



Estimation of Discharge in Straight Compound Channels Based on the Equivalent Roughness Using the Particle Swarm Optimization Algorithm

J. Bazargan¹ and M. Rajabi^{2*}

Abstract

Several relations have been presented to estimate the flow discharge passing the straight compound channels, most of which result in acceptable results in the experimental conditions, but are not accurate enough to be sued in the case of the field studies. In the present study, the Particle Swarm Optimization Algorithm was used to analyze the experimental and field data of the compound cross sections and a new relation was presented to estimate the total discharge passing the compound cross section. In the new suggested relation, in order to estimate the equivalent roughness coefficient of the compound cross sections, in addition to the relative depth, relative width, relative hydraulic radius and relative roughness (the ratio of the mentioned parameters in the floodplains to the main cross section), a new definition of the Reynolds number was used. The results showed that the proposed relation, with an average absolute relative error of 10.4, could properly estimate the discharge in the compound cross sections so that the average absolute relative error decreased by about 38 percent in comparison to the previous studies performed by other researchers.

Keywords: Particle Swarm Optimization Algorithm (PSO), Equivalent Roughness, Compound Cross Section, Flow Discharge.

Received: May 5, 2019

Accepted: October 29, 2019

برآورد دبی در مقاطع مرکب مستقیم بر اساس زبری معادل با استفاده از الگوریتم فرا ابتکاری ازدحام ذرات

جلال بازرگان^۱ و محبوبه رجبی^{۲*}

چکیده

جهت برآورد شدت جریان عبوری از مقاطع مرکب مستقیم، تاکنون روابط متعددی ارائه شده است. اکثر روابط در شرایط آزمایشگاهی نتایج خوبی دارند اما دقت آن‌ها برای داده‌های میدانی چندان قابل استناد نیست. در پژوهش حاضر با استفاده از الگوریتم فرا ابتکاری ازدحام ذرات و با به کار بردن داده‌های آزمایشگاهی و میدانی با مقطع مرکب، رابطه جدیدی جهت برآورد دبی کل عبوری از مقطع مرکب پیشنهاد شد. در رابطه جدید پیشنهادشده، جهت برآورد ضریب زبری معادل مقاطع مرکب علاوه بر در نظر گرفتن عمق نسبی، عرض نسبی، شعاع هیدرولیکی نسبی و زبری نسبی (نسبت پارامترهای ذکر شده در دشت‌های سیلابی به مقطع اصلی) از تعریف جدیدی از عدد رینولدز استفاده گردید. نتایج نشان داد رابطه‌ی پیشنهادی با میانگین قدر مطلق خطای نسبی ۱۰/۴ درصد قابلیت مناسبی در برآورد دبی مقاطع مرکب دارد، به طوری که میزان خطای مذکور نسبت به روش‌های بررسی شده پژوهشگران پیشین، به طور میانگین در حدود ۳۸ درصد بهبود یافته است.

کلمات کلیدی: الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)، زبری معادل، مقطع مرکب، دبی جریان.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۲/۱۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۸/۷

1- Associate Professor, Department of Civil Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

2- M.Sc. Student of Hydraulic Structures, Department of Civil Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran. Email: mahboobeh.rajabi1373@yahoo.com

*- Corresponding Author

۱- دانشیار، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه زنجان، زنجان.

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی دانشگاه زنجان، زنجان.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان بهار ۱۳۹۹ امکانپذیر است.

(Parsaie et al., 2015) از پارامترهای عمق نسبی (نسبت عمق دشت سیلابی به عمق کانال اصلی)، نسبت زبری دارسی و ایسباخ، نسبت مساحت و نسبت شعاع هیدرولیکی در مقطع اصلی به دشت سیلابی جهت شبیه‌سازی رابطه دبی-اشل با استفاده از روش ماشین بردار پشتیبان استفاده نمودند. (Sahu et al., 2011) پارامترهای بدون بعد نسبت عرض، نسبت محیط و نسبت شعاع هیدرولیکی دشت سیلابی به مقطع اصلی، شیب طولی کانال اصلی و عمق نسبی را برای مدل ANFIS (سیستم تطبیقی استنتاج عصبی فازی) جهت تخمین ضریب اصطکاک کانال مرکب مورد استفاده قرار دادند. این متغیرهای بدون بعد به‌عنوان مؤثرترین پارامترها برای تخمین ضریب اصطکاک در کانال مرکب توسط Yang et al. (2005) پیشنهاد شده است. (Sahu et al., 2014) نیز از ترکیبی از شبکه عصبی و منطق فازی جهت پیش‌بینی مقاومت جریان در مقاطع مرکب استفاده نمودند. علی‌رغم دقت بالا در این روش‌ها، امکان ارائه رابطه ریاضی بین متغیرهای ورودی و خروجی وجود ندارد.

(Azamathulla and Zahiri, 2012) از روش برنامه‌ریزی ژنتیک خطی، (Zahiri and Azamathulla, 2014) روش برنامه‌ریزی ژنتیک خطی و درخت M5 و (Zahiri and Shabani, 2018) از روش برنامه‌ریزی بیان ژن چندمرحله‌ای برای محاسبه دبی مقاطع فوق‌الذکر استفاده نمودند. (Das et al., 2019) نیز با استفاده از برنامه‌ریزی بیان ژن به تخمین دبی در مقاطع مرکب غیرمنشوری پرداختند.

هدف این مقاله، ارائه کاربرد الگوریتم ازدحام ذرات به‌عنوان روش مناسب جهت پیش‌بینی دبی در مقاطع مرکب همگن و غیرهمگن با مسیر مستقیم می‌باشد. در پژوهش حاضر تلاش شده است تا با استفاده از الگوریتم فرا ابتکاری ازدحام ذرات رابطه‌ای جدید برای ضریب زبری به‌عنوان ضریب زبری معادل کانال مرکب ارائه گردد و با استفاده از زبری معادل ارائه شده، دبی کل مقطع مرکب برآورد و با سایر روش‌های موجود مقایسه شود. در واقع روش پیشنهادی ترکیب اصلاحی از روش‌های مقطع واحد و تقسیم مقطع می‌باشد. همچنین در روش تجزیه وزنی مقطع مرکب، ضریب ثابت γ را به‌صورت نسبت زبری دشت‌های سیلابی به مقطع اصلی لحاظ کرده و به کمک الگوریتم ازدحام ذرات بهینه شده است.

۲- مواد و روش‌ها

روابط محاسبه دبی مقاطع مرکب: (الف) روش مقطع واحد: این روش همانند روش محاسبه دبی در کانال‌های معمولی است و تنها تفاوت آن مربوط به ضریب زبری است. محققان با در نظر گرفتن فرضیاتی،

رودخانه‌ها معمولاً از دو بخش کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها تشکیل شده‌اند. زمانی که عمق جریان از کانال اصلی رودخانه فراتر رفته و وارد دشت‌های سیلابی می‌شود، مقطع رودخانه فرم مقطع مرکب را می‌گیرد. مقطع مرکب، مقطعی است که سطح آن از چند زیرمقطع با مشخصات متفاوت تشکیل شده است. مطالعات محققین نشان می‌دهد تغییرات عمق و اختلاف زبری بین کانال اصلی و دشت‌های سیلابی، سبب ایجاد اختلاف سرعت در این دو ناحیه و در نتیجه ایجاد لایه‌های برشی و آشفتگی در محل اتصال جریان در مقطع اصلی و سیلاب‌دشت‌ها شده و دبی عبوری مقطع اصلی کاهش می‌یابد (Ackers, 1992; Wormleaton, 1990). این پدیده اثر متقابل یا اندرکنش جریان در مقطع اصلی و دشت سیلابی نام دارد. تفاوت اصلی کانال مرکب با کانال معمولی نیز ناشی از همین پدیده است. محاسبه دبی در کانال‌های باز معمولاً توسط فرمول‌های مانینگ، سزی و دارسی و ایسباخ انجام می‌شود. این روابط در کانال‌های معمولی دارای دقت مناسبی هستند، اما زمانی که جریان از مقطع اصلی فراتر رفته و وارد دشت‌های سیلابی شود، استفاده از آن‌ها برای محاسبه دبی راه حل درستی نبوده و باعث بروز خطا خواهد شد (Al-Khatei et al., 2012). تخمین دبی در رودخانه‌ها از مهم‌ترین پارامترها در مدیریت سیل می‌باشد، لذا محققان تلاش کرده‌اند روش‌هایی را برای انجام محاسبات هیدرولیکی در این مقاطع ارائه دهند. روش‌هایی که در این مقاله مورد بحث قرار می‌گیرند روش‌های یک‌بعدی هستند. روش‌های دوبعدی و سه‌بعدی با وجود دقت بیشتر، به داده‌ها و زمان پردازش بیشتری نیز نیاز داشته و پیچیده‌تر هستند.

