

## شبیه‌سازی توزیع دوبعدی سرعت جریان در رودخانه‌ها به کمک روش چپو (مطالعه موردی: رودخانه گرگان‌رود)

عبدالرضا ظهیری<sup>۱\*</sup>، فیروزه هاشمی<sup>۲</sup>، ایمان یوسف‌آبادی<sup>۳</sup>

۱. دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۲. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران آب، دانشگاه آزاد واحد بندرعباس

۳. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران آب

(تاریخ دریافت ۱۳۹۵/۱۱/۱۰؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۶/۰۲/۰۵)

### چکیده

حل توزیع دوبعدی سرعت جریان در رودخانه‌ها (در جهات عرضی و عمقی) برای مدل‌سازی بسیاری از فرایندهای هیدرولیکی از قبیل استخراج رابطه دبی-اشل رودخانه، محاسبه انتقال رسوب معلق و نیز تعیین تنش برشی مرزی نیاز است. در این تحقیق با استفاده از روش احتمالاتی چپو، روشی ساده برای شبیه‌سازی توزیع عرضی و قائم سرعت در رودخانه‌های مستقیم معرفی شده است. برای واسنجی و صحت‌سنجی این روش، ایده جدیدی بر مبنای تخمین بهینه پارامتر آنتروپی در رودخانه به کار گرفته شد. نتایج تحقیق در ایستگاه هیدرومتری آق‌قلا واقع در رودخانه گرگان‌رود نشان داد میدان سرعت جریان به دست آمده از مدل چپو در مقایسه با داده‌های صحرایی دقت خوبی دارد. همچنین تحلیل آماری نتایج به دست آمده نشان داد میانگین خطای مطلق این مدل برای حل توزیع دوبعدی سرعت جریان در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی به ترتیب حدود ۵/۲ و ۳/۵ درصد است. این میزان خطا برای تخمین دبی کل جریان رودخانه به ترتیب حدود ۵/۹ و ۶/۰۴ درصد است. با توجه به داده‌های اندک ورودی، این مدل مزیت عمده‌ای نسبت به سایر روش‌های موجود دارد.

**کلیدواژه‌گان:** احتمالات، توزیع قائم و عرضی سرعت، تئوری چپو، رابطه دبی-اشل.

## مقدمه

سرعت جریان یکی از پارامترهای مهم هیدرولیکی کانال‌های باز است و در بسیاری از روابط و معادلات اساسی مکانیک سیالات و هیدرولیک به‌عنوان یک متغیر مؤثر ظاهر می‌شود. توزیع سرعت در رودخانه‌ها معمولاً در هر سه جهت طولی، عرضی و قائم یکنواخت نیست. دلیل این یکنواخت نبودن بیشتر به اثر زبری مرزها و نیز جریان‌های ثانویه نسبت داده شده است [۱ و ۲]. از نظر کاربردی، توزیع عرضی و عمقی سرعت جریان اهمیت بیشتری نسبت به تغییرات طولی دارد. به‌دلیل هندسه نامنظم و نیز تغییرات زیاد زبری در عرض، توزیع سرعت در رودخانه‌های آبرفتی نسبت به کانال‌های بتنی غیریکنواختی بیشتری دارد. در رودخانه‌ها و به‌ویژه در شرایط وقوع سیل که جریان وارد دشت‌های سیلابی می‌شود، توزیع عرضی سرعت اهمیت بیشتری یافته و تحقیقات زیادی در این زمینه انجام شده است. اطلاع از توزیع عرضی و قائم سرعت جریان در رودخانه‌ها برای محاسبه دبی جریان و تنش برشی مرزی نیز ضروری است. علاوه بر این، تعیین میدان سرعت جریان برای مدل‌سازی فرایندهای هیدرولیکی در رودخانه از قبیل تعیین الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری، محاسبه انتقال رسوب و نیز محاسبه ضرایب تصحیح انرژی جنبشی و مومنوم لازم است [۳ و ۴].

پرکاربردترین روش‌های تعیین توزیع سرعت در کانال‌ها و رودخانه‌ها، روش‌های قانون توانی و لگاریتمی سرعت هستند. این دو روش قادر به برآورد توزیع عرضی سرعت نیستند و فقط برای کانال‌های عریض نتایج قابل قبولی دارند. از سوی دیگر، این روابط در نزدیکی کف، اعتبار کافی ندارند [۵].

با توسعه تئوری آنتروپی، این تئوری در سطح وسیعی از علوم از جمله هیدرولوژی، هیدرولیک و محیط زیست به‌کار گرفته شده است. با به‌کاربردن مفاهیم احتمالاتی و اصل حداکثر آنتروپی<sup>۱</sup> می‌توان معادله توزیع سرعتی را ارائه کرد که این معادله قابلیت تعیین توزیع سرعت در هر دو جهت قائم و عرضی را دارد.

