4	18/7
4	7/38	17/4	18/8	17/4
5	7/23	8/5	9/4	33/3
6	6/93	8/2	9/1	33/8
7	8/75	17/4	15/8	24/2
8	10/21	20/4	22/00	20/4
9	11/91	19/8	20/7	24/2
10	10/73	17/2	18/2	25/6
11	12/02	18/5	19/4	27/4
12	10/2	14/6	16/5	26/6
13	15/00	28/6	30/8	21/6
14	14/08	24/5	26/4	24/5
15	14/48	24/1	25/9	24/6
16	10/93	13/7	15/5	33/9
17	15/82	37/2	40/3	17/6
18	16/35	26/2	27/4	25/7
19	15/48	26/9	29	24/2
20	17/30	22/3	24/6	30/7
21	15/74	21	22/5	31/0
22	20/2	72/0	76/3	12/1
23	20/23	32/4	33/9	25/4
24	20/36	29/1	30/5	28/3
25	23/66	41/1	42/8	24/0
26	21/67	34/7	73/3	27/9
27	25/08	27/9	30/4	37/1
28	31/22	82/0	86/7	15/4
29	32/02	50/3	53/9	25/2
30	32/89	38/7	44/8	35/1



شکل 3- مقادیر h/D در پروفیل‌های سرعت واسنجی

تعیین شود. رابطه بین این دو پارامتر در شکل 4 نشان داده شده است.

برای محاسبه پارامتر آنتروپی، ابتدا باید رابطه بین سرعت بیشینه (U_{max}) و سرعت میانگین (U_{mean})



شکل 4- رابطه بین سرعت بیشینه (U_{max}) و سرعت میانگین (U_{mean})

می‌کند. خطای بین روش‌های محاسباتی و مقادیر اندازه‌گیری شده توسط میانگین خطای استاندارد ($RMSE$) بر اساس رابطه 17 مورد بررسی قرار گرفته است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (U_{obs} - U_p)^2} \quad [17]$$

مقادیر خطای $RMSE$ روش آنتروپی، برنامه‌ریزی ژنتیک، لگاریتمی، توانی و ونونی برای 15 توزیع سرعت مرحله صحت‌سنجی در جدول 2 ارائه شده است. مطابق جدول مذکور مشاهده می‌شود، روش آنتروپی و برنامه‌ریزی ژنتیک در اکثر شرایط برتری خاصی نسبت به روش‌های دیگر دارند و با داشتن کمترین خطا، روشی مناسب در برآورد توزیع سرعت در کانال‌های باز با بستر صاف می‌باشند. بعد از روش آنتروپی، برنامه‌ریزی ژنتیک کمترین مقدار خطا را در مقایسه با سه روش دیگر دارد. در روش آنتروپی با داشتن پارامتر آنتروپی M و h/D که هر دو در مقطع کانالی مشخص، ثابت می‌باشند و با اندازه‌گیری سرعت در ارتفاع $0.3D$ از سطح آب، معادله توزیع سرعت مشخص می‌شود که این مورد، مزیتی برای روش آنتروپی محسوب می‌گردد.

معادله توزیع سرعت با روش آنتروپی و برنامه‌ریزی ژنتیک برای کانال‌های باز با بستر صاف بدست آمده است. بدیهی است که این معادلات در مورد کانال‌های باز با بستر زبر قابل کاربرد نیستند. ولی همین بررسی را می‌توان برای کانال‌های باز با بستر زبر نیز انجام داده و معادلات توزیع سرعت را تعیین کرد.

چیو (1988 و 1989)، چیو و سید (1995)، چیو و همکاران (1978) نیز با بررسی موقعیت سرعت بیشینه نسبت به سطح آب در کانال در شرایط مختلف به این نتیجه رسیدند که روش آنتروپی توانایی خوبی در برآورد توزیع سرعت در کانال‌های باز و همچنین آبراه‌های طبیعی دارد. ولی تاکنون مطالعه‌ای به منظور مقایسه توانایی برنامه‌ریزی ژنتیک در برآورد توزیع سرعت در کانال‌های باز انجام نشده است.