روش‌های یک‌بعدی مقطع واحد (SCM^1) و تقسیم مقطع (DCM^2) متداول‌ترین روش‌های تعیین دبی در مقاطع مرکب هستند که طبق مطالعات صورت گرفته دارای دقت مناسبی نمی‌باشند. لذا محققان تلاش نموده‌اند روش‌های یک‌بعدی اصلاحی ارائه نمایند. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش تقسیم وزنی مقطع مرکب (Lambert and Myers, 1998)، روش بدون بعد اصلاح دبی (Haidera and Valentine, 2002) و روش تجزیه تبدیلی (Huthoff et al., 2008) اشاره نمود. امروزه پژوهش‌های متعددی با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی هوشمند انجام شده است.

(Liu and Sahu et al., 2011), Parsaie and Haghiabi (2015) و James (2000) و Zahiri and Dehghani (2009) از شبکه‌های عصبی مصنوعی برای شبیه‌سازی رابطه دبی-اشل استفاده نمودند.

$$COH = \frac{(1+A^*) \sqrt{(1+A^*)(1+f_* p^*)}}{1+A^* \sqrt{\frac{A_*}{f_* p^*}}} \quad (1)$$

پارامتر f ضریب زبری داری وایسباخ و زیروند * بیانگر نسبت متغیر در دشت سیلابی به مقطع اصلی هستند.

(ج) روش تجزیه وزنی مقطع مرکب (WDCM³): Lambert and Myers (1998) روابط ۲ و ۳ را جهت محاسبه سرعت جریان در مقطع اصلی و دشتهای سیلابی مقاطع مرکب ارائه کردهاند:

$$V_{mc} = \xi V_{mc-v} + (1-\xi)V_{mc-H} \quad (2)$$

$$V_{fp} = \xi V_{fp-v} + (1-\xi)V_{fp-H} \quad (3)$$

V_{mc-v} و V_{mc-H} به ترتیب سرعت جریان در مقطع اصلی به صورت تجزیه قائم و افقی مقطع، V_{fp-v} و V_{fp-H} و نیز سرعت در دشتهای سیلابی به صورت تجزیه قائم و افقی مقطع هستند و مقدار ضریب ξ برای شرایطی که تمامی زیرمقاطع کانال دارای زبری یکسان باشند، ۰/۵ و در غیر این صورت برابر ۰/۲ است.

(د) روش اروین و همکاران: (Ervin et al. (2000) به کمک رگرسیون غیرخطی رابطه‌ی زیر را ارائه نمودند.

$$\frac{Q_t}{Q_b} = 0.8059 \left(\frac{H}{h}\right)^{3.6846} \quad (4)$$

که در آن Q_t دبی کل مقطع مرکب، Q_b دبی مقطع پر، H عمق کل جریان و h عمق مقطع اصلی هستند.

بدون لحاظ نمودن انتقال ممتوم ایجاد شده بین مقطع اصلی و دشتهای سیلابی روابطی را برای محاسبه ضریب زبری به عنوان ضریب زبری معادل در کانالهای مرکب ارائه داده‌اند که در جدول ۱ به چند نمونه از این روابط اشاره شده است.

(ب) روش تقسیم مقطع: در این روش کانال مرکب را به چند زیر مقطع تقسیم کرده و معادلات مقاومت جریان را برای هر جزء به طور جداگانه به کار می‌برند و دبی کل مقطع با جمع کردن دبی ریز مقاطع محاسبه می‌شود. در محاسبات نرم‌افزارهایی مانند MIKE11, HEC-RAS و SOBEK از این روش استفاده می‌شود (Huthoff et al., 2008).

(Asgari et al. (2011) با استفاده از نتایج فاز A آزمایش‌های FCF (کانال مرکب مستقیم و منشوری) به این نتیجه رسیدند که با توجه به این که خطای نسبی محاسبه دبی با روش DCM دارای مقدار حداکثر در عمق‌های نسبی ۰/۱ تا ۰/۳ می‌باشد، اندرکنش حداکثر بین کانال اصلی و بسترهای سیلابی در این بازه از عمق‌های نسبی رخ می‌دهد.

A مساحت، P محیط مرطوب، n ضریب زبری، R شعاع هیدرولیکی و زیروند i معرف پارامترهای مذکور در زیرمقاطع هستند.

(Ackers (1992) میزان خطای این روش را تابع عمق نسبی، عرض نسبی و زبری نسبی (نسبت پارامترهای ذکر شده در دشت سیلابی به کانال اصلی) دانسته و با استفاده از این عوامل، پارامتری به نام کوهیرنس به صورت رابطه ۱ ارائه نموده است.

Table 1- some examples of the relationships presented for manning roughness equivalent for compound channels

جدول ۱- چند نمونه از روابط ارائه شده برای ضریب زبری مانینگ معادل کانالهای مرکب

Reference	Equation	Reference	Equation
Pavlovskii (1931)	$n_e = \frac{\sum (n_i^2 p_i)^{\frac{1}{2}}}{p^{\frac{1}{2}}}$	Yen 2 (1992)	$n_e = \frac{\sum P_i R_i^{\frac{1}{3}} n_i}{P R^{\frac{1}{3}}}$
Horton (1933) and Einstein (1934)	$n_e = \frac{\sum (n_i^2 p_i)^{\frac{2}{3}}}{p^{\frac{2}{3}}}$	Yen 3 (1992)	$n_e = \frac{\sum P_i n_i}{P}$
U.S. Army Corps of Engineers Los Angeles District Method, see Cox ~1973	$n_e = \frac{\sum n_i A_i}{A}$	Yen 4 (1992)	$n_e = \left(\frac{\sum P_i R_i^{\frac{2}{3}} n_i^2}{P R^{\frac{2}{3}}} \right)^{\frac{1}{2}}$
Yen 1 (1992)	$n_e = \left(\frac{R^{\frac{1}{3}}}{p} \sum_{i=1}^n \frac{P_i n_i^2}{R_i^{\frac{1}{3}}} \right)^{\frac{1}{2}}$	Yen 5 (1992)	$n_e = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{P_i n_i}{R_i^{\frac{1}{6}}}}{\frac{P}{R^{\frac{1}{6}}}}$

۲-۱- داده‌ها و مقاطع مرکب مورد استفاده

در شکل ۱ مقطع کانال مرکب مورد استفاده جهت محاسبه دبی برای روش پیشنهادی با پارامترهای مربوط به آن نشان داده شده است.

