



دانشگاه گیلان، گروه مهندسی آب

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

جلد بیستم، شماره ششم، ۱۳۹۲

<http://jwsc.gau.ac.ir>

## ارزیابی روش مبتنی بر تئوری آنتروپی چپو در برآورد توزیع سرعت و پیش‌بینی دبی جریان در رودخانه‌ها

\*مهدی اسمعیلی‌ورکی<sup>۱</sup>، سبحان قربانی نصرالله‌آبادی<sup>۲</sup> و مریم نوابیان<sup>۳</sup>

استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه گیلان، دانشجوی کارشناسی ارشد گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی،

واحد تهران مرکزی، تهران، استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه گیلان

تاریخ دریافت: ۹۱/۳/۲۲؛ تاریخ پذیرش: ۹۱/۱۱/۳

### چکیده

تعیین معادله مناسب توزیع سرعت و پیش‌بینی دقیق دبی جریان در رودخانه‌ها به‌منظور برنامه‌ریزی، مدیریت و بهره‌برداری بهینه و پایدار منابع آب، مدیریت سیلاب، طراحی ایمن سازه‌های آبی و اجرای پروژه‌های آبخیزداری از اهمیت خاصی برخوردار است. روش معمول در اندازه‌گیری مستقیم دبی در رودخانه‌ها، روش‌های اندازه‌گیری چندنقطه‌ای سرعت جریان با استفاده از مولینه می‌باشد که به‌علت تعداد زیاد نقاط اندازه‌گیری در مقطع عرضی بسیار وقت‌گیر و پرهزینه بوده و گاهی اوقات در شرایط سیلابی امکان به‌کارگیری آن نمی‌باشد. بنابراین استفاده از روش‌هایی که ضمن دارا بودن دقت کافی، از نظر زمان موردنیاز نیز مقرون به صرفه باشد، بسیار سودمند می‌باشد. در این پژوهش با استفاده از اصل بیشترین آنتروپی و معادله توزیع سرعت چپو، توزیع سرعت و دبی جریان در چندین مقطع از رودخانه پسیخان واقع در استان گیلان طی سال‌های ۱۳۸۹-۱۳۹۰ برآورد شده و نتایج با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه گردید. نتایج به‌دست آمده نشان داد که مطابقت بسیار خوبی بین نتایج حاصل از روش چپو در برآورد توزیع سرعت و دبی جریان با مقادیر واقعی وجود دارد به‌گونه‌ای که مقدار  $R^2$ ، ۰/۹۹۶ و RMSE، ۳/۹ حاصل شد. بنابراین از این روش می‌تواند به‌عنوان روشی آسان و سریع، جایگزین روش‌های معمول در برآورد توزیع سرعت و اندازه‌گیری دبی جریان در رودخانه‌ها به‌خصوص در مواقع سیلابی گردد.

واژه‌های کلیدی: تئوری آنتروپی، روش چپو، توزیع سرعت، رودخانه پسیخان

\* مسئول مکاتبه: [Esmaeili.varaki@yahoo.com](mailto:Esmaeili.varaki@yahoo.com)

### مقدمه

توزیع قائم و عرضی سرعت در کانال‌های طبیعی تحت تأثیر هندسه کانال، پیچ و خم‌ها و ناهمواری‌های بستر می‌باشد. توزیع سرعت در برآورد پارامترهای هیدرولیکی همچون دبی جریان، تنش برشی و توزیع غلظت رسوب، برآورد دقیق مقدار سرعت متوسط و دبی جریان در طرح‌های کنترل سیلاب و انتقال آلاینده‌ها در آبراهه‌های طبیعی و مصنوعی دارای اهمیت زیادی می‌باشد (بویتن، ۲۰۰۳).

توزیع سرعت توانی و پرانتدل-ون کارمن، کاربردترین روش‌های توزیع سرعت در کانال‌ها می‌باشند. با وجود این، در بعضی مواقع که سرعت بیشترین زیر سطح آب رخ دهد، این دو مدل از توصیف آن ناتوان می‌باشند. همچنین معادلات نام‌برده قادر به برآورد توزیع عرضی سرعت نبوده و تنها برای کانال‌های عریض نتایج حاصل از آن‌ها قابل قبول است. از سوی دیگر این روابط در نزدیکی کف غیر معتبر می‌باشند (چانسون، ۲۰۰۴).

با توسعه تئوری‌های آنتروپی، این تئوری‌ها در طیف وسیعی از علوم از جمله هیدرولوژی، هیدرولیک و محیط‌زیست به کار گرفته شده‌اند. چيو (۱۹۸۷)، با استفاده از اصل بیشینه‌سازی آنتروپی و مفهوم احتمال، معادله توزیع سرعتی را ارائه نمود که این معادله قابلیت تعیین توزیع سرعت در هر دو جهت قائم و عرضی را دارا می‌باشد. همچنین این معادله در نزدیکی سطح آب نیز به خوبی عمل کرده و موقعیت سرعت بیشترین را پیش‌بینی می‌نماید. معادله ارائه شده توسط چيو به صورت معادله (۱) می‌باشد:

$$u = \frac{u_{\max}}{M} \ln \left[ 1 + (e^M - 1) \frac{\xi - \xi_0}{\xi_{\max} - \xi_0} \right] \quad (1)$$

که در آن  $u$ ، سرعت نقطه‌ای و  $u_{\max}$ ، سرعت بیشترین در یک مقطع مشخص می‌باشد.  $\xi$  مقدار مشخصی است که به هر خط هم‌سرعت نسبت داده می‌شود.  $\xi_0$ ، مقدار مینیمم  $\xi$  که در سطح بستر کانال رخ می‌دهد و همچنین خط هم‌سرعتی است که در آن  $u = 0$  است.  $\xi_{\max}$  مقدار  $\xi$  است هنگامی که سرعت  $u$  بیشترین است و  $M$ ، پارامتر آنتروپی می‌باشد.

برای جریان در کانال‌های باز، که در آن  $u_{\max}$  ممکن است در زیر سطح آب رخ دهد خطوط هم سرعت  $\xi$ ، توسط چپو و چایو (۱۹۸۶)، به صورت زیر ارائه شده است:

$$\xi = Y (1-Z)^{\beta_i} \exp(\beta_i Z - Y + 1) \quad (2)$$

خط مسیر عمود بر  $\xi$  که با  $\eta$  نمایش داده شده است، به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\eta = \pm \frac{1}{Z} (|1-Z|)^{\beta_i \left\{ \frac{(D+\delta_y-h)}{(B_i+\delta_i)} \right\}^2} \exp \left[ Z + \beta_i \left( \frac{D+\delta_y-h}{B_i+\delta_i} \right)^2 Y \right] \quad (3)$$

همچنین مقادیر  $Z$  و  $Y$  به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$Y = \frac{y + \delta_y}{D + \delta_y - h} \quad (4)$$

$$Z = \frac{|z|}{B_i + \delta_i} \quad (5)$$

که در آن‌ها  $y$  محور مختصات در جهت عمود بر بستر کانال در مکانی که سرعت بیشترین مقطع در آن رخ می‌دهد و نشان دهنده فاصله قائم از کف کانال است و  $z$  محور مختصات در راستای مقاطع (در جهت عرض مقطع) است که می‌تواند مقداری مثبت یا منفی، با توجه به موقعیت نقطه مورد بررسی نسبت به محور  $y$  داشته باشد.  $D$ ، عمق آب در محور  $y$  و  $B_i$  فاصله افقی محور  $y$  در سطح آزاد آب از ساحل سمت چپ ( $i=1$ ) یا راست ( $i=2$ ) مقطع عرضی کانال،  $h$ ، عمق وقوع سرعت بیشترین مقطع از سطح آب،  $\beta_i$ ، پارامتر و  $Z$  و  $Y$  شکل هندسی کانال را توصیف می‌نمایند. سیستم مختصات  $\eta-\xi$  و پارمترهای فوق در شکل ۱ نشان داده شده است.