همچنان که از شکل 4 مشاهده می‌شود، نسبت U_{mean}/U_{max} برابر با 0/9472 به دست می‌آید که برابر با شیب خط برازش داده شده بین مقادیر سرعت میانگین و سرعت بیشینه می‌باشد. مقدار پارامتر آنتروپی M از حل معادله غیرصریح 8 برابر با 18/9394 حاصل شد.

واسنجی روش برنامه‌ریزی ژنتیک

به منظور واسنجی روش برنامه‌ریزی ژنتیک، از 15 پروفیل سرعت برداشت شده استفاده گردید. بعد از واسنجی، روش برنامه‌ریزی ژنتیک منجر به رابطه‌ای می‌شود که با داشتن دبی جریان و عمق کل آب در کانال می‌توان سرعت را در عمق مورد نظر از کف کانال به دست آورد و توزیع سرعت در مقطع کانال را تعیین نمود. رابطه 16، فرمول نتیجه شده از برنامه‌ریزی ژنتیک را نشان می‌دهد.

$$u = 0.685 - \frac{8.325}{y} - \frac{D}{5.75} + 46.846 \frac{Q}{D} + \frac{37.149}{D - 2.4624} \quad [16]$$

$$1.0 \leq y \leq 37.0$$

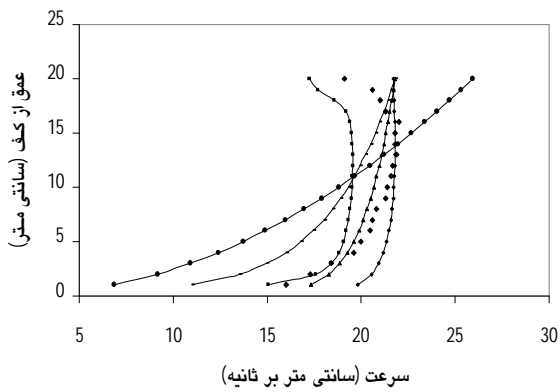
$$15.4 \leq D \leq 37.1$$

$$4.8 \leq Q \leq 32.9$$

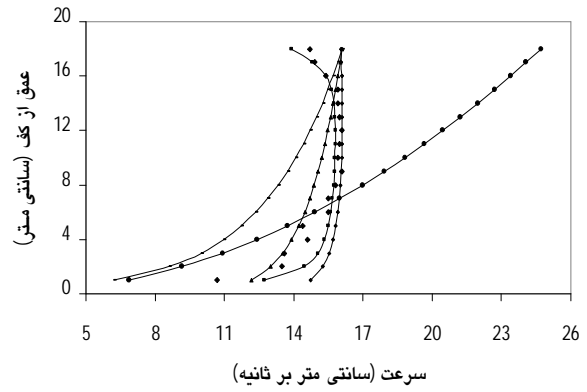
در این رابطه، u (cm/s) سرعت جریان در فاصله y (cm) از کف کانال، D (cm) عمق کل آب در کانال و Q (Lit/s) دبی جریان در کانال می‌باشد.