چیو (۱۹۸۷) با استفاده از اصل حداکثر آنتروپی و مفهوم احتمال در کانال‌های روباز، معادله دوبعدی سرعت جریان را ارائه کرد.

چن (۱۹۹۸) دقت روش چیو در برآورد دبی جریان در یکی از رودخانه‌های جزر و مدی تایوان را بررسی کرد. نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق بیان‌کننده دقت زیاد روش یادشده در برآورد دبی جریان رودخانه مد نظر تحت شرایط جریان پیچیده و غیرماندگار ناشی از جزر و مد است.

کارلوس و همکارانش (۱۹۹۸) با مطالعات آزمایشگاهی صحت و دقت روش چیو در برآورد نیمرخ سرعت و مقایسه آن با روش لگاریتمی را بررسی کردند. آنها با استفاده از ۱۸۳۲ سرعت نقطه‌ای اندازه‌گیری‌شده نشان دادند روش چیو در برآورد نیمرخ سرعت دقت بیشتری نسبت به روش لگاریتمی دارد.

اماری و رمینی (۲۰۱۰) تعیین دبی جریان در چند رودخانه کشور الجزایر به کمک معادله چیو را بررسی کردند و نشان دادند نتایج دقت قابل دارد.

آردیکلیگو و همکارانش (۲۰۱۲) دقت روش چیو را در پیش‌بینی نیمرخ سرعت در رودخانه‌های ساریمسالکی و کیزیلیرماک بررسی کردند و با مقایسه نتایج مشاهداتی و محاسباتی، نشان دادند متوسط خطای برآورد سرعت از روش چیو حدود ۱۴/۷ درصد است.

کوراتو و همکارانش (۲۰۱۴) با بررسی رفتار هیدرولیکی چهار رودخانه از کشور ایتالیا، دقت روش‌های مبتنی بر تئوری آنتروپی را برای محاسبه سرعت میانگین جریان را ارزیابی کردند.

فارینا و همکارانش (۲۰۱۴) مبانی تئوری و محاسباتی سه روش برای تعیین پارامتر آنتروپی روش چیو را ارائه کردند. در این روش‌ها، با کمترین اطلاعات موجود از سرعت جریان و هندسه مقطع عرضی رودخانه، دبی جریان در رودخانه به‌دست می‌آید.

ستاسیچ و همکارانش (۲۰۱۶) روش ساده‌ای را برای محاسبه میدان سرعت و دبی جریان در رودخانه‌ها ارائه کردند. در این روش از رگرسیون چندجمله‌ای برای محاسبه پروفیل قائم سرعت جریان و از تکنیک درون‌یابی برای محاسبه سرعت بین پروفیل‌های قائم استفاده شد. این مطالعه نشان داد با استفاده از روش پیشنهادی در تعیین دبی جریان رودخانه‌ها، می‌توان تعداد سرعت‌های نقطه‌ای اندازه‌گیری‌شده را به‌میزان شایان توجهی کاهش داد بدون اینکه دقت محاسبات کاهش یابد.

خطوط هم‌سرعت استفاده کرده و رابطه بین  $\xi$  و  $u$  یک به یک است. سیستم مختصات  $\eta-\xi$  در شکل ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشخص شده است، هر منحنی یا به‌بیان دیگر هر  $\xi$  نشان‌دهنده یک سرعت مشخص است. در لایه مرزی که سرعت برابر با صفر است،  $\xi = 0$  و در محلی که سرعت حداکثر جریان رخ می‌دهد،  $\xi = \xi_{max}$  است.

برای جریان در کانال‌های باز که سرعت حداکثر زیر سطح آب رخ می‌دهد، خطوط هم‌سرعت  $\xi$  توسط چپو و چایو (۱۹۸۶) به‌صورت رابطه ۱ ارائه شد:

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

که در آن  $Z = \frac{|z|}{B_i + \delta_i}$  و  $Y = \frac{y + \delta_y}{D + \delta_y - h}$  هستند. در این روابط  $Z$  و  $Y$  نشان‌دهنده شکل هندسی کانال،  $y$  محور مختصات در جهت عمود بر بستر کانال در مکانی که سرعت حداکثر رخ می‌دهد،  $z$  محور مختصات در راستای عرضی است که می‌تواند مقادیر مثبت یا منفی را با توجه به موقعیت نقطه مد نظر نسبت به محور  $y$  داشته باشد،  $D$  عمق جریان،  $B_i$  فاصله افقی محور  $y$  در سطح آزاد آب از ساحل سمت چپ و راست مقطع عرضی کانال (اندیس  $i=1$  برای ساحل چپ و  $i=2$  برای ساحل راست است. اگر کانال مستطیلی باشد و سرعت حداکثر در وسط کانال رخ دهد، آن گاه  $B_1=B_2=b/2$  است که  $b$  عرض کانال است)،  $h$  عمق وقوع سرعت حداکثر از سطح آب و  $\beta_i$  و  $N$  پارامتر هستند. اگر کانال مستطیلی باشد، آن‌گاه  $N_1=N_2=N$  هستند. مقطع عرضی کانال به‌وسیله  $\delta_y$  و  $\delta_i$  کنترل می‌شود. این پارامترها با تغییر شکل هندسی مقطع تغییر می‌کنند. برای کانال‌های مستطیلی و یا رودخانه‌های عریض، هر دو مقدار این پارامتر برابر صفر است. در غیر این‌صورت با دور شدن هندسه مقطع عرضی از حالت مستطیلی، مقادیر  $\delta_y$  و  $\delta_i$  افزایش می‌یابند [۱۷].

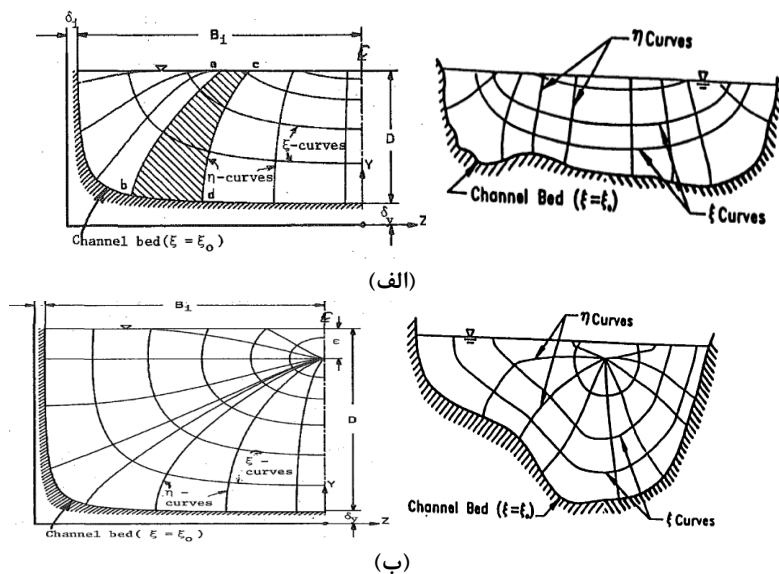
امید و کرباسی (۱۳۸۷) با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی در بسترهای صاف و زبر، مدل توزیع یک‌بعدی سرعت را با روش چپو ارزیابی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد این مدل توانایی پیش‌بینی توزیع سرعت قائم در آبراهه‌های روباز را دارد. همچنین مشخص شد که دقت این روش در بسترهای صاف بیشتر از بسترهای زبر است.

اسماعیلی ورکی و همکارانش (۱۳۹۲) با استفاده از تئوری چپو، توزیع قائم سرعت جریان در رودخانه پسیخان واقع در استان گیلان را برآورد و نتایج را با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه کردند. نتایج، مطابقت مناسب داده‌های اندازه‌گیری و مقادیر محاسباتی سرعت را نشان داد. در این تحقیق برای محاسبه نیم‌رخ قائم سرعت، از داده‌های اندازه‌گیری شده موقعیت سرعت حداکثر جریان در تمام عرض رودخانه استفاده شد که با توجه به نبود این داده‌ها در رودخانه‌های دیگر، از نظر کاربردی یک محدودیت است.

با بررسی مطالعات یادشده مشخص می‌شود که اگرچه تحقیقات زیادی برای تخمین توزیع دوبعدی سرعت جریان کانال‌های منظم انجام شده است [۲ و ۳] اما این مطالعات برای رودخانه‌ها که اهمیت بیشتری دارند، محدود است [۴ و ۵]. در این تحقیق به کمک روش احتمالاتی چپو و استفاده از داده‌های معمول در مطالعات هیدرولیک رودخانه‌ها از قبیل مقطع عرضی رودخانه و تراز سطح آب، میدان سرعت جریان رودخانه گرگان‌رود در ایستگاه هیدرومتری آق‌قلا در دبی‌های مختلف شبیه‌سازی شده است. همچنین رابطه‌ای رگرسیونی برای محاسبه پارامتر  $N$  ارائه شده است که برخلاف محاسبات قبلی، برای رودخانه‌ها نیز کاربرد دارد. مراحل واسنجی و صحت‌سنجی روش پیشنهادی برای ایستگاه یادشده ارائه شده و دقت نتایج به‌دست‌آمده به کمک شاخص‌های آماری تجزیه و تحلیل شده است.