در این مطالعه از ۳۹۳ داده هندسی و هیدرولیکی مربوط به ۳۰ مقطع مرکب، در شرایط آزمایشگاهی و رودخانه‌ای استفاده شده است که در جدول ۲ محدوده‌ی تغییرات پارامترهای هندسی و هیدرولیکی داده‌های مورد استفاده ارائه شده‌اند. داده‌های آزمایشگاهی مربوط به نتایج آزمایشگاهی محققان مختلفی از جمله Blalock and Sturm (1981), Knight and Sellin (1997), Myers and Lyness, Knight and Demetriou (1983), Atabay and Knight, Lai and Bessaih (2004), (1997), Haidera and Valentine, Bousmar et al. (2004), (2006), Lambert and Myers و Bousmar and Zech (1999), (2002), (1998) و داده‌های صحرایی مقاطع مرکب مربوط به مقادیر اندازه‌گیری شده رودخانه سورن (Knight et al., 1998) و رودخانه مین (Martin and Myers, 1991) در انگلستان و رودخانه ریوکلرادو (Tarrab and Weber, 2004) در کشور آرژانتین هستند.

۲-۲- روش الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات PSO

روش الگوریتم ازدحام ذرات یکی از تکنیک‌های بهینه‌سازی هوشمند می‌باشد که بر پایه‌ی رفتار گروهی اجتماعی از پرندگان یا ماهی‌ها شکل گرفته است که به‌طور تصادفی در یک منطقه به دنبال غذا می‌گردند. در این الگوریتم که ایده آن برای اولین بار توسط Eberhart and Kennedy (1995) مطرح شد، موجودات زنده (پرندگان یا ماهی‌ها) فرضی، ذره نامیده می‌شود. هر کدام از این ذرات دارای پنج خاصیت شامل: موقعیت، تابع هدف متناظر با این موقعیت، سرعت، بهترین موقعیت تجربه‌شده و مقدار تابع هدف متناظر با بهترین موقعیت تجربه‌شده است. در طی اجرای الگوریتم، موقعیت و سرعت هر ذره مطابق روابط ۱۰ و ۱۱ از روی اطلاعات مرحله‌ی قبل ساخته می‌شود.

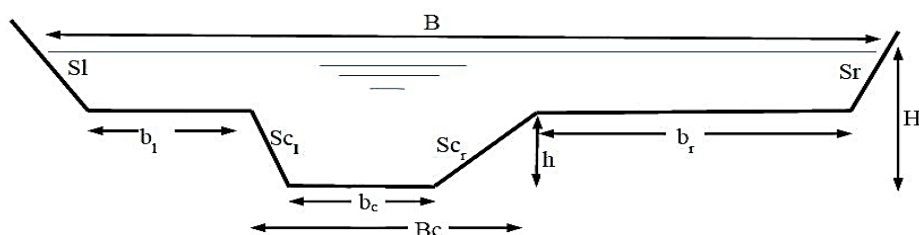


Fig. 1-Cross section of the compound channel

شکل ۱- مقطع کانال مرکب

(ه) روش بدون بعد اصلاح دبی: (Haidera and Valentine (2002) رابطه‌ای به شکل رابطه ۵ جهت محاسبه‌ی دبی کل مقطع مرکب ارائه نمودند.

$$Q_t = D_r Q_{SCM} + (COH - D_r) Q_{DCM} \quad (5)$$

D_r عمق نسبی، COH ضریب کوهیرنس، و Q_{SCM} و Q_{DCM} به ترتیب دبی محاسبه‌شده با روش‌های مقطع واحد و تقسیم مقطع هستند.

(و) روش حسینی: (Hosseini (2004) با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی مقاطع مرکب همگن و رگرسین غیرخطی روابط ۶ و ۷ را به ترتیب برای تعیین سرعت جریان در مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی ارائه نمود.

$$V_{mc} = 0.782 D_r^{-0.128} COH^{0.353} V_{mc-DCV-V} \quad (6)$$

$$V_{fp} = 0.903 D_r^{-0.197} COH^{0.547} V_{fp-DCV-V} \quad (7)$$

$V_{mc-DCV-V}$ و $V_{fp-DCV-V}$ به ترتیب سرعت جریان در مقطع اصلی و دشت سیلابی به روش تجزیه قائم مقطع مرکب هستند.

(ز) روش تجزیه تبدلی مقطع مرکب ($IDCM^4$): (Huthoff et al. (2008) بر اساس مبانی تئوریک هیدرولیک جریان در مقاطع مرکب و تنش برشی ایجاد شده در محل اتصال مقطع اصلی به دشت سیلابی، برای محاسبه سرعت در مقطع اصلی و دشت سیلابی روابط ۸ و ۹ را ارائه نمودند.

$$V_{mc} = \left(V_{mc-VDCM}^2 - \frac{0.5 \gamma N_{fp} \epsilon_{mc} (V_{mc-VDCM}^2 - V_{fp-VDCM}^2)}{1 + 0.5 \gamma (N_{fp} \epsilon_{mc} + \epsilon_{fp})} \right)^{0.5} \quad (8)$$

$$V_{fp} = \left(V_{fp-VDCM}^2 + \frac{0.5 \gamma \epsilon_{mc} (V_{mc-VDCM}^2 - V_{fp-VDCM}^2)}{1 + 0.5 \gamma (N_{fp} \epsilon_{mc} + \epsilon_{fp})} \right)^{0.5} \quad (9)$$

در این روابط، $N_{fp} = \frac{h_{int}}{f_{fp} P_{fp}}$ ، $\epsilon_{mc} = \frac{h_{int}}{f_{mc} P_{mc}}$ ، ϵ_{fp} تعداد دشت‌های سیلابی و γ ضریبی است که مقدار آن $0/6$ به‌دست آمده و h_{int} عمق جریان در محل اتصال مقطع اصلی به دشت سیلابی می‌باشد.

Table 2- Range of geometric and hydraulic variables of compound channels used

Variable	Minimum value	Maximum value	Mean value
H (m)	0.0364	7.81	0.985
h (m)	0.031	6.00	0.811
b _c (m)	0.05	21.4	3.15
b _r (m)	0.00	26.5	4.18
b _l (m)	0.00	63.00	8.717
S ₀ (m)	0.000185	0.005	0.00108
S _{cl}	0.00	2.00	0.508
S _{cr}	0.00	2.00	0.529
S _l	0.00	4.00	0.698
S _r	0.00	7.10	1.17
Q _t (m ³ /s)	0.0018	399	29.14
n _m	0.008	0.0307	0.0133
n _f	0.008	0.05	0.0165

در این پژوهش با توجه به پارامترهای مؤثر و مورد استفاده در تخمین ضریب زبری و دبی در مطالعات سایر پژوهشگران و انجام سعی و خطا با استفاده از الگوریتم فرا ابتکاری ازدحام ذرات، رابطه‌ای به شکل زیر برای ضریب زبری داری وایسباخ پیشنهاد شده است.

$$\left(\frac{f_e'}{f_{DCM}}\right)^{\beta} = \alpha[(H_n)^{a_1} (B_n)^{a_2} (Re')^{a_3} (R_n)^{a_4}] \quad (12)$$

که H_n عمق نسبی $(\frac{H-h}{H})$ ، B_n عرض نسبی $(\frac{b_f(B-B_c)}{B_c})$ ، R_n متوسط نسبت شعاع هیدرولیکی سیلاب‌دشت‌ها به کانال اصلی، n_n متوسط نسبت ضریب زبری مانینگ دشت‌های سیلابی به کانال اصلی و Re' شکل جدیدی از عدد رینولدز که در پژوهش حاضر برای کانال مرکب به صورت $Re' = \frac{(V_f + V_m)}{2} (H)$ تعریف شده است. V_f متوسط سرعت سیلاب‌دشت‌ها و V_m سرعت در کانال اصلی می‌باشند، نیز ضریب زبری داری وایسباخ محاسبه شده با روش تقسیم مقطع می‌باشد و α ، β و a_1 تا a_5 ضرایبی هستند که توسط الگوریتم ازدحام بهینه می‌شوند.