نتایج محاسبه پروفیل‌های سرعت

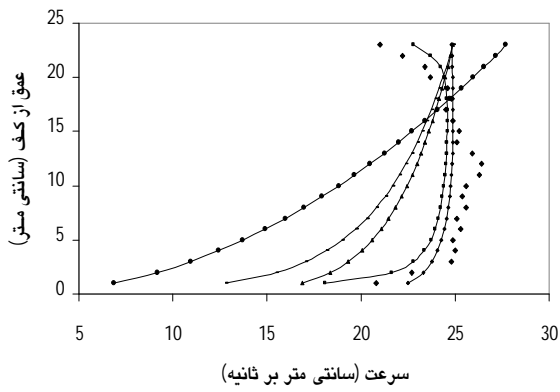
پروفیل‌های سرعت برای 15 آزمایش دیگر با دبی‌های مختلف، توسط پنج روش آنتروپی، برنامه‌ریزی ژنتیک، لگاریتمی، توانی و ونونی محاسبه و صحت‌سنجی گردید. چند نمونه از پروفیل‌های سرعت محاسباتی و اندازه‌گیری شده در مرحله صحت‌سنجی در شکل 5 ارائه شده است. نمودارهای توزیع سرعت توسط برنامه‌ای که در محیط *Mathematica 7* نوشته شده، به دست آمده‌است. این برنامه پس از ترسیم نمودارهای توزیع سرعت، مقادیر خطای بین روش‌های محاسباتی و مقادیر اندازه‌گیری شده را محاسبه



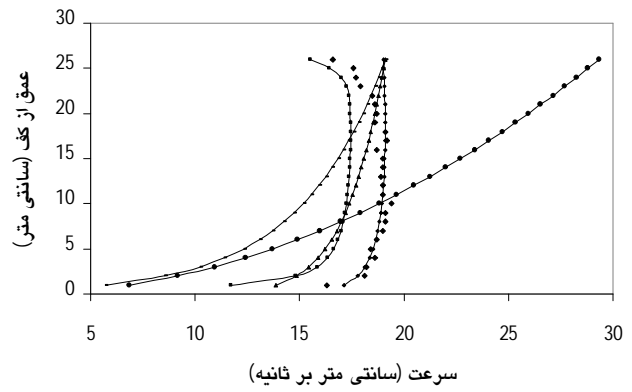
آزمایش (8)



آزمایش (2)

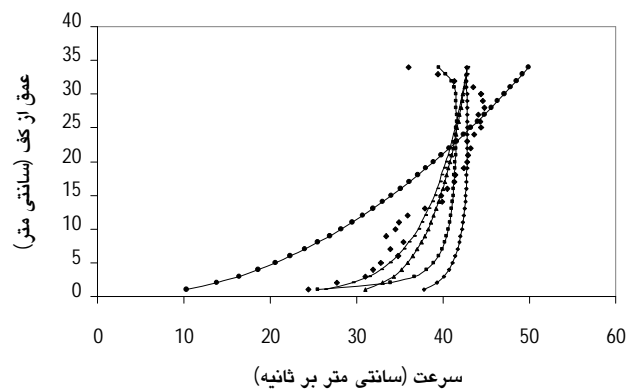


آزمایش (14)



آزمایش (11)

- برنامه‌ریزی ژنتیک
- آنتروپی
- توانی
- ورنونی
- لگاریتمی
- مشاهداتی



آزمایش (30)

شکل 5- مقایسه پروفیل‌های سرعت محاسباتی و اندازه‌گیری شده در مرحله صحت‌سنجی

جدول 2- مشخصات آزمایش‌ها و مقادیر $RMSE$ برای توزیع سرعت به روش‌های مختلف در مرحله صحت‌سنجی