## مواد و روش‌ها

چپو (۱۹۸۸) سیستم مختصات منحنی‌الخط  $\eta-\xi$  را ارائه داد که در این سیستم برای توزیع سرعت از یک‌سری



شکل ۱. معرفی سیستم مختصات منحنی الخط

(الف) وقوع حداکثر جریان روی سطح آب؛ (ب) وقوع سرعت حداکثر جریان زیر سطح آب [۱۷]

براساس نظریه چپو این مطلب یک قانون طبیعی است. این نسبت، سیستم جریان را در یک مقطع معین توصیف می کند و برای مقاطع مختلف نسبت های متفاوتی دارد. بنابراین، می توان با داشتن مقادیر میانگین و بیشینه سرعت جریان در یک مقطع مشخص، مقدار  $\phi$  را محاسبه کرد. سپس طبق رابطه ۴ مقدار پارامتر آنتروپی تعیین می شود. بنابراین، مقدار پارامتر آنتروپی  $M$  برای یک مقطع مشخص، ثابت است. نکته شایان یادآوری این است که عدد  $\phi$  به نوعی بیان کننده شدت تلاطم و آشفتگی جریان را نشان می دهد. هرچه شدت تلاطم جریان بیشتر باشد، سرعت حداکثر به سرعت متوسط جریان نزدیک تر شده و این عدد به یک نزدیک می شود.

با بررسی داده های آزمایشگاهی و میدانی، چپو و تنگ (۲۰۰۲) رابطه ای بین  $M$  و  $h$  یافتند که این رابطه به صورت رابطه ۵ ارائه شد:

$$h = -0.2DLn\left(\frac{G(M)}{58/3}\right) \quad (5)$$

که  $G(M) = \frac{e^M - 1}{M \cdot \lambda}$  است. رابطه ۵ برای مقادیر  $M$  بین ۱ تا ۵/۶ اعتبار دارد. اگر مقدار پارامتر آنتروپی بزرگ تر از ۵/۶ باشد، سرعت حداکثر روی سطح آب رخ می دهد [۱۹]. در شکل ۲ تغییرات  $M$  با  $N$  در کانال های مختلف نشان داده شده است.

مدل احتمالاتی توزیع سرعت چپو

برای جریان در مجاری روباز باید سه قانون بقای جرم، انرژی و مومنتوم ارضا شوند. برای تعیین توزیع سرعت در رودخانه ها، این قوانین باید به عنوان محدودیت های مسئله در نظر گرفته شوند [۱۸]. بر این اساس و با فرض اینکه رودخانه ها در شرایط طبیعی تمایل دارند به حداکثر آنتروپی برسند، رابطه ۲ بین سرعت نقطه ای و سرعت حداکثر جریان (که بیشترین آنتروپی را دارد) قابل اثبات است:

$$\frac{u}{u_{max}} = \frac{1}{M} Ln\left[1 + (e^M - 1) \frac{\xi - \xi_0}{\xi_{max} - \xi_0}\right] \quad (2)$$

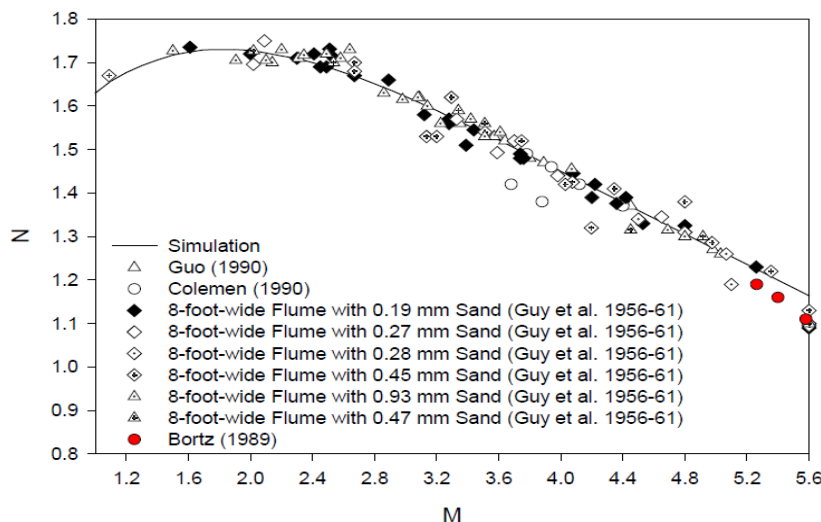
که  $M = \lambda u_{max}$  یک پارامتر بدون بعد (پارامتر آنتروپی) و  $\lambda$  یک ضریب ثابت است. معادله ۲ معادله توزیع دوبعدی سرعت در کانال های روباز است. بر اساس اصل یکنواختی توزیع سرعت روی یک خط هم سرعت ( $\xi = \bar{\xi}$ ) و  $(u = \bar{u})$ ، معادله ۲ به صورت معادله ۳ قابل ارائه است:

$$\frac{\bar{u}}{u_{max}} = \frac{1}{M} Ln\left[1 + (e^M - 1) \frac{\bar{\xi} - \xi_0}{\xi_{max} - \xi_0}\right] \quad (3)$$