$$X_i^j[t+1] = X_i^j[t] + V_i^j[t+1] \quad (10)$$

$$V_i^j[t+1] = W V_i^j[t] + C_1 r_1 (X_{i,best}^j[t] - X_i^j[t]) + C_2 r_2 (X_{g,best}^j[t] - X_i^j[t]) \quad (11)$$

W ضریب اینرسی، r_1 و r_2 بردارهای تصادفی با توزیع یکنواخت در محدوده (۰ و ۱)، C_1 و C_2 به ترتیب ضریب یادگیری شخصی ذره و ضریب یادگیری جمعی در محدوده (۰ و ۲)، $X_{i,best}^j$ بهترین موقعیت تجربه شده ذره و $X_{g,best}^j$ بهترین موقعیت تجربه شده ذره و بنابرین موقعیت جدید ذره ترکیبی است از حرکت در جهت سرعت قبلی، بهترین موقعیت تجربه شده شخصی ذره و بهترین موقعیت تجربه شده جمع که در شکل ۲ قابل مشاهده است. این قانون حرکتی برای تمامی ذرات ثابت است. نهایتاً طی این همکاری‌ها با توجه به معیار تعریف شده برای توقف، (برای مثال تعداد تکرار مشخص و یا رسیدن به حد قابل قبولی از پاسخ) تمامی ذرات به جواب بهینه مسأله مورد نظر می‌رسند. فلوجارت الگوریتم ازدحام ذرات مورد استفاده در این پژوهش، در شکل ۳ نشان داده شده است.

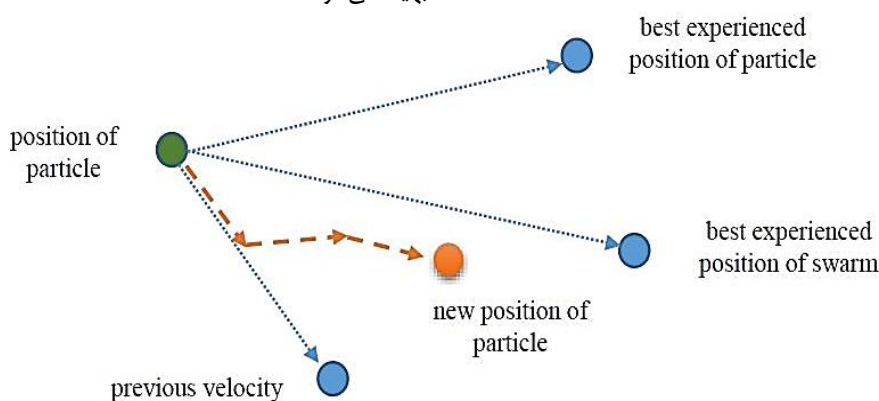


Fig. 2-Discribe of particle behavior in the particle swarm optimization algorithm

شکل ۲- توصیف رفتار ذرات در الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

۳-۲- معیار ارزیابی روابط

دقت روابط مورد استفاده در این تحقیق بر پایه‌ی شاخص‌های آماری بیان‌کننده خطا شامل: میانگین قدر مطلق خطای نسبی (RMAE)، میانگین خطای نسبی (RMA)، ضریب تعیین (R^2)، مجذور میانگین مجموع مربعات خطا (RMSE) و متوسط قدر مطلق انحراف (δ^2) به شرح روابط ۱۳ تا ۱۷ مورد بررسی قرار گرفته است:

$$RMAE = \frac{\sum \frac{|Q_c - Q_m|}{Q_m} 100}{N} \quad (13)$$

$$RMA = \frac{\sum \frac{Q_c - Q_m}{Q_m} 100}{N} \quad (14)$$

$$R^2 = \left(\frac{\sum (Q_c - \bar{Q}_c)(Q_m - \bar{Q}_m)}{\sqrt{\sum (Q_c - \bar{Q}_c)^2 \sum (Q_m - \bar{Q}_m)^2}} \right)^2 \quad (15)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (Q_c - Q_m)^2}{N}} \quad (16)$$

$$\delta^2 = \frac{\sum |Q_c - Q_m|}{\sum Q_m} 100 \quad (17)$$

Q_c و Q_m به ترتیب مقادیر دبی محاسباتی و مشاهداتی، \bar{Q}_c و \bar{Q}_m میانگین این مقادیر هستند و N نیز تعداد کل داده‌ها می‌باشد.

۳- بحث و نتایج

جهت انجام پژوهش حاضر، داده‌های مورد استفاده به دو گروه آموزش و آزمون تقسیم شدند که از ۷۰ درصد آن‌ها (۲۷۵ داده) جهت توسعه رابطه‌ی پیشنهادی ارائه شده و از ۳۰ درصد مابقی داده‌ها (۱۱۸ داده) جهت صحت‌سنجی، ارزیابی دقت و کارایی رابطه پیشنهادی استفاده شده است. تابع هدف به صورت اختلاف مقادیر واقعی $f(\exp_i)$ و مقادیر محاسبه شده توسط رابطه‌ی پیشنهادی $f(x_i)$ در حالت‌ها یا تکرارهای مختلف در نظر گرفته شده است:

$$z = \sum_{i=1}^n (f(\exp_i) - f(x_i)) \quad (18)$$

با توجه به اینکه استفاده از پارامترهای تعداد تکرار (Max it)، تعداد ذرات (n_{pop})، ضرایب یادگیری (C_1, C_2) و ضریب اینرسی (w) در همگرایی و یافتن نقاط بهینه مؤثر است، اثر این پارامترها بر میزان خطا مورد بررسی قرار گرفتند و $Max\ it = 500$ ، $n_{pop} = 50$ انتخاب شدند. برای ضرایب یادگیری و اینرسی نیز از روش Clerc and Kennedy (2002) استفاده شد.

لذا رابطه ۱۹ به‌عنوان رابطه نهایی جهت محاسبه‌ی ضریب زبری

دارسی و ایسباخ معادل کانال مرکب به کمک روش الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای داده‌های آموزش استخراج گردید:

$$\left(\frac{f_c}{f_{DCM}} \right)^{0.2} = 1.0105 \left(\frac{(H_n)^{0.0426} (B_n)^{0.0141} \left(\frac{\log(Re)}{5000} \right)^{0.02274} \left(\frac{n_n}{10} \right)^{0.1075}}{(\log(R_n+2))^{0.3099}} \right) \quad (19)$$

پس از تعیین ضریب زبری دارسی و ایسباخ، مقدار n_c مقطع مرکب با توجه به رابطه ۲۰ محاسبه و سپس مقدار Q برحسب رابطه مانتینگ برآورد می‌گردد.

$$n_c = \frac{R \sqrt{f_c}}{\sqrt{8g}} \quad (20)$$

چنانچه قبلاً نیز بیان شد، مقدار K در روابط ۲ و ۳ برای شرایطی که تمامی زیرمقاطع کانال دارای زبری یکسان باشند $0/5$ و در غیر این صورت برابر $0/2$ در نظر گرفته شده است. با بررسی‌های انجام شده در پژوهش حاضر، مقدار بهینه ضریب مذکور به‌صورت نسبت ضریب زبری دشت‌های سیلابی به مقطع اصلی لحاظ شده و با استفاده از داده‌های آموزش، به‌صورت رابطه‌ی ۲۱ بهینه‌سازی شد.

$$Q = \left[\left(\frac{n_{fp}}{20n_m} \right)^{0.2091} V_{mc-v} + \left(1 - \left(\frac{n_{fp}}{20n_m} \right)^{16.8185} V_{mc-H} \right) A_m + \left[\left(\frac{n_{fp}}{20n_m} \right)^{2.537} V_{fp-v} + \left(1 - \frac{n_{fp}}{20n_m} \right)^{4.1777} V_{fp-H} \right] A_{fp} \right] \quad (21)$$

در شکل ۴ و جدول ۳ مقایسه بین مقدار Q برآورد شده بر مبنای رابطه ۱۹ و Q مشاهداتی در مراحل آموزش و صحت‌سنجی، انجام شده است.