شماره آزمایش	دبی اندازه‌گیری شده (Lit/s)	سرعت میانگین (cm/s)	سرعت بیشینه (cm/s)	عمق آب (cm)	$RMSE$ (cm/s)			توانی	ونونی	لگاریتمی
					آنتروپی	برنامه‌ریزی ژنتیک	توانی			
4/9995	6/76	15/0	16/1	19/4	1/30024	0/740443	0/797939	2/56712	4/9995	4/9995
4/9022	10/21	20/4	22/00	20/4	1/54802	1/84696	0/918237	2/52234	4/9022	4/9022
5/7728	11/91	19/8	20/7	24/2	0/891106	3/12664	1/3089	4/04363	5/7728	5/7728
6/8277	10/73	17/2	18/2	25/6	1/07475	0/573078	2/03914	4/24708	6/8277	6/8277
6/6509	12/02	18/5	19/4	27/4	0/72361	1/90705	1/72052	4/52633	6/6509	6/6509
7/8703	14/08	24/5	26/4	24/5	1/31218	1/32308	3/20078	4/41131	7/8703	7/8703
8/1229	14/48	24/1	25/9	24/6	1/76422	1/60955	3/34204	4/72184	8/1229	8/1229
4/9143	10/93	13/7	15/5	33/9	1/10715	2/4598	1/39814	5/29102	4/9143	4/9143
12/4431	15/82	37/2	40/3	17/6	2/29748	1/8121	5/21833	4/16148	12/4431	12/4431
8/2493	16/35	26/2	27/4	25/7	1/03071	1/39535	1/9039	4/11838	8/2493	8/2493
8/2395	15/48	26/9	29	24/2	1/55573	1/58528	2/26698	4/24085	8/2395	8/2395
7/4120	17/30	22/3	24/6	30/7	1/7916	1/4884	2/80299	5/30867	7/4120	7/4120
10/4564	20/36	29/1	30/5	28/3	1/57346	1/8279	3/34891	4/81782	10/4564	10/4564
12/2152	21/67	34/7	73/3	27/9	2/30387	2/94027	4/05352	6/03857	12/2152	12/2152
7/7519	32/89	38/7	44/8	35/1	5/53416	3/72979	2/97482	2/31539	7/7519	7/7519

محاسبه دبی جریان

مقادیر خطای $RMSE$ پنج روش مذکور برای دبی جریان در جدول 3 و مقایسه مقادیر محاسباتی و مشاهداتی دبی جریان در 15 سری از داده‌های صحت‌سنجی در جدول 4 ارائه شده است.

از جدول 3 نیز قابل مشاهده است که روش آنتروپی و سپس روش توانی و برنامه‌ریزی ژنتیک با داشتن حداقل خطای محاسباتی، به ترتیب بهترین روش‌ها در برآورد دبی جریان در کانال‌های باز می‌باشند.

بعد از محاسبه پروفیل‌های سرعت با استفاده از روش‌های برنامه‌ریزی ژنتیک، آنتروپی، لگاریتمی، توانی و ونونی و با فرض ثابت بودن سرعت در بازه‌های قائم، می‌توان دبی جریان را با استفاده از این روش‌ها محاسبه نمود. بدین منظور مقادیر دبی توسط روش‌های مذکور محاسبه شده و با مقادیر مشاهداتی که با اندازه‌گیری سرعت در فواصل یک سانتی‌متری از کف در هر مقطع از کانال به دست آمده‌اند، مقایسه گردید.

جدول 3- مقادیر $RMSE$ برای دبی جریان به روش آنتروپی، لگاریتمی، توانی و ونونی

روش	آنتروپی	برنامه‌ریزی ژنتیک	توانی	ونونی	لگاریتمی
میانگین خطای استاندارد (Lit/s)	0/815335	0/8997	0/894315	1/85537	2/84413

جدول 4- مقایسه دبی محاسبه شده به روش برنامه‌ریزی ژنتیک، آنتروپی، لگاریتمی، توانی و ونونی با مقادیر اندازه‌گیری شده

شماره آزمایش	دبی اندازه‌گیری شده (Lit/s)	دبی محاسبه شده (Lit/s)			
		آنتروپی	برنامه‌ریزی ژنتیک	توانی	ونونی
2	6/76	7/14336	6/86108	6/68008	5/9097
8	10/21	10/7433	9/39107	10/209	9/317
9	11/91	12/1164	10/0424	11/5348	10/1803
10	10/73	11/0192	10/5294	10/0177	8/92548
11	12/02	12/2269	10/895	11/3968	10/0075
14	14/08	14/1055	13/6643	12/8789	12/337
15	14/48	14/8352	14/4227	13/5952	12/9403
16	10/93	11/0244	12/7635	10/4991	7/8575
17	15/82	15/8009	16/006	14/3919	14/8055
18	16/35	16/4365	15/542	15/5685	14/4255
19	15/48	15/6917	15/9688	14/9623	13/947
20	17/30	17/5469	16/8911	16/3026	14/6455
24	20/36	20/6777	19/5577	19/0919	18/2925
26	21/67	21/0534	21/7718	20/0625	19/113
30	32/89	35/8295	34/0655	33/5516	32/7288