در نهایت با توجه به معادلات احتمالاتی مربوط به سرعت متوسط جریان، رابطه اساسی تئوری چپو به دست می آید:

$$\phi(M) = \frac{\bar{u}}{u_{max}} = \left(\frac{e^M}{e^M - 1} - \frac{1}{M}\right) \quad (4)$$

معادله ۴ بیان می کند که نسبت سرعت متوسط به بیشینه سرعت در یک کانال یا رودخانه مقدار ثابتی است.



شکل ۲. تغییرات پارامتر آنتروپی  $M$  با  $N$  در کانال‌های مختلف [۱۹]

توزیع عرضی و عمقی سرعت اندازه‌گیری شده (برای واسنجی مدل) مورد نیاز هستند.

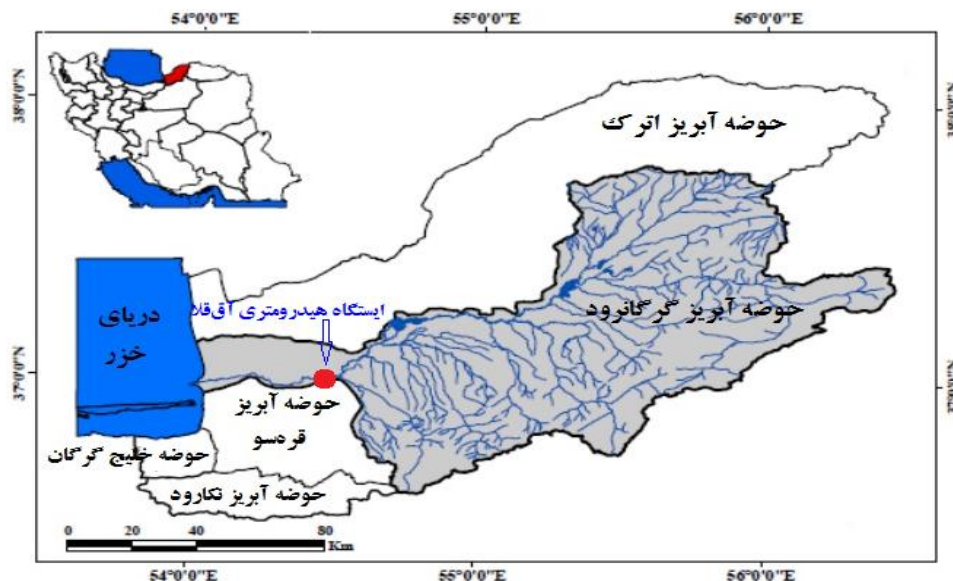
#### منطقه مطالعه‌شده

استان گلستان با مساحتی حدود ۲۰۴۳۸ کیلومترمربع در شمال شرق کشور واقع شده است. رودخانه‌های استان گلستان تأثیر بسزایی در رشد و شکوفایی استان به‌ویژه در بخش کشاورزی ایفا می‌کنند. این استان پنج حوضه رودخانه‌ای گرگان‌رود، اترک، قره‌سو، خلیج گرگان و نکارود را دارد. رودخانه گرگان‌رود در حوضه آبخیز گرگان‌رود واقع شده است (شکل ۳). این رودخانه با طول حدود ۳۰۰ کیلومتر از دامنه‌های شمالی البرز شرقی و دامنه‌های غربی ارتفاعات استان خراسان شمالی سرچشمه می‌گیرد و از به‌هم‌پیوستن رودهای زاو، دوغ، چهل‌چای، زرین‌گل، تیل‌آباد، رامیان و محمدآباد تشکیل می‌شود. این رودخانه پس از عبور از شهرهای گنبد کاووس و آق‌قلا با تشکیل یک دلتای بزرگ به دریای مازندران می‌ریزد. متوسط آبدهی سالانه این رودخانه حدود ۹۲۰ میلیون مترمکعب است. به‌منظور بهره‌برداری بیشتر برای توسعه کشاورزی، سد وشمگیر و نیز سدهای گلستان و بوستان روی این رودخانه و شاخه‌های فرعی آن احداث شده است. در این مقاله از داده‌های هیدرولیکی و نیز مقاطع عرضی رودخانه گرگان‌رود در محل ایستگاه هیدرومتری آق‌قلا برای ارزیابی دقت روش چپو در محاسبه میدان سرعت جریان استفاده شده است. موقعیت ایستگاه آق‌قلا در مسیر رودخانه گرگان‌رود در شکل ۳ نشان داده شده است.