چنانچه در شکل ۴ ملاحظه می‌شود هم‌خوانی مناسبی بین Q برآورد شده با رابطه‌ی پیشنهادی و Q مشاهداتی داده‌های آموزش و صحت‌سنجی وجود دارد. در جدول ۳ مقادیر پارامترهای آماری روابط ۱۳ تا ۱۷ برای داده‌های آموزش و صحت‌سنجی رابطه‌ی پیشنهادی و رابطه‌ی اصلاحی تجزیه وزنی ارائه شده است. با عنایت به بالا بودن مقدار ضریب همبستگی و پایین بودن مقادیر خطاهای مذکور، دقت هر دو رابطه مناسب ارزیابی می‌شود.

جهت ارزیابی میزان هم‌خوانی دبی برآورد شده توسط رابطه پیشنهادی پژوهش حاضر (رابطه ۱۹) و روابط پیشنهادی محققین قبلی با مقادیر دبی مشاهداتی، شکل‌های ۵، ۶ و ۸ و جداول ۴ تا ۶ تهیه شده‌اند. در شکل ۵ و جدول ۴ مقایسه بین دبی برآورد شده با روابط مختلف روش مقطع واحد و روش پیشنهادی، در شکل ۶ و جدول ۵ مقایسه بین دبی برآورد شده با روش تقسیم مقطع و روش پیشنهادی و در شکل ۸

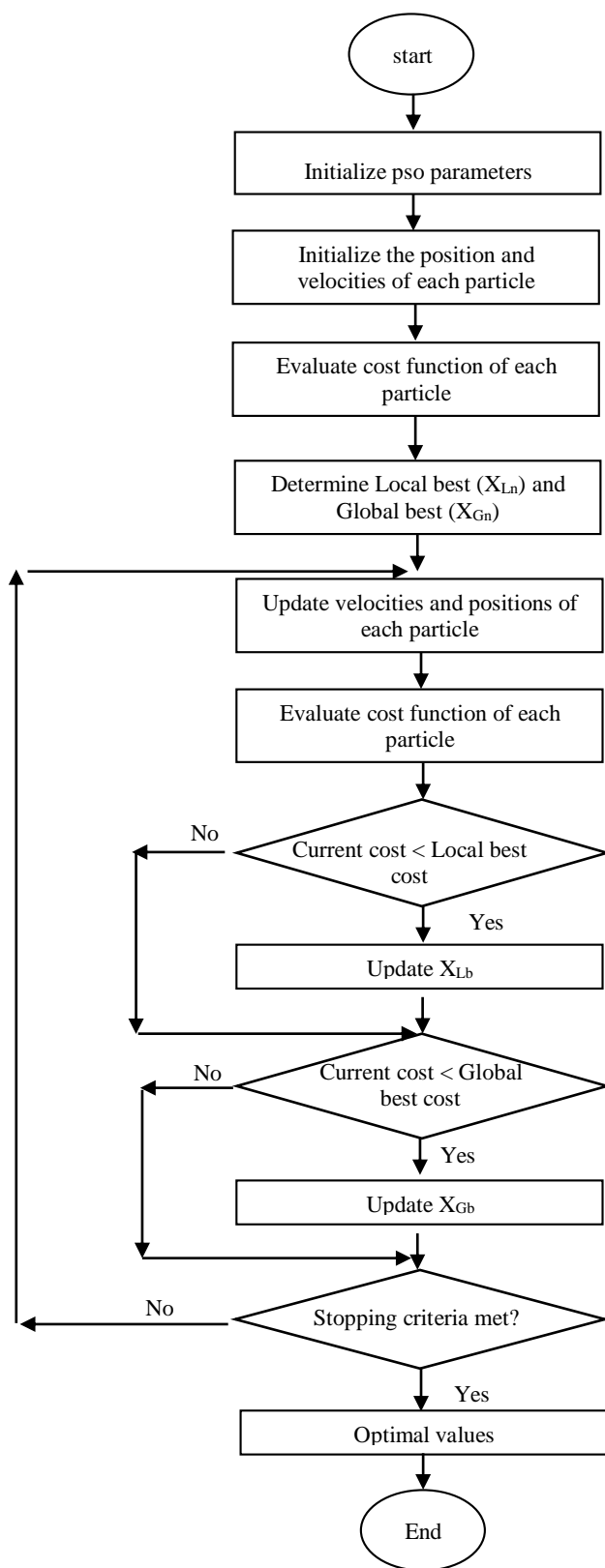


Fig. 3- Particle Swarm Optimization (PSO) flowchart
 شکل ۳- فلوچارت الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)

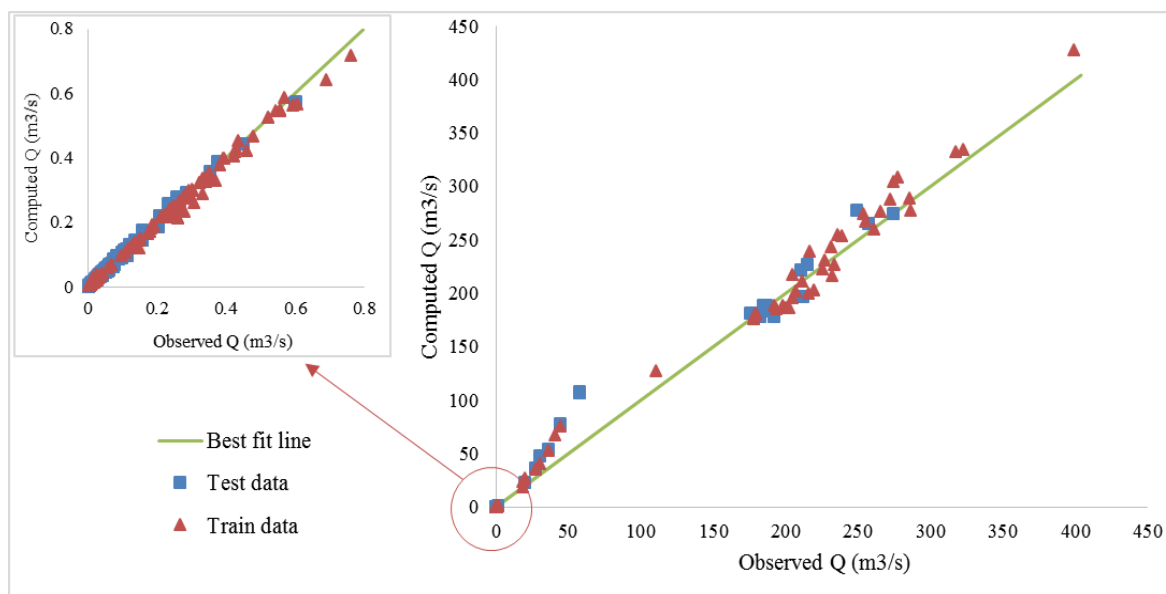


Fig. 4- Comparison of the proposed relationship's precision for training and testing steps
 شکل ۴- مقایسه دقت رابطه‌ی پیشنهادی در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی

Table 3- Evaluation of the proposed and Modified WDCM method equations in the calibration and validation steps

جدول ۳- ارزیابی رابطه‌ی پیشنهادی و رابطه‌ی اصلاح شده روش تجزیه وزنی در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی

statistical parameters	proposed relationship		Proposed Method for WDCM Improvement	
	Test data	Train data	Test data	Train data
%RMAE	11.4	10.1	11.9	11.5
%RME	3.7	5.6	1.7	2.6
RMSE	8.4	5.9	10.7	10.3
% δ^2	10.2	6.1	14.0	10.0
R2	0.98	0.99	0.98	0.99

مطابق جدول ۵ مقادیر محاسبه‌شده با روش تقسیم مقطع دارای میانگین خطای نسبی مثبت است و با توجه به شکل ۶ دبی را بیش از مقدار واقعی برآورد می‌نماید. با توجه به جدول ۵ رابطه پیشنهادی که ترکیبی از روش مقطع واحد و تقسیم مقطع است، نسبت به روش تقسیم مقطع دارای خطای ۴۵/۸ درصدی کمتری می‌باشد.