برای توزیع سرعت یک بعدی بر روی محور  $y$  (محور عمودی که سرعت بیشترین در آن رخ می‌دهد)،  $\xi$  می‌تواند به صورت زیر نشان داده شود:

$$\xi = \frac{y}{D-h} \exp\left(1 - \frac{y}{D-h}\right) \quad (6)$$

با  $\xi$  تعریف شده در معادله (۶) برای توصیف توزیع سرعت یک بعدی، ۳ حالت رخ می‌دهد:  
 ۱- سرعت بیشترین  $u_{\max}$  در فاصله  $h$  ( $h > 0$ ) زیر سطح آب یا در همان  $y = D - h$  بالای سطح بستر رخ می‌دهد. در این حالت در معادله (۶)،  $\xi_{\max} = 1$  شده و معادله (۱) با  $\xi_0 = 0$  به شکل زیر در خواهد آمد (چیو، ۱۹۸۸):

$$u = \frac{u_{\max}}{M} \ln \left[ 1 + (e^M - 1) \frac{y}{D-h} \exp\left(1 - \frac{y}{D-h}\right) \right] \quad (۷)$$

۲- سرعت بیشترین بر روی سطح آب رخ داده و  $h = 0$  می‌باشد. بنابراین  $\xi_{\max} = 1$  شده و معادله (۷) به صورت زیر می‌شود:

$$u = \frac{u_{\max}}{M} \ln \left[ 1 + (e^M - 1) \frac{y}{D} \exp\left(1 - \frac{y}{D}\right) \right] \quad (۸)$$

معادله (۸) در سطح آب  $du/dy$  را برابر صفر نتیجه می‌دهد، از این رو می‌تواند منحنی سرعت را به‌طور عمود بر سطح آب نشان دهد.

۳- سرعت بیشترین بالای سطح آب رخ می‌دهد و  $h < 0$  ( $du/dy > 0$ ). در این حالت  $h$  دیگر معنای فیزیکی اشاره شده را ندارد و تنها یک ضریب است که برای تنظیم دقیق انحنای توزیع سرعت به‌کار می‌رود. در این حالت بیشترین مقدار  $\xi$  برابر است با:

$$\xi_{\max} = \frac{D}{D-h} \exp\left(1 - \frac{D}{D-h}\right) \quad (۹)$$

بنابراین معادله (۸) به صورت زیر می‌شود:

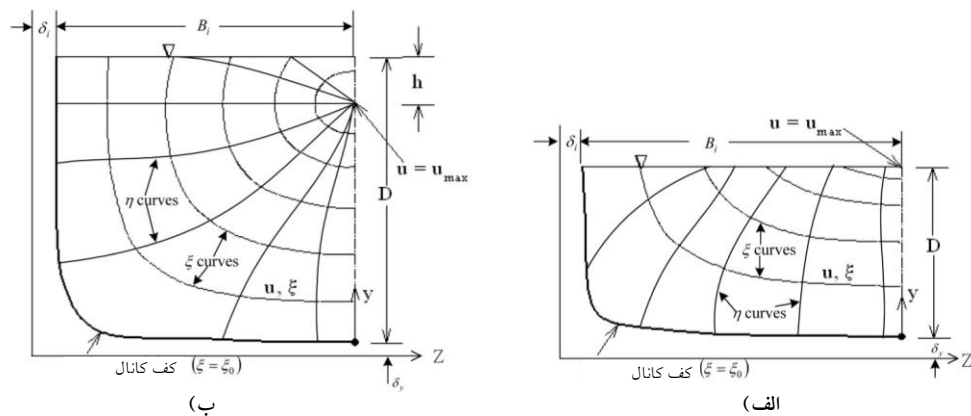
$$u = \frac{u_{\max}}{M} \ln \left[ 1 + (e^M - 1) \frac{y}{D} \exp\left(\frac{D-y}{D-h}\right) \right] \quad (۱۰)$$

هنگامی که  $h$  به سمت منفی بینهایت میل می‌کند، معادله (۱۰) به صورت معادله (۱۱) تبدیل خواهد شد:

$$u = \frac{u_{\max}}{M} \ln \left[ 1 + (e^M - 1) \frac{y}{D} \right] \quad (11)$$

معادله (۱۱) توزیع سرعت را در یک کانال باز عریض توصیف می‌نماید. بر مبنای معادله سرعت چپو، رابطه زیر بین سرعت متوسط و بیشترین مقطع برقرار است:

$$\frac{\bar{u}}{u_{\max}} = \Phi = \frac{e^M}{e^M - 1} - \frac{1}{M} \quad (12)$$



شکل ۱- الگوی سرعت در مختصات منحنی الخط الف) وقوع سرعت بیشترین در سطح آب و ب) وقوع سرعت بیشترین در زیر سطح آب.

رابطه فوق بیانگر آن است که نسبت بین سرعت متوسط و بیشترین در یک مقطع مقدار ثابتی است و این مقدار ثابت سیستم جریان را در یک مقطع معین توصیف می‌نماید. بر طبق نظریه چپو این مطلب یک قانون طبیعی است و مقاطع مختلف دارای نسبت‌های متفاوتی می‌باشند. تمامی عوامل سیستم جریان همچون شیب انرژی و زبری کانال در یک مقطع عرضی بر توزیع سرعت تأثیرگذار هستند. تعدیل هر کدام از این عوامل می‌تواند توزیع سرعت را تغییر دهد تا این که نسبت فوق ثابت بماند. بنابراین با چندین بار اندازه‌گیری سرعت در شرایط مختلف جریان و تحت دبی‌های مختلف،  $M$  و

$\Phi$  مقطع محاسبه شده و با استفاده از معادله توزیع سرعت چپو و به کمک  $M$  و  $\Phi$  به دست آمده مقطع، توزیع سرعت در عرض مقطع به دست می‌آیند. همچنین با توجه به این که مکان سرعت بیشترین در عرض مقطع تحت شرایط مختلف جریان تقریباً ثابت است و تغییر چندانی نمی‌نماید (چپو و چن، ۲۰۰۳)، بنابراین برای پیش‌بینی سرعت متوسط و دبی جریان در کل مقطع کافی است یک اندازه‌گیری نیم‌رخ سرعت در محل سرعت بیشترین مقطع که مکان آن طی اندازه‌گیری‌های قبلی صورت گرفته مشخص شده است، صورت گیرد. با مشخص شدن سرعت بیشترین در این نیم‌رخ و با ضرب آن در مقدار  $\Phi$  مقطع، سرعت متوسط مقطع پیش‌بینی می‌گردد و با ضرب این مقدار در مساحت مقطع نیز دبی جریان برآورد می‌شود.