به‌طور کلی، محاسبات روش چپو برای تخمین توزیع دوبعدی سرعت در مجاری روباز (کانال‌ها و رودخانه‌ها) با مسیر مستقیم به‌صورت زیر است [۲۱]:

۱. محاسبه سرعت متوسط جریان در آبراهه به‌کمک دبی جریان معلوم و رابطه دبی-اشل رودخانه؛
۲. فرض یک مقدار دلخواه برای پارامتر آنتروپی  $(1 < M < 5/6)$  و سپس تعیین مقدار  $N$  از شکل ۲؛
۳. محاسبه مقدار ثابت  $\phi$  به‌کمک رابطه ۴؛
۴. محاسبه مقدار بیشینه سرعت نقطه‌ای در رودخانه به‌کمک رابطه ۴ و یا بر اساس نتایج اندازه‌گیری سرعت‌های نقطه‌ای؛
۵. تعیین موقعیت بیشینه سرعت با استفاده از رابطه ۵ و یا بر اساس نتایج اندازه‌گیری سرعت‌های نقطه‌ای؛
۶. محاسبه توزیع دوبعدی سرعت رودخانه از رابطه ۲؛
۷. محاسبه شاخص آماری  $RMSE$  (میانگین مجموع مربعات خطا)؛
۸. تکرار مراحل ۲ تا ۷ تا حصول کمترین مقدار برای پارامتر  $RMSE$ .

این کار برای چند سری توزیع سرعت اندازه‌گیری شده انجام شده و برای هر سری، یک مقدار بهینه برای پارامتر آنتروپی  $M$  به‌دست می‌آید. میانگین این مقادیر بهینه به‌دست‌آمده برای  $M$ ، به‌عنوان مقدار نهایی پارامتر آنتروپی در مقطع عرضی در نظر گرفته می‌شود. بنابراین، برای استفاده از روش چپو، داده‌های عمق و دبی جریان و نیز چند نمونه از

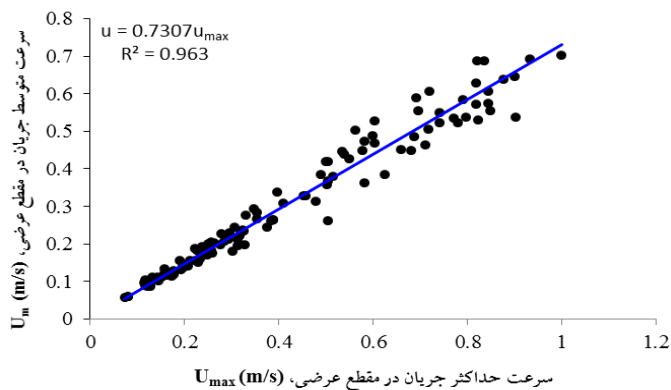


شکل ۳. موقعیت حوضه رودخانه گرگانرود در ایران و استان گلستان

### نتایج و بحث

در این تحقیق با توجه به وجود اطلاعات کاملی از داده‌های هیدرولیک جریان در ایستگاه آق‌قلا، برخلاف روند محاسباتی پیشنهادی بیشتر محققان، ابتدا بر اساس سرعت‌های متوسط مقطع (که از دبی‌های جریان و سطح مقطع رودخانه قابل محاسبه‌اند) و نیز مقادیر بیشینه سرعت نقطه‌ای در مقطع، مقدار ثابت  $\phi$  و در نتیجه پارامتر آنتروپی  $M$  به صورت مستقیم محاسبه می‌شوند. بدین منظور از ۱۲۱ نمونه از داده‌های توزیع سرعت برداشت‌شده در محل ایستگاه در دوره زمانی ۱۳۸۶-۱۳۹۲ استفاده شده و مقادیر میانگین و بیشینه سرعت مطابق شکل ۴ در مقابل هم رسم شده‌اند. معادله رگرسیون خطی برازش داده‌شده بر داده‌ها نیز در شکل ۴ نشان داده شده است. بر این اساس، ضریب زاویه این خط (نسبت سرعت متوسط به سرعت حداکثر یا عدد ثابت  $\phi$ ) حدود  $0.731$  به دست می‌آید. این مقدار با مقادیر به دست آمده در رودخانه‌های کشورهای دیگر نیز مطابقت خوبی دارد. به طور مثال، کوراتو و همکارانش (۲۰۱۴) مقدار پارامتر آنتروپی  $\phi$  را برای چهار رودخانه کشور ایتالیا در محدوده  $0.6$  تا  $0.7$  به دست آوردند. پارامتر آنتروپی  $M$  برای رودخانه گرگانرود با توجه به رابطه ۱۷ برابر  $3/22$  محاسبه می‌شود. فرض چپو این است که این پارامتر برای یک مقطع عرضی رودخانه در تمام طول زمان ثابت است [۱۴].