در شکل ۷ نتایج محاسبه دبی برای روش پیشنهادی، روش تقسیم مقطع و رابطه Yen 2 که دارای کمترین خطا در بین روابط مختلف بررسی شده روش مقطع واحد است، برای یک مقطع مرکب رودخانه‌ای (رودخانه سورن) نشان داده شده است. عرض و عمق مقطع اصلی این رودخانه به ترتیب ۱۷ و ۶ متر، عرض سیلاب‌دشت‌های سمت راست و چپ به ترتیب ۲۳ و ۶۳ متر، ضریب زبری مانینگ مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی نیز به ترتیب ۰/۰۳۰۷ و ۰/۰۳۳۸ می‌باشند.

جدول ۶ مقایسه روش‌های (Ervine et al., 2000)، روش تقسیم وزنی مقطع مرکب (Lambert and Myers, 1998)، روش بدون بعد اصلاح دبی (Haidera and Valentine, 2002; Hoseini, 2004)، روش تجزیه تبادلی (Huthoff et al., 2008) و روش پیشنهادی ارائه شده است.

چنانچه در جدول ۴ و شکل ۵ ملاحظه می‌شود، مقادیر محاسبه‌شده با روش مقطع واحد دارای میانگین خطای نسبی منفی هستند و دبی را کمتر از مقدار واقعی برآورد می‌کنند. Parsaie et al. (2016) علت این خطا را افزایش محیط مرطوب در مقایسه با سطح مرطوب در کانال‌های مرکب می‌دانند. همچنین جدول ۴ نشان می‌دهد که دبی برآورد شده توسط رابطه پیشنهادی پژوهش حاضر، میانگین قدر مطلق خطای نسبی را نسبت به روابط روش مقطع واحد بین ۲۷/۸ تا ۴۶/۴ درصد کاهش داده است.

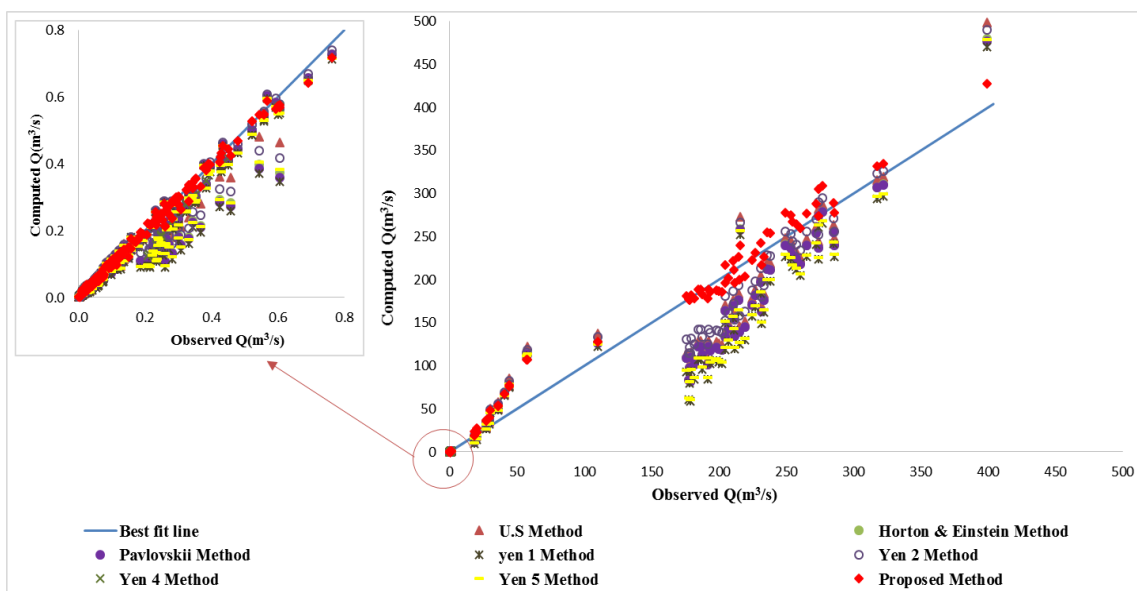


Fig. 5- Comparison of different relationships for flow calculation by single channel method with proposed method

شکل ۵- مقایسه روابط مختلف محاسبه دبی روش مقطع واحد با روش پیشنهادی

Table 4- Evaluation of different relationships in single channel method for estimating discharge in compound sections used.

جدول ۴- ارزیابی روابط مختلف روش مقطع واحد در تخمین دبی مقاطع مرکب مورد استفاده

Reference	%RMAE	%RME	RMSE	% δ^2	R2	Improved error %RMSE
Pavlovskii	17.2	-8.3	20.7	23.9	0.94	39.5
Horton and Einstein	16.9	-7.7	20.8	24.0	0.94	38.5
U.S	16.2	-4.4	19.5	22.15	0.94	35.8
Yen1	19.4	-11.9	25.3	29.5	0.81	46.4
Yen2	14.4	-3.0	15.7	17.9	0.96	27.8
Yen3	16.7	-7.3	20.8	24.0	0.82	37.7
Yen4	15.7	-5.0	17.5	19.9	0.95	33.8
Yen5	18.7	-10.4	27.7	28.9	0.92	44.4
Proposed Method	10.4	5.0	6.8	7.1	0.99	-

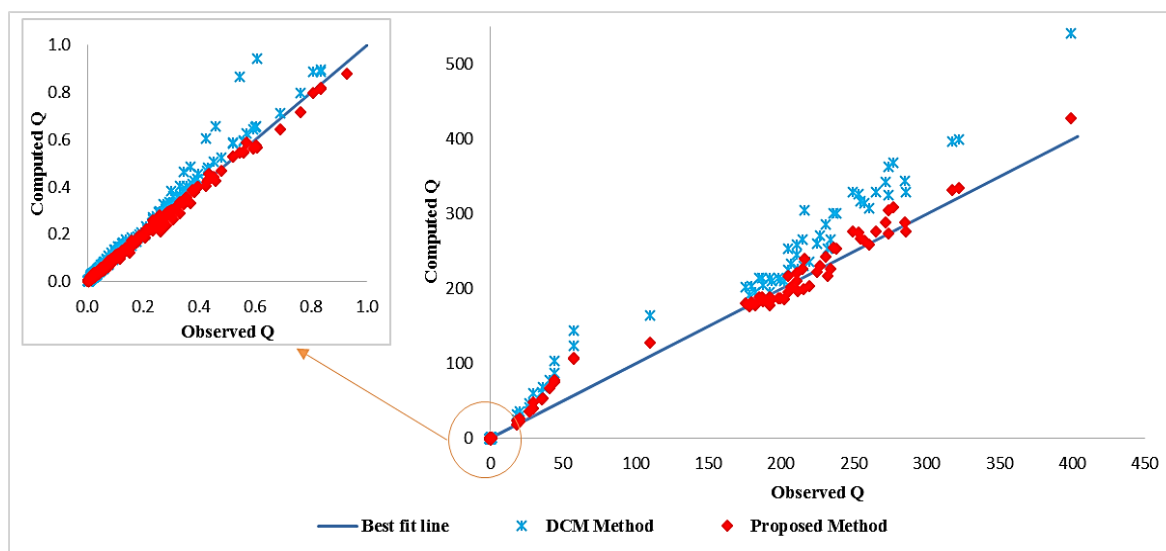


Fig. 6- Comparison of calculated discharge by divided channel method with proposed method