چپو و سعید (۱۹۹۵)، با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و صحرایی به مقایسه دبی‌های اندازه‌گیری شده و تخمینی از روش چپو (۱۹۸۸) پرداختند. مقایسه نتایج بیانگر دقت مناسب این روش بود. چن (۱۹۹۸)، به بررسی روش چپو در اندازه‌گیری سرعت متوسط و دبی مقطع در رودخانه‌های ماسه‌ای میدل لوب و دیسمال در نبراسکا آمریکا پرداخت. نتایج این پژوهش نشان داد که یک مقطع مشخص از یک رودخانه ماسه‌ای تمایل به ایجاد و برقراری یک وضعیت متعادل متناظر با پارامترهای آنتروی ( $\phi$  یا  $M$ ) دارد که این پارامتر با گذشت زمان، تغییرات دبی، شیب، شکل هندسی و عمق آب ثابت می‌ماند. کارلوس و همکاران (۱۹۹۸)، معادلاتی در سیستم منحنی‌الخط برای هندسه مقطع عرضی استخراج و با ترکیب آن با معادله توزیع سرعت چپو به بررسی صحت و دقت روش چپو در برآورد نیم‌رخ سرعت و مقایسه با روش لگاریتمی پرداختند. ارزیابی‌های صورت گرفته نشان دهنده دقت قابل قبول این روش بود. چپو و همکاران (۲۰۰۰) دقت معادله سرعت چپو را در برآورد نیم‌رخ سرعت در نزدیکی بستر و در دو حالت آب زلال و گل آلود (همراه با انتقال رسوبات) در یک کانال آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند و نتایج را با نیم‌رخ سرعت لگاریتمی مقایسه نمودند. نتایج آزمایشات صورت گرفته بیانگر این مطلب بود که توزیع سرعت چپو همانند معادله توزیع سرعت پرانتدل-ون کارمن قادر به برآورد مناسبی از نیم‌رخ سرعت در نزدیکی بستر می‌باشد. مورومارکو و همکاران (۲۰۰۴)، به بررسی قابلیت این روش در برآورد سرعت متوسط در رودخانه‌ها پرداختند. نتایج حاصل نشان داد که خطای ایجاد شده در برآورد سرعت متوسط کمتر از ۰/۱ درصد می‌باشد. اماری و رمینی (۲۰۱۰)، به بررسی تعیین دبی به کمک معادله چپو در رودخانه‌های کشور الجزایر پرداختند. مقایسه نتایج نشان داد که این روش از دقت قابل قبولی در برآورد دبی جریان برخوردار

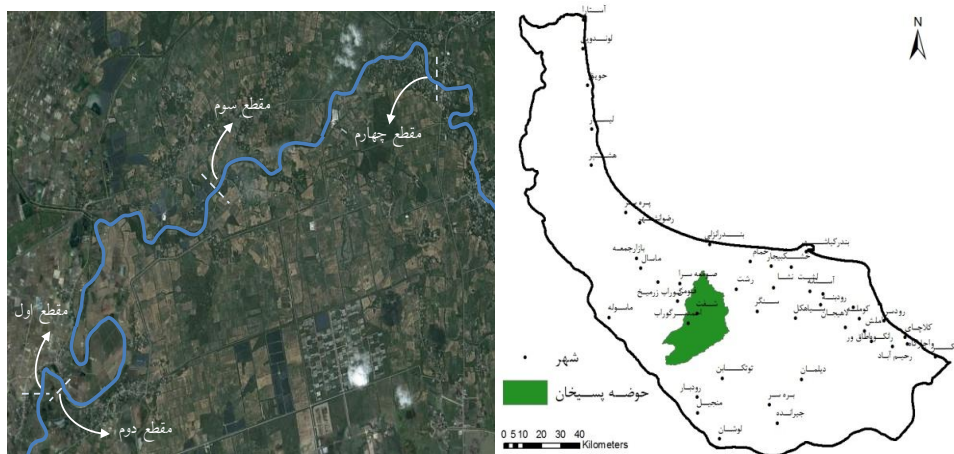
می‌باشد. آردیکلیگو و همکاران (۲۰۱۲)، دقت و صحت معادله چپو در پیش‌بینی نیم‌رخ سرعت و مقایسه آن با مقادیر اندازه‌گیری شده در رودخانه‌های ساریمسالکی و کیزیلیرماک کشور ترکیه را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان داد معادله چپو برآورد مناسبی از نیم‌رخ سرعت در این مقاطع دارد. متوسط خطای پیش‌بینی سرعت نقطه‌ای توسط معادله چپو با مقادیر اندازه‌گیری شده در رودخانه مورد مطالعه ۱۴/۷ درصد گزارش گردید.

از آن‌جا که در پژوهش‌های انجام شده درخصوص کارایی روش چپو، مقایسه‌ها در قالب مقایسه سرعت متوسط و دبی به‌عمل آمده و به وضعیت تغییرات سایر پارامترهای اثرگذار کمتر اشاره شده است، در این پژوهش نیز ضمن بررسی کارایی این روش در برآورد توزیع سرعت جریان در محل وقوع سرعت بیشترین و سایر مقاطع عمودی، مقدار متوسط سرعت و دبی در چهار مقطع انتخابی در رودخانه پسیخان، وضعیت پارامترهای آنتروپی در مقاطع مختلف رودخانه مورد مطالعه قرار گرفته است.

### مواد و روش‌ها

**مشخصات محدوده مورد مطالعه:** رودخانه پسیخان بین مختصات ۴۹ درجه و ۷۰ دقیقه الی ۴۹ درجه و ۳۳ دقیقه طول شرقی و ۳۶ درجه و ۵۳ دقیقه الی ۳۷ درجه و ۱۱ دقیقه عرض شمالی واقع شده است. این رودخانه یکی از رودخانه‌های مستقل حوضه آبریز خزر می‌باشد و به زیر حوضه مرداب انزلی تعلق دارد. طول این رودخانه ۶۶ کیلومتر بوده و وسعت حوضه آبریز آن ۸۴۰ کیلومتر مربع می‌باشد. متوسط بارندگی در حوضه آبریز رودخانه پسیخان ۱۰۴۰/۶ میلی‌متر گزارش شده است. بازه مورد مطالعه از این رودخانه بازه منتهی به تالاب می‌باشد. شیب عمومی دشت در این منطقه ۰/۰۰۱ و متوسط ضریب پیچشی ۱/۱۹ می‌باشد. این رودخانه از نظر تداوم جریان، دائمی است و از نظر زمین‌شناسی در زمره رودخانه‌های بالغ محسوب می‌شود (شکل ۲).