بعد از محاسبه پارامتر  $M$ ، باید پارامتر  $N$  محاسبه شود. اگرچه هسو (۲۰۰۴) نموداری را برای محاسبه این پارامتر بر اساس مقدار  $M$  ارائه کرده است (شکل ۲)، اما این نمودار فقط برای کانال‌های مستطیلی قابل استفاده است. به همین دلیل در این تحقیق از روش دیگری برای محاسبه پارامتر  $N$  برای رودخانه گرگانرود در محل ایستگاه آق‌قلا استفاده شده است. برای انجام این کار، ابتدا شش نمونه از اندازه‌گیری‌های سرعت نقطه‌ای در محل ایستگاه آق‌قلا به صورت تصادفی انتخاب شد (چهار نمونه برای واسنجی مدل و دو نمونه برای صحت‌سنجی مدل). سپس با توجه به معلوم بودن مقادیر  $\phi$ ،  $M$ ، سرعت حداکثر و موقعیت این سرعت در مقطع عرضی و نیز فرض یک مقدار دلخواه برای پارامتر  $N$ ، توزیع دوبعدی سرعت به روش چپو محاسبه شد. با تغییر مکرر پارامتر  $N$ ، نتایج محاسباتی توزیع دوبعدی سرعت در هر سری با مقادیر واقعی مقایسه شده و مجذور مربعات خطا ( $RMSE$ ) محاسبه شد. بدیهی است مقدار بهینه  $N$  زمانی به دست می‌آید که مقدار  $RMSE$  به کمترین حد ممکن برسد. برای تسریع در انجام این مرحله و افزایش دقت نتایج، از قابلیت بهینه‌سازی موجود در نرم‌افزار اکسل استفاده شد. نتایج نهایی این محاسبات در جدول ۱ ارائه شده است. همان طور که ملاحظه می‌شود خطای متوسط سرعت در این مرحله برای همه نمونه‌ها قابل قبول و مناسب است.



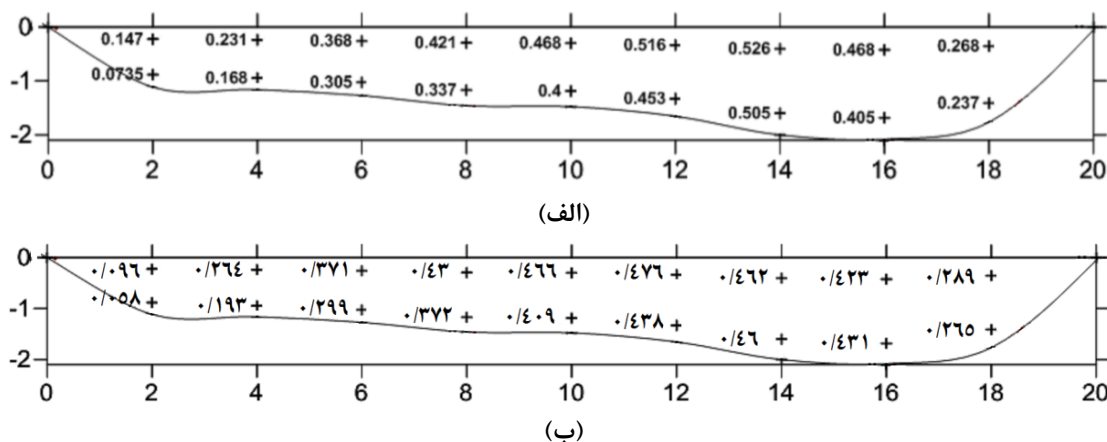
شکل ۴. نمودار تغییرات سرعت متوسط با سرعت حداکثر در محل ایستگاه هیدرومتری آق قلا (دوره زمانی ۱۳۸۶-۱۳۹۲)

جدول ۱. میانگین خطای محاسبات روش چپو برای توزیع سرعت جریان در ایستگاه آق قلا (مرحله واسنجی)