شکل ۶- مقایسه دبی محاسبه شده روش تقسیم مقطع با روش پیشنهادی

Fig. 5- Evaluation of divided channel method for estimating discharge in compound sections

جدول ۵- ارزیابی روش تقسیم مقطع در تخمین دبی مقاطع مرکب

Reference	%RMAE	%RME	RMSE	% δ^2	R2	Improved error %RMSE
DCM	19.2	17.7	19.7	22.3	0.98	45.8
Proposed Method	10.4	5.0	6.8	7.1	0.99	-

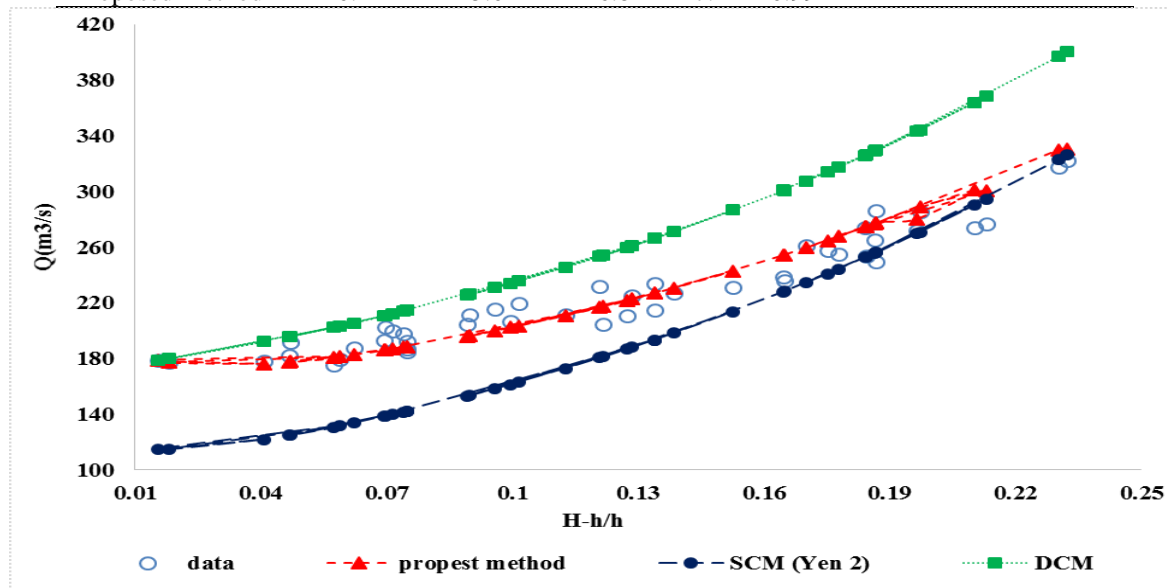


Fig. 7- Comparison and evaluation of the accuracy of the proposed method with DCM and SCM method (Yen 2 equation) in a river cross section

شکل ۷- ارزیابی و مقایسه دقت روش پیشنهادی با روش تقسیم مقطع و روش مقطع واحد (رابطه ین ۲) در یک مقطع رودخانه‌ای

گرفته است و به نوعی ترکیبی اصلاحی از این دو روش می‌باشد و هم‌خوانی بیشتری با داده‌های واقعی دارد.

همانطور که ملاحظه می‌شود مقدار دبی برآورد شده با روش پیشنهادی در حد فاصل دبی برآورد شده با روش مقطع واحد و تقسیم مقطع قرار

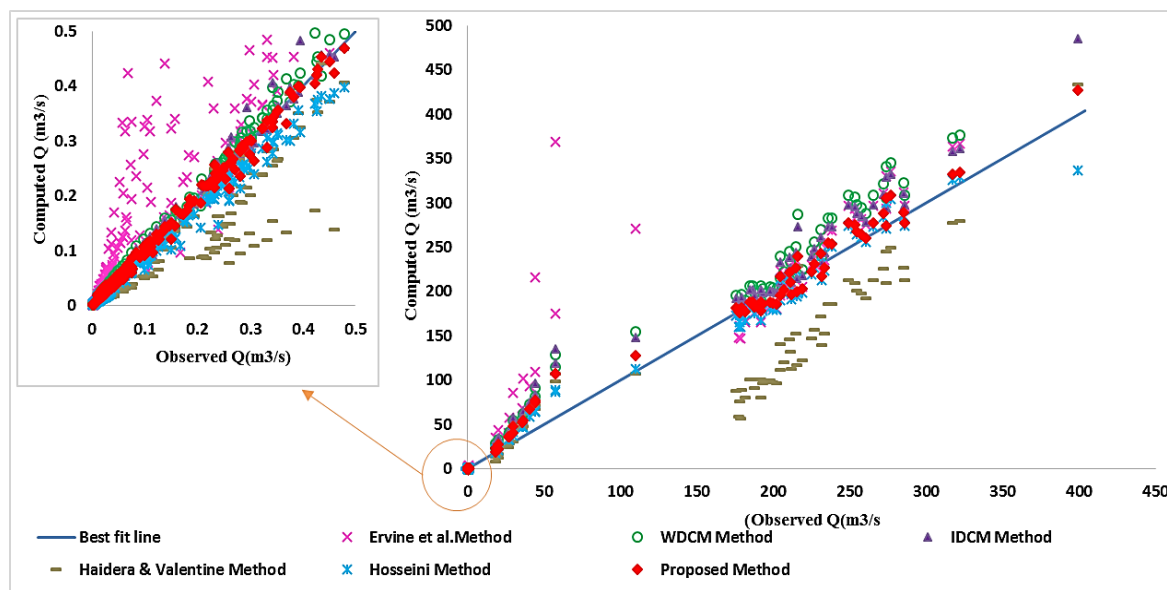


Fig. 8- Comparison of different methods calculation of discharge with proposed method

شکل ۸- مقایسه روش‌های مختلف محاسبه دبی با روش پیشنهادی

Table 6- Evaluation of different methods for estimating discharge in compound sections used

جدول ۶- ارزیابی روش‌های مختلف تخمین دبی در مقاطع مرکب مورد استفاده

Reference	%RMAE	%RME	RMSE	% δ^2	R2	Improved error %RMSE
Ervine et al.	72.8	67.5	90	3757.6	0.6	85.7
Haidera and Valentine	23.1	-19.3	28.5	33.9	0.92	55.0
WDCM	13.1	9.4	14.4	15.6	0.99	20.6
Hosseini	17.0	-9.5	6.5	7.1	0.99	33.8
IDCM	12.2	5.4	12.2	13.0	0.99	14.7
Proposed Method for WDCM Improvement	11.6	2.3	13.3	11.0	0.99	-
Proposed Method	10.4	5.0	6.8	7.1	0.99	-

۶- مراجع

Ackers P (1992) Hydraulic design of two-stage channels. Journal of Water and Maritime Engineering 96:247-257

Asgari A Mohammadi M Manafpur M (2011) Flow discharge and energy grade-line in compound channels. Water and Soil Science 21(1) (In Persian)

Atabay S, Knight DW (2006) 1-D Modelling of conveyance boundary shear and sediment transport in overbank flow. Journal of Hydraulic Research 44(6):739-754

Al-Khatib, IA Dweik AA, Gogus M (2012) Evaluation of separate channel methods for discharge computation in asymmetric compound channels. Flow Measurement and Instrumentation 24:19-25

Azamathulla HM, Zahiri A (2012) Flow discharge prediction in compound channels using linear genetic programming. Journal of Hydrology 454:203-207