**مشخصات مقاطع انتخابی و نحوه اندازه‌گیری سرعت جریان:** به‌منظور بررسی وضعیت رودخانه و تعیین مقاطع مناسب برای اندازه‌گیری سرعت نقطه‌ای و دبی جریان، پیمایش صحرائی و بازدید محلی در طول مسیر رودخانه انجام و در نهایت تعداد ۴ مقطع با فاصله مناسب از یکدیگر انتخاب گردیدند. در شکل ۲ جانمایی مقاطع انتخابی رودخانه پسیخان و در شکل ۳ نیز نمایی از مقاطع عرضی و مکان سرعت بیشترین در هر مقطع نشان داده شده است.



شکل ۲- جانمایی حوضه آبریز رودخانه پسیخان و مقاطع انتخابی برای اندازه‌گیری سرعت جریان.

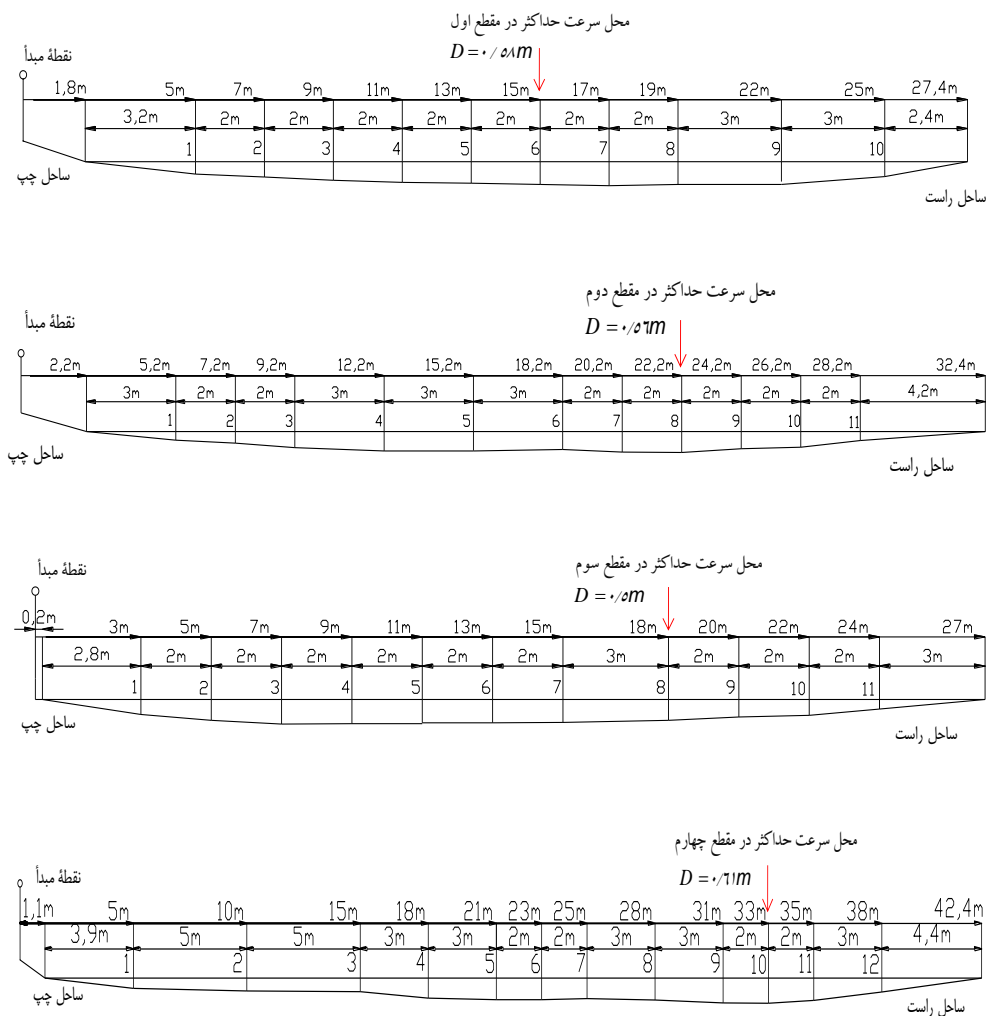
برای اندازه‌گیری نیم‌رخ سرعت واقعی، باتوجه به تغییرات عمق و سرعت در هر مقطع عرضی، تعداد ۷ تا ۱۲ نیم‌رخ قائم سرعت اندازه‌گیری شد. در این پژوهش برای اندازه‌گیری سرعت‌های نقطه‌ای جریان از سرعت‌سنج پروانه‌ای استفاده شد. جهت ارزیابی مناسب روش‌های یاد شده، سعی گردید که اندازه‌گیری‌ها برای دامنه نسبتاً وسیعی از عمق جریان انجام شود. در مجموع تعداد ۹ سری اندازه‌گیری برای هر یک از چهار مقطع انتخابی انجام شد که از آن میان، داده‌های ۶ سری برای تعیین  $M$  و  $\Phi$  مقاطع مورد استفاده قرار گرفته و داده‌های ۳ سری دیگر برای ارزیابی دقت روش چپو در پیش‌بینی توزیع سرعت و دبی جریان در رودخانه مورد مطالعه به‌کار گرفته شد. در شکل ۴ نمایی از مقاطع انتخابی رودخانه پسیخان و نحوه اندازه‌گیری سرعت توسط سرعت‌سنج پروانه‌ای نشان داده شده است. در جدول ۱، دامنه پارامترهای اندازه‌گیری شده ارائه شده است.

جدول ۱- دامنه پارامترهای اندازه‌گیری شده.

حداقل						حداکثر						شماره
X/T	$n_v$	n	$D_y (m)$	$u_{max} (m/s)$	Q	X/T	$n_v$	n	$D_y (m)$	$u_{max} (m/s)$	Q	مقطع
۰/۴۴	۲۷	۷	۰/۲۵	۰/۵	۰/۶۸	۰/۷۲	۹۶	۱۱	۰/۷	۰/۸۱	۶/۸	۱
۰/۶۶	۲۶	۸	۰/۲۲	۰/۴۵	۰/۸۲	۰/۷۵	۱۰۵	۱۱	۰/۵۶	۰/۶۹	۷/۲	۲
۰/۲۲	۳۲	۸	۰/۲۱	۰/۳۶	۰/۸۵	۰/۶۷	۹۷	۱۱	۰/۷	۰/۷۹	۶/۹	۳
۰/۶۷	۴۰	۸	۰/۳۶	۰/۳۹	۱/۳۵	۰/۸۲	۱۳۱	۱۲	۰/۸۲	۰/۵۷	۸/۸	۴



در این جدول بیشترین سرعت در مقطع عرضی،  $D_v$  (m)، عمق جریان در محل وقوع بیشترین سرعت،  $n$  تعداد مقاطع عمودی،  $n_v$  تعداد نقاط اندازه‌گیری سرعت نقطه‌ای در کل مقطع عرضی،  $X/T$ ، نسبت فاصله محل وقوع بیشترین از ساحل چپ رودخانه به عرض سطح آزاد جریان، می‌باشد.



شکل ۳- جانمایی مقاطع عرضی انتخابی رودخانه پسیخان، مقاطع عمودی اندازه‌گیری نیم‌رخ سرعت و محل سرعت بیشترین در هر مقطع.