خطا (%)	N	Bi-2 (متر)	Bi-1 (متر)	b (متر)	D <sub>max</sub> (متر)	U <sub>max</sub> (متر بر ثانیه)	U <sub>m</sub> (متر بر ثانیه)	A (متر مربع)	Q (مترمکعب بر ثانیه)
-۲/۵۵	۳/۴۱	۳/۳	۴	۷/۳	۱/۷۴	۰/۳۴۲	۰/۲۳۵	۸/۵۸	۲/۱
-۱/۴۷	۲/۹۳	۶	۱۴	۲۰	۱/۲	۰/۵۲۶	۰/۳۵۸	۲۸/۰۴	۱۰/۰
۳/۳	۲/۳۰۴	۵	۱۶	۲۱	۲/۴۸	۰/۷۸۴	۰/۵۰۷	۳۵/۴	۱۷/۹
-۰/۵۲	۲/۵۳۶	۹	۱۴	۲۳	۲/۶۳	۰/۹۲۶	۰/۵۷۸	۴۵/۷۶	۲۶/۵

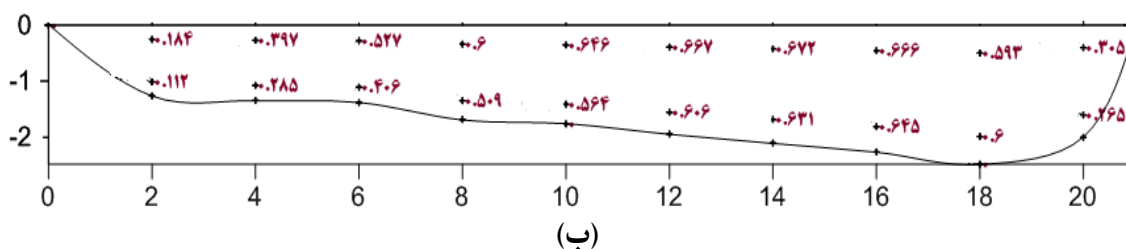
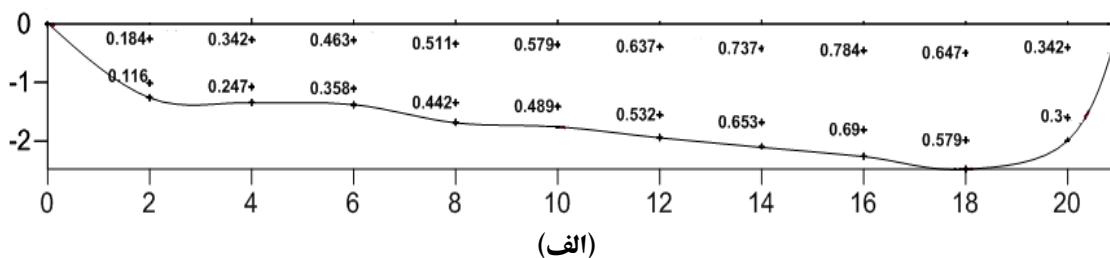
محاسباتی در مقایسه با مقادیر واقعی سرعت‌های نقطه‌ای دقت مناسبی دارد. با توجه به اینکه رودخانه گرگان‌رود در محل ایستگاه آق قلا هندسه بسیار نامتقارن دارد و طی زمان با فرسایش و رسوب‌گذاری‌هایی همراه بوده است، دقت مناسب نتایج محاسباتی قابل قبول است. همچنین به دلیل اینکه تا کنون محاسبه توزیع دوبعدی سرعت به روش چپو فقط در کانال‌های مستطیلی استفاده شده است، نتایج این تحقیق می‌تواند کاربردی باشد.

نتایج توزیع دوبعدی سرعت به دست آمده از روش چپو برای سه نمونه از محاسبات مرحله واسنجی در شکل‌های ۵ تا ۷ نشان داده شده است. در این شکل‌ها، مقادیر واقعی سرعت‌های نقطه‌ای به دست آمده از اندازه‌گیری مولینه نیز به منظور مقایسه نتایج ارائه شده است. در این اشکال، مقادیر سرعت‌های اندازه‌گیری شده با اعداد لاتین و مقادیر سرعت‌های محاسباتی از روش چپو به صورت اعداد فارسی قابل مشاهده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نتایج



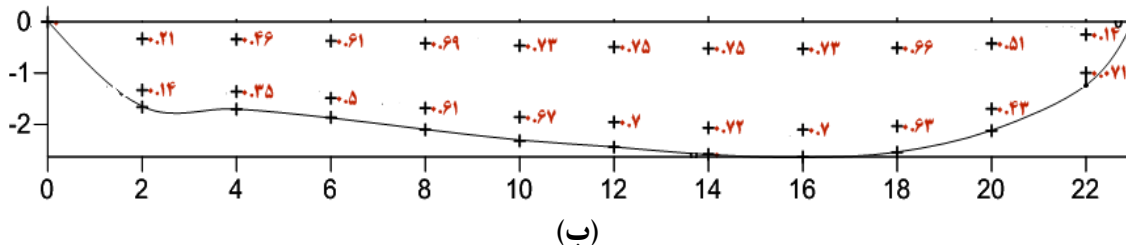