Blalock ME, Sturm TW (1981) Minimum specific energy in compound open channel. Journal of the Hydraulics Division 107(6):699-717

Bousmar D, Zech Y (1999) Momentum transfer for practical flow computation in compound channels. Journal of Hydraulic Engineering 125(7):696-706

Bousmar D, Wilkin N, Jacquemart JH, Zech Y (2004) Overbank flow in symmetrically narrowing floodplains. Journal of Hydraulic Engineering 130(4):305-312

Clerc M, Kennedy J (2002) The particle swarm-explosion stability and convergence in a multidimensional complex space. IEEE transactions on Evolutionary Computation 6(1):58-73

Cox RG (1973) Effective hydraulic roughness for channels having bed roughness different from bank roughness: A State of the Art Report (No. AEWES-

چنانچه در جدول ۶ و شکل ۸ ملاحظه می‌شود روابطی که انتقال ممنتوم ایجاد شده را لحاظ نموده‌اند خطای کمتری داشته و مقادیر برآورد شده‌شان به مقادیر مشاهداتی نزدیک‌تر است. همچنین با توجه به جدول ۶ میزان خطای رابطه ۱۶ که شکل اصلاح شده روش تجزیه وزنی مقطع مرکب (WDCM) است، موجب کاهش میانگین درصد قدر مطلق خطای نسبی از ۱۳/۱ به ۱۱/۶ درصد یا به عبارتی کاهش ۱۱/۴ درصدی آن گردید.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش بر مبنای داده‌های آزمایشگاهی و رودخانه‌های با مقطع مرکب رابطه‌ای جدید با تلفیق روش مقطع واحد و روش تجزیه مقطع ارائه و با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات بهینه‌سازی شده است. بررسی‌ها و مقایسات انجام شده با سایر روش‌ها، نشان‌دهنده دقت بالاتر رابطه‌ی پیشنهادی برای داده‌های آزمایشگاهی و رودخانه‌ای است. بطوری‌که متوسط کاهش مقدار درصد میانگین قدر مطلق خطای نسبی و درصد میانگین خطای نسبی، نسبت به روش‌های بررسی شده به ترتیب ۳۸ و ۵۱ درصد می‌باشد.

۵- تشکر

از جناب آقای دکتر عبدالرضا ظهیری دانشیار محترم گروه مهندسی آب، سازه‌های آبی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان به دلیل در اختیار گذاشتن داده‌های مورد استفاده کمال تشکر و قدردانی را داریم.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Single Channel Method
- 2- Divided Channel Method
- 3- Weighted Divided Channel Method
- 4- Interacting Divided Channel Method

- Myers RC, Lyness JF (1997) Discharge ratios in smooth and rough compound channels. *Journal of Hydraulic Engineering* 123(3):182-188
- Martin L A, Myers WRC (1991) Measurement of overbank flow in a compound river channel. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers* 91(4):645-657
- Najafian Sh, Younesi H, Parsaei A, Torabi-Poudeh H (2017) Physical and numerical modeling of flow properties in prismatic compound open channel with heterogeneous roughness. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research* 18 (68):1-16 (In Persian)
- Parsaie A, Najafian S, Yonesi H (2016) Flow discharge estimation in compound open channel using theoretical approaches. *Sustainable Water Resources Management* 2(4):359-367
- Parsaie A, Yonesi H A, Najafian S (2015) Predictive modeling of discharge in compound open channel by support vector machine technique. *Modeling Earth Systems and Environment* 1(1-2)
- Pavlovskii NN (1931) K voprosu o raschetnoi dlia ravnornernogo dvizheniia v vodotokakh s neodnorodnymi stenkami. *Izvestiia Vsesoiuznogo Nauchno-Issledovatel'skogo Instituta Gidrotekhniki Trans All-Union Sci Res Inst Hydraulic Eng Leningrad* 3:157-164
- Parsaie A Haghiabi A (2015) The effect of predicting discharge coefficient by neural network on increasing the numerical modeling accuracy of flow over side weir. *Water Resources Management* 29(4):973-985
- Sahu M (2011) Prediction of flow and its resistance in compound open channel. *Master of Technology In Civil Engineering University of Rorkela*
- Sahu M, Khatua KK, Mahapatra SS (2011) A neural network approach for prediction of discharge in straight compound open channel flow. *Flow Measurement and Instrumentation* 22(5):438-446
- Sahu M, Mahapatra SS, Biswal KC, Khatua KK (2014) Prediction of flow resistance in a compound open channel. *Journal of Hydroinformatics* 16(1):19-32
- Tarrab L, Weber JF (2004) Transverse mixing coefficient prediction in natural channels. *Computational Mechanics* 13:1343-1355
- Wormleaton PR and Merrett DJ (1990) An improved method of calculation for steady uniform flow in prismatic main channel/flood plain sections. *Journal of Hydraulic Research* 28(2):157-174
- Misc-Paper-H-73-2). *Army Engineer Waterways Experiment Station Vicksburg*
- Das BS, Devi K, Khatua KK (2019) Prediction of discharge in converging and diverging compound channel by gene expression programming. *ISH Journal of Hydraulic Engineering* 1-11
- Eberhart R, Kennedy J (1995) A new optimizer using particle swarm theory. In *MHS'95 Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science* (pp. 39-43)
- Einstein HA (1934) *Der hydraulische oder profil-radius*. *Schweizerische Bauzeitung* 103(8):89-91
- Ervine DA, Babaeyan-Koopaei K, Sellin RH (2000) Two-dimensional solution for straight and meandering overbank flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 126(9):653-669
- Haidera MA, Valentine EM (2002) A practical method for predicting the total discharge in mobile and rigid boundary compound channels. *RiverFlow* 153-160
- Hosseini SM (2004) Equations for discharge calculation in compound channels having homogeneous roughness. *Iranian Journal of Science & Technology* 28(B5):537-546
- Horton RE (1933) Separate roughness coefficients for channel bottom and sides. *Engineering News Record* 111(22):652-653
- Huthoff F, Roos PC, Augustijn DC, Hulscher SJ (2008) Interacting divided channel method for compound channel flow. *Journal of Hydraulic Engineering* 134(8):1158-1165
- Knight DW, Demetriou JD (1983) Flood plain and main channel flow interaction. *Journal of Hydraulic Engineering* 109(8):1073-1092
- Knight DW, Sellin RHJ (1987) The SERC flood channel facility. *Water and Environment Journal* 1(2):198-204
- Knight DW Shiono K Pirt J (1989) Prediction of depth mean velocity and discharge in natural rivers with overbank flow. In *Proceedings of the International Conference on Hydraulic and Environmental Modelling of Coastal Estuarine and River Waters* 419-428 Gower Publishing
- Lambert M F, Myers WR (1998) Estimating the discharge capacity in straight compound channels. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Maritime and Energy* 130(2):84-94
- Liu W, James CS (2000) Estimation of discharge capacity in meandering compound channels using artificial neural networks. *Canadian Journal of Civil Engineering* 27(2):297-308

- Zahiri A, Dehghani AA (2009) Flow discharge determination in straight compound channels using ANN. World Academy of Science Engineering and Technology 58:12-15
- Zahiri A, Azamathulla HM (2014) Comparison between linear genetic programming and M5 tree models to predict flow discharge in compound channels. Neural Computing and Applications 24(2):413-420
- Yang K, Cao S, Liu X (2005) Study on resistance coefficient in compound channels. Acta Mechanica Sinica 21(4):353-361
- Yen BC (1992) Hydraulic resistance in open channels. Channel flow resistance-Centennial of Manning's Formula 1-135
- Zahiri A, Shabani MA (2018) Modeling of stage-discharge relationship in compound channels using multi-stage gene expression programming. Eco hydrology 5(1):37-48 (In Persian)