شکل ۴- نمایی از مقاطع انتخابی رودخانهٔ پسیخان و نحوهٔ اندازه‌گیری سرعت توسط سرعت‌سنج پروانه‌ای.

### تجزیه و تحلیل نتایج

همان‌طور که ذکر شد، روش‌های یک تا ۵ نقطه‌ای متداول‌ترین روش اندازه‌گیری سرعت متوسط و دبی جریان در مجاری روباز می‌باشند. از این‌رو به‌منظور بررسی دقت روش‌های نام‌برده در اندازه‌گیری سرعت متوسط در نیم‌رخ قائم و در نتیجه دبی جریان در کل مقطع، ابتدا سرعت‌های متوسط جریان در هر نیم‌رخ قائم توسط روش‌های گرافیکی، یک نقطه‌ای، دو نقطه‌ای، سه نقطه‌ای، پنج نقطه‌ای و لگاریتمی تعیین شدند. سپس سرعت متوسط و در نهایت دبی کل جریان در هر مقطع توسط روش مقطع متوسط برای هر یک از روش‌های فوق و برای ۶ سری اندازه‌گیری در چهار مقطع انتخابی در رودخانه مورد مطالعه محاسبه گردید. به‌دلیل دقت بالای روش گرافیکی این روش به‌عنوان مبنای مقایسه مورد استفاده قرار گرفت.

جهت مقایسه نتایج با دبی‌های واقعی که از روش گرافیکی محاسبه گردید، از آماره‌های ضریب تبیین ( $R^2$ )، مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) و درصد خطای نسبی (ER) استفاده شد که روابط ریاضی آن‌ها به شرح زیر می‌باشد:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{Est} - Q_a)^2}{n}} \quad (13)$$

$$ER = \frac{|Q_{Est} - Q_a|}{Q_a} \times 100 \quad (14)$$

که در آن  $Q_{Est}$  دبی تخمین زده شده و  $Q_a$  دبی واقعی می‌باشد.

در جدول (۲) نتایج مقایسه‌های انجام شده بین روش‌های یک نقطه‌ای، دو نقطه‌ای، سه نقطه‌ای، پنج نقطه‌ای و لگاریتمی با روش گرافیکی نشان داده شده است. بررسی نتایج جدول (۲) نشان داد که از میان روش‌های به‌کار گرفته شده، روش پنج نقطه‌ای و لگاریتمی به ترتیب با متوسط خطای نسبی  $3/4$  و  $5/3$  درصد دارای کمترین و بیشترین خطا می‌باشند. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، روش‌های یک نقطه‌ای و دو نقطه‌ای که جزء روش‌های متداول و سریع‌تر در اندازه‌گیری دبی جریان در آبراه‌ها می‌باشند، دارای متوسط خطای  $4$  و  $4/2$  درصد می‌باشند. همچنین نتایج بیانگر کارایی مناسب و دقت بالای روش پنج نقطه‌ای در اندازه‌گیری سرعت جریان در رودخانه‌ها می‌باشد، ولی با توجه به این‌که در این روش تعداد نقاط اندازه‌گیری زیاد بوده و نیاز به زمان زیاد جهت اندازه‌گیری دبی جریان می‌باشد، می‌توان از روش‌های یک نقطه‌ای و دو نقطه‌ای که دقت نسبتاً مناسبی دارند برای اندازه‌گیری سریع سرعت جریان و محاسبه دبی استفاده نمود.

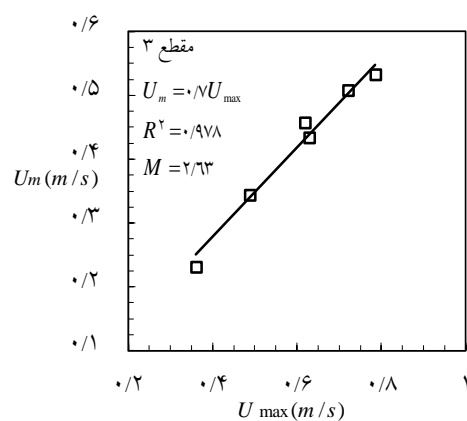
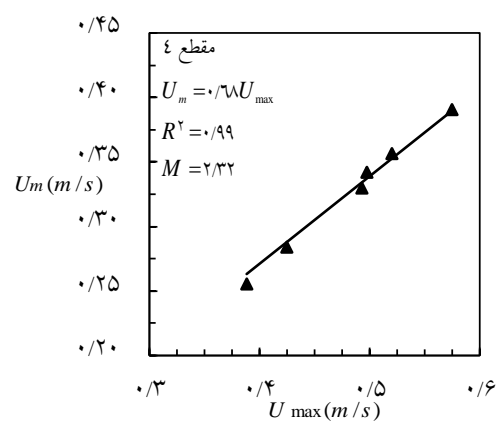
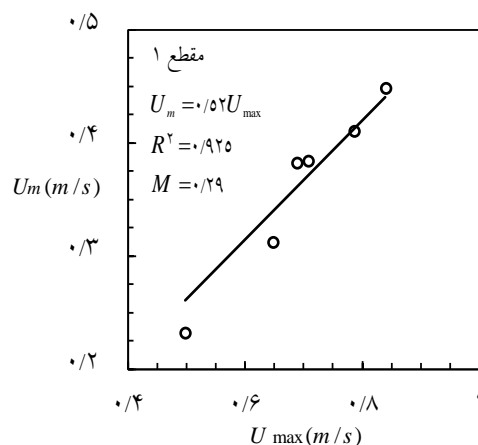
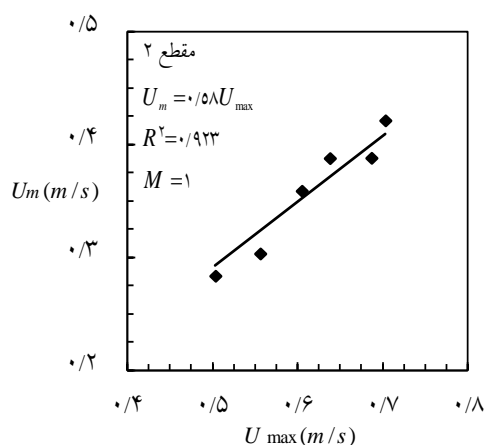
به منظور ارزیابی دقت روش چپو در برآورد نیم‌رخ سرعت جریان، در ابتدا پارامترهای  $\phi$  و  $M$  در هر مقطع تعیین شد. به این ترتیب که با استفاده از داده‌های نیم‌رخ سرعت اندازه‌گیری شده در  $4$  مقطع رودخانهٔ پسیخان و برای  $6$  سری داده به دست آمده، سرعت بیشترین مقطع مشخص گردید. سپس سرعت متوسط مقطع از روش گرافیکی و به کمک روش مقطع متوسط به دست آمد. به این صورت که ابتدا منحنی تغییرات سرعت در مقابل عمق ترسیم و سپس با محاسبه مساحت سطح زیر منحنی، مقدار متوسط تعیین گردید.