نتیجه‌گیری

معادلات توابع سرعت با روش آنتروپی و برنامه‌ریزی ژنتیک در این تحقیق برای کانال‌های باز با بستر صاف ارائه شده است. این تحقیق در مورد کانال‌های باز با بستر زبر نیز قابل انجام بوده و معادلات توزیع سرعت در این کانال‌ها را می‌توان بررسی کرد.

سپاسگزاری

بدین وسیله از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه تبریز که پشتیبانی مالی این تحقیق را در قالب طرح پژوهشی تقبل نمودند، تقدیر و تشکر می‌گردد.

نتایج بدست آمده نشان داد که روش آنتروپی و برنامه‌ریزی ژنتیک با داشتن کمترین خطای محاسباتی به عنوان بهترین روش توزیع سرعت در کانال‌های باز با بستر صاف هستند. همچنین با استفاده از 15 پروفیل سرعت در مرحله صحت‌سنجی، مقادیر دبی جریان با پنج روش محاسبه و با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه گردید و نتیجه گرفته شد که روش آنتروپی و برنامه‌ریزی ژنتیک با داشتن کمترین خطا، بهترین روش برای محاسبه دبی جریان می‌باشند.

منابع مورد استفاده

- Aytek A and Kisi O, 2008. A genetic programming approach to suspended sediment modeling. *Journal of Hydrology* 351: 288-298.
- Aytek A, Asce M and Alp M, 2008. An application of artificial intelligence for rainfall-runoff modeling. *Journal of Earth System Science* 117: 145-155.

- Chen YC, 1998. An efficient method of discharge measurement. Doctoral dissertation, Dept. of Civil Engineering, University of Pittsburgh, PA.
- Chiu CL, Hsiung DE and Lin HC, 1978. Three-dimensional open channel flow. *Journal of Hydraulic Division, ASCE* 104(8) :1119-1136.
- Chiu CL and Lin GF, 1983. Computation of 3-D flow and shear in open channels. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE* 109(11): 1424-1440.
- Chiu CL and Chiou JD, 1983. Structure of 3-D flow in rectangular open channels. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE* 121(11): 1050-1068.
- Chiu CL, 1987. Entropy and probability concepts in hydraulics. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE* 113(5): 583-600.
- Chiu CL, 1988. Entropy and 2-D velocity distribution in open channels. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE* 114(7): 738-756.
- Chiu CL, 1989. Velocity distribution in open-channel flow. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE* 115(5): 576-594.
- Chiu CL and Said CAA, 1995. Maximum and mean velocities and entropy in open-channel flow. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE* 121(1): 26-35.
- Chiu CL, 1996. A natural law of open-channel flows. *Proceeding of 7th International Symposium on Stochastic Hydraulics*, 29-31 July, Mackay, Australia.
- Chiu CL and Tung NC, 2000. Maximum velocity and regularities in open-channel flow. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE* 128(4): 390-398.
- Chow VT, 1959. *Open Channel Hydraulics*. McGraw-Hill Book Company, New York.
- Koza JR, 1992. *Genetic programming: on the programming of computers by means of natural selection*. Cambridge, MIT Press, MA.
- Ustoorikar K and Deo MC, 2008. Filling up gaps in wave data with genetic programming. *Marine Structures* 21: 177-195.
- Vanoni VA, 1941. Velocity distribution in open channels. *Civil Engineering* 11: 356-357.
- Xia R, 1997. Relation between mean and maximum velocities in a natural river. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE* 123(8): 720-723.