با رسم نمودار سرعت متوسط - سرعت حداکثر برای هر مقطع و ترسیم خط رگرسیون مربوطه، مشخص گردید که در تمامی مقاطع رابطه خطی بین سرعت حداکثر و متوسط برقرار بوده و نسبت بین سرعت حداکثر و سرعت متوسط مقداری ثابت است. همان‌طور که قبلاً ذکر شد، این مقدار ثابت  $(\phi)$ ، همان شیب خط رگرسیونی به دست آمده می‌باشد.

شکل ۵ نمودار سرعت متوسط - سرعت حداکثر را برای  $4$  مقطع انتخابی در رودخانهٔ پسیخان نشان می‌دهد. مقادیر پارامتر آنتروپی  $M$  به دست آمده برای هر مقطع نیز در شکل نشان ارائه شد. مقادیر بالای  $R^2$  به دست آمده در هر مقطع برای پارامتر آنتروپی نشانگر همبستگی بالای داده‌ها و ثابت بودن  $\phi$  و  $M$  در هر یک از مقاطع انتخابی برای شرایط مختلف دبی و عمق جریان در رودخانه می‌باشد.

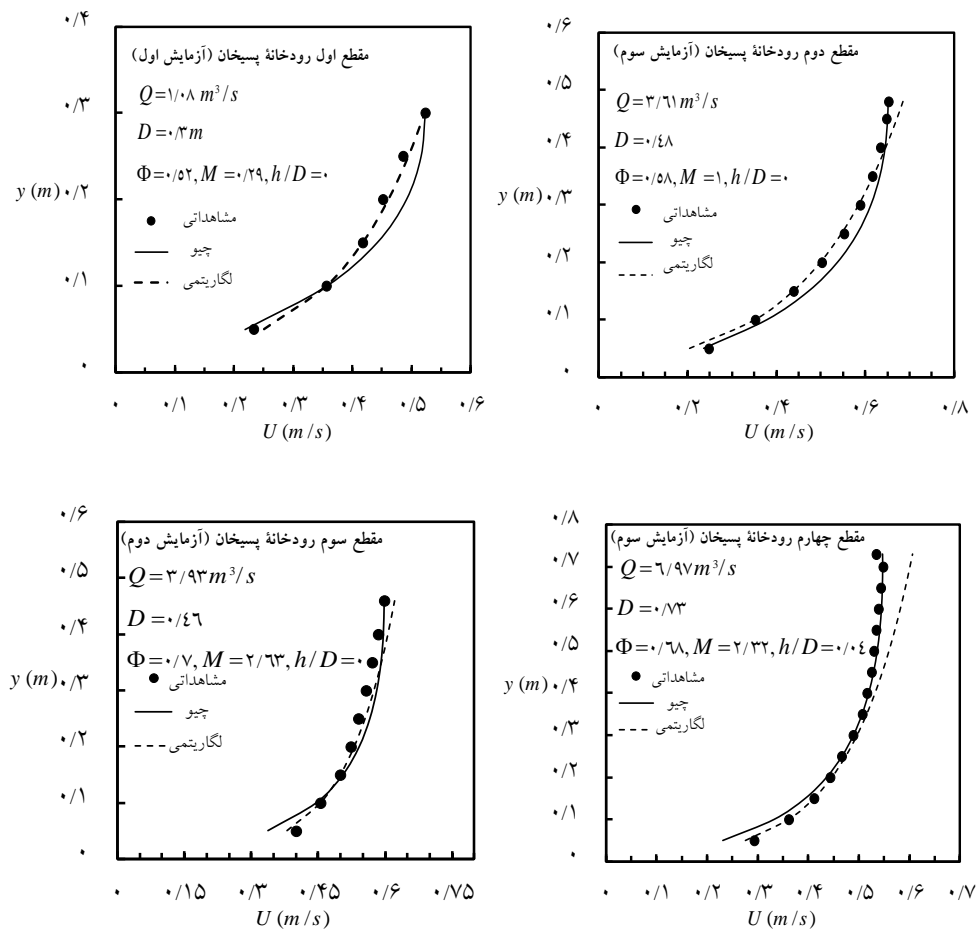
جدول ۲- ارزیابی دقت روش‌های مختلف در برآورد دبی جریان.

شمارهٔ مقطع	روش یک نقطه‌ای			روش دو نقطه‌ای			روش سه نقطه‌ای			روش پنج نقطه‌ای			روش لگاریتمی		
	ER	RMSE	R <sup>2</sup>	ER	RMSE	R <sup>2</sup>	ER	RMSE	R <sup>2</sup>	ER	RMSE	R <sup>2</sup>	ER	RMSE	R <sup>2</sup>
۱	۲/۵	۰/۱۵	۰/۹۹۸	۳/۸	۰/۱۵	۰/۹۹۸	۳/۸	۰/۱۳	۰/۹۹۸	۳/۸	۰/۱۳	۰/۹۹۸	۲/۸	۰/۲۳	۰/۹۹۴
۲	۲/۳	۰/۱۵	۰/۹۹۸	۳/۲	۰/۱۴	۰/۹۹۸	۳/۲	۰/۱۴	۰/۹۹۸	۳/۱	۰/۱۴	۰/۹۹۸	۵/۸	۰/۲۸	۰/۹۹۹
۳	۶/۹	۰/۵۵	۰/۹۸۷	۵/۲	۰/۳۸	۰/۹۸۷	۵/۲	۰/۴۶	۰/۹۸۲	۶	۰/۴۶	۰/۹۸۲	۷/۸	۰/۶۲	۰/۹۸۹
۴	۵/۲	۰/۲۷	۰/۹۹۸	۴	۰/۲۱	۰/۹۹۸	۴	۰/۲۴	۰/۹۹۸	۴/۶	۰/۲۴	۰/۹۹۸	۴/۹	۰/۲۵	۰/۹۹۵
میانگین	۴/۲	۰/۲۸	۰/۹۹۵	۴	۰/۲۲	۰/۹۹۵	۴	۰/۲۴	۰/۹۹۴	۴/۲	۰/۲۴	۰/۹۹۴	۵/۳	۰/۳۵	۰/۹۹۴



شکل ۵- نمودار سرعت متوسط- سرعت حداکثر برای ۴ مقطع انتخابی رودخانهٔ پسیخان.

با به‌کارگیری مقادیر به‌دست آمده  $M$  و با استفاده از معادله توزیع سرعت چپو، نیم‌رخ‌های قائم سرعت مربوطه در محل سرعت حداکثر و نیز نیم‌رخ‌های مجاور آن جهت ارزیابی دقت آن در برآورد توزیع سرعت، رسم شدند. در شکل ۶ تعداد ۴ نمونه نیم‌رخ سرعت چپو به همراه توزیع لگاریتمی سرعت متناظر با آن به همراه مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده در ۴ مقطع انتخابی و در طی ۳ دوره اندازه‌گیری نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، در مواقعی که سرعت حداکثر در زیر سطح آب رخ می‌دهد، توزیع سرعت لگاریتمی در نزدیکی سطح آب منحرف می‌شود، اما معادله توزیع سرعت چپو تطابق بسیار خوبی با نیم‌رخ سرعت واقعی نشان می‌دهد.

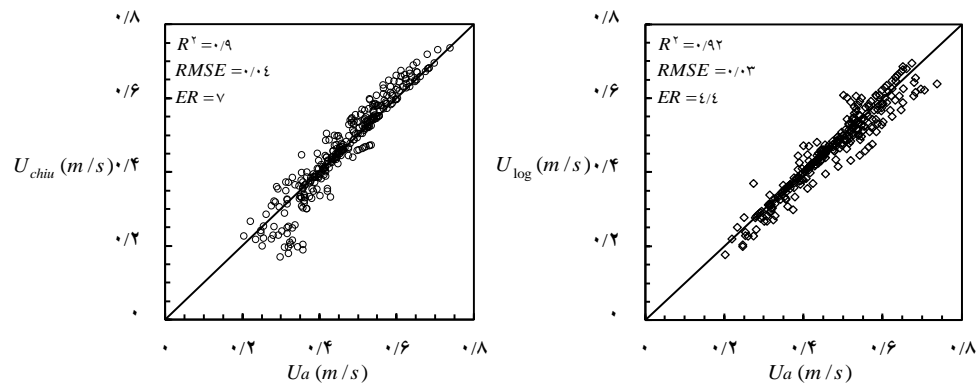


شکل ۶- مقایسه نیم‌رخ‌های سرعت چپو و لگاریتمی به همراه مقادیر اندازه‌گیری شده.

به منظور ارزیابی روش چپو در برآورد توزیع سرعت، نتایج روش‌های چپو و لگاریتمی با مقادیر اندازه‌گیری شده سرعت نقطه‌ای واقع در نیم‌رخ‌های قائم در محل سرعت حداکثر مقطع و در نیم‌رخ‌های طرفین، از آماره‌های مجذور میانگین مربعات و خطای نسبی (به درصد) استفاده شد که نتایج حاصله در جدول ۳ و شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، روش چپو علی‌رغم نیاز به اطلاعات کمتر (سرعت حداکثر در نیم‌رخ سرعت) برای برآورد توزیع سرعت در عمق جریان، دارای دقت قابل قبول در مقایسه با روش لگاریتمی که نیاز به اطلاعات بیشتری برای برآورد توزیع سرعت دارد، می‌باشد. همچنین به منظور ارزیابی دقت روش چپو در برآورد توزیع سرعت در سایر مقاطع عمودی در یک مقطع عرضی (تنها با استفاده از سرعت حداکثر)، نتایج مربوط به ارزیابی آماره‌ها برای نیم‌رخ سرعت در طرفین محل سرعت حداکثر محاسبه گردید. همان‌طور که در جدول ۳ نشان داده شده است، دقت این روش برای برآورد سایر نیم‌رخ‌های سرعت در یک مقطع عرضی نیز مناسب می‌باشد.

جدول ۳- مقایسه آماری روش چپو و لگاریتمی در برآورد نیم‌رخ سرعت در مقادیر اندازه‌گیری شده در رودخانه پسیخان.

شماره مقطع	روش چپو در محل سرعت حداکثر		روش چپو در طرفین محل سرعت حداکثر		روش لگاریتمی در محل سرعت حداکثر		روش لگاریتمی در طرفین محل سرعت حداکثر	
	RMSE	ER	RMSE	ER	RMSE	ER	RMSE	ER
۱	۰/۰۴	۷/۹	۰/۰۶	۱۰/۸	۰/۰۳	۴/۴	۰/۰۳	۳/۸
۲	۰/۰۴	۸	۰/۰۴	۷/۶	۰/۰۳	۴/۷	۰/۰۳	۶/۲
۳	۰/۰۴	۸	۰/۰۳	۶/۶	۰/۰۲	۳/۶	۰/۰۳	۴/۴
۴	۰/۰۲	۳/۳	۰/۰۳	۴/۵	۰/۰۳	۴/۴	۰/۰۲	۳/۶

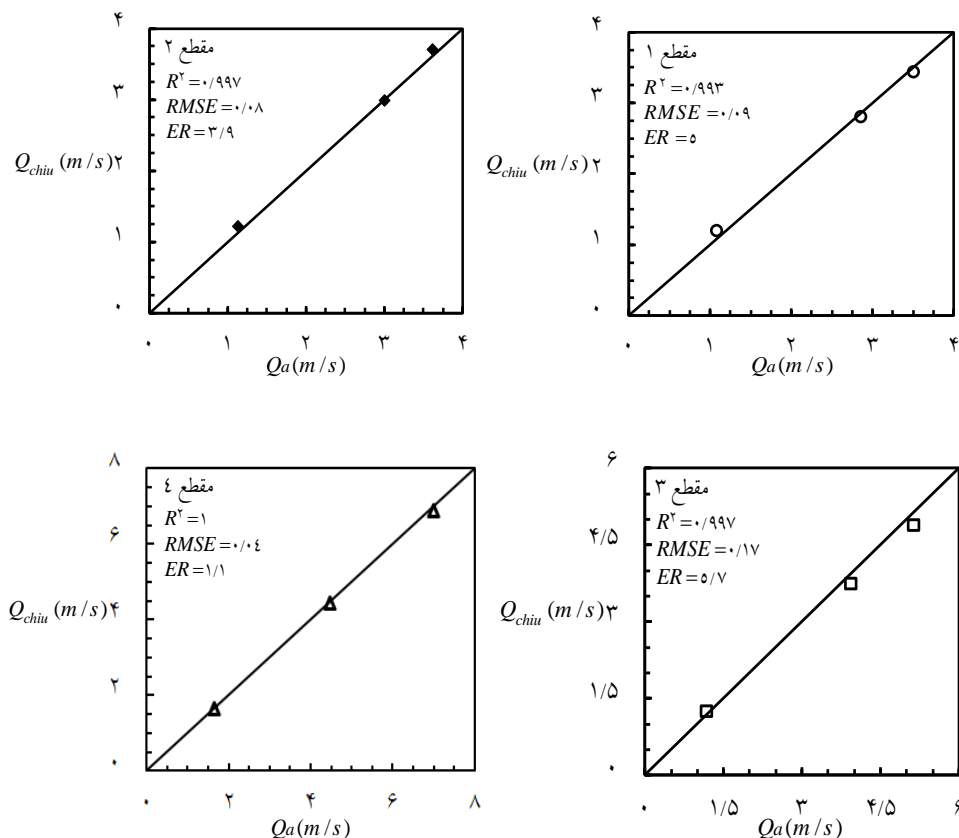


شکل ۷- نمودار سرعت نقطه‌ای محاسبه شده توسط روش چپو و لگاریتمی نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده در کلیه مقطع انتخابی رودخانه پسیخان.

برای ارزیابی پیش‌بینی دبی جریان توسط روش چپو، از داده‌های مربوط به ۳ دوره اندازه‌گیری استفاده شد. برای این منظور مقادیر  $\Phi$  به‌دست آمده برای هر مقطع در مرحله قبل در مقادیر سرعت حداکثر متناظر ضرب شده و سرعت متوسط کل مقطع به‌دست آمد و در نهایت با ضرب سرعت متوسط به‌دست آمده در مساحت کل مقطع دبی جریان عبوری از مقطع در هر ۳ سری اندازه‌گیری محاسبه گردید. در شکل ۸ و جدول ۴ نتایج مقایسه‌های به‌عمل نشان داده شده است. در این اشکال  $Q_a$  دبی جریان حاصله از روش گرافیکی می‌باشد. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد روش چپو ضریب همگرایی بالایی با مقادیر واقعی داشته و دارای متوسط خطای نسبی قابل قبولی برابر با ۳/۹ نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشد. بنابراین می‌توان از این روش با اطمینان قابل قبولی در اندازه‌گیری دبی جریان در رودخانه‌ها استفاده نمود.

جدول ۴- مقادیر آماری روش چپو در تعیین دبی جریان.

شماره مقطع	روش چپو		
	$R^2$	RMSE	ER
۱	۰/۹۹۲	۰/۱	۵/۴
۲	۰/۹۹۷	۰/۰۷	۳/۵
۳	۰/۹۹۷	۰/۱۶	۵/۶
۴	۰/۹۹۹	۰/۱۶	۱
میانگین مقادیر	۰/۹۹۶	۰/۱۲	۳/۹



شکل ۸- مقایسه دبی‌های پیش‌بینی شده توسط روش چپو نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده در ۴ مقطع رودخانهٔ پسیخان و در طی ۳ سری اندازه‌گیری صورت گرفته.

### نتیجه‌گیری

نظر به اهمیت اندازه‌گیری توزیع سرعت در کانال‌های طبیعی و مصنوعی، در این پژوهش دقت روش چپو در پیش‌بینی سرعت و دبی جریان در بازه‌های مختلف از رودخانه پسیخان در استان گیلان مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان داد که این روش دارای دقت مناسبی در پیش‌بینی توزیع سرعت جریان می‌باشد. با توجه به این که روش چپو نیاز به داده‌های کمی برای برآورد نیم‌رخ سرعت جریان دارد و همچنین در مواقعی که سرعت حداکثر در زیر سطح آب رخ می‌دهد، پیش‌بینی



دقیق تری از توزیع سرعت دارد. بنابراین می‌تواند به‌عنوان روشی سریع و آسان در برآورد توزیع سرعت مورد استفاده قرار گیرد. مقایسه‌های انجام شده نشان داد که خطای این روش در برآورد دبی جریان کمتر از ۵ درصد می‌باشد. از آن‌جا که در این روش فقط نیاز به اندازه‌گیری سرعت نقطه‌ای در محل وقوع سرعت حداکثر می‌باشد و باتوجه به این‌که مکان سرعت حداکثر در مقطع عرضی در رودخانه مورد مطالعه با گذشت زمان و تحت دبی‌های مختلف تغییر چندانی نکرد، بنابراین از این روش می‌توان به‌عنوان شیوه‌ای سریع، آسان و دقیق در برآورد دبی جریان در رودخانه‌ها استفاده نمود.

### منابع

1. Ardicioglu, M., Genc, O., Kalin, L., and Agiralioglu, N. 2012. Investigation of flow properties in natural streams using the entropy concept. *Water and Environment J.* 26: 2, 147–154.
2. Ammari, A., and Remini, B. 2010. Estimation of Algerian Rivers discharges based on chiu's equation. *Arab Journal of Geosci.* 3: 59–65.
3. Boiten, W. 2003. *Hydrometry*. A.A., Balkema Publishers, Swets and Zeitlinger B.V., Lisse, The Netherlands, Pp: 248.
4. Carlos, D.J., and Chaudhry, F.H. 1998. Experimental evaluation of 2-D entropy model for open-channel flow. *J. Hydraul. Eng., ASCE*, 124: 10, 1064-1067.
5. Chanson, H. 2004. *The Hydraulics of Open Channel Flow: An Introduction Basic principles, sediment motion, hydraulic modeling, design of hydraulic structures*. Second Edition, Elsevier. 650 p.
6. Chen, Y.C. 1998. An efficient method of discharge measurement, Ph.D. dissertation, University of Pittsburgh, Pittsburgh, PA. 131 p.
7. Chiu, C.L. 1987. Entropy and probability concepts in hydraulics. *J. Hydraul. Eng., ASCE*, 113: 5, 583-600.
8. Chiu, C.L. 1988. Entropy and 2-D velocity distribution in open channels. *J. Hydraul. Eng., ASCE*, 114: 7, 738-756.
9. Chiu, C.L., and Chiou, J.D. 1986. Structure of 3-D flow in rectangular open channels. *J. Hydraul. Eng., ASCE*, 112: 11, 1050-1068.
10. Chiu, C.L., and said, C.A.A. 1995. Maximum and mean Velocities and Entropy in open-channel flow. *J. Hydraul. Eng., ASCE*, 121: 1, 26-35.
11. Chiu, C.L., and Chen, Y.C. 2003. An efficient method of discharge estimation based on probability concept. *J. Hydraul. Res.*, 41: 6, 589–596.
12. Chiu, C.L., Jin, W., and Chen, Y.C. 2000. Mathematical models of distribution of sediment concentration. *J. Hydraul. Eng., ASCE*, 126: 1, 16-23.
13. Moramarco, T., Saltalippi, C., and Singh, V.P. 2004. Estimation of mean velocity in natural channels based on chiu's velocity distribution equation. *J. Hydraul. Eng., ASCE*, 9: 1, 42-50.



Gorgan University of Agricultural  
Sciences and Natural Resources

*J. of Water and Soil Conservation, Vol. 20(6), 2013*  
<http://jwsc.gau.ac.ir>

## **Evaluation of entropy based chiu's method for prediction of the velocity distribution and discharge in rivers**

**\*M. Esmaeili Varaki<sup>1</sup>, S. Ghorbani Nasralah abadi<sup>2</sup> and M. Navabian<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Assistant Professor Department of Water Engineering, University of Guilan, Rasht,

<sup>2</sup>M.Sc. Student, Dept., of Civil Engineering, University of Islamic of Azad, Tehran Center

Unit, <sup>3</sup>Assistant Professor of Department of Water Engineering, University of Guilan

Received: 06/11/2012 ; Accepted: 01/22/2012

### **Abstract**

Determination of the appropriate velocity distribution and accurate estimation of river discharge is important to water resource management, water supply and safe design of hydraulic structure. Common methods in measurement of flow rate are on the basis of direct measurement of flow velocity. These methods are time consuming; costly and impracticable during flood in wide rivers. Therefore, use of methods that, while having sufficient accuracy, and the time required is also cost effective is necessary. In this research, using the principle of maximum entropy and Chiu's velocity distribution, velocity distribution and flow in several cross sections of the Pasikhan river in Guilan province were estimated and the results were compared with measured data collected during 1389-1390. It's found that there is a good agreement between predicted velocities and discharges based on Chiu's method and the measured values with  $R^2= 0.996$  and  $RMSE= 3.9$ . So, it can be used as a quick and easy way to be replaced with conventional methods for estimating flow velocity distribution in rivers, especially in times of floods.

**Keywords:** Entropy theory, Chiu's method, Velocity distribution, Pasikhan river

---

\* Corresponding Author; Email: [Esmaeili.varaki@yahoo.com](mailto:Esmaeili.varaki@yahoo.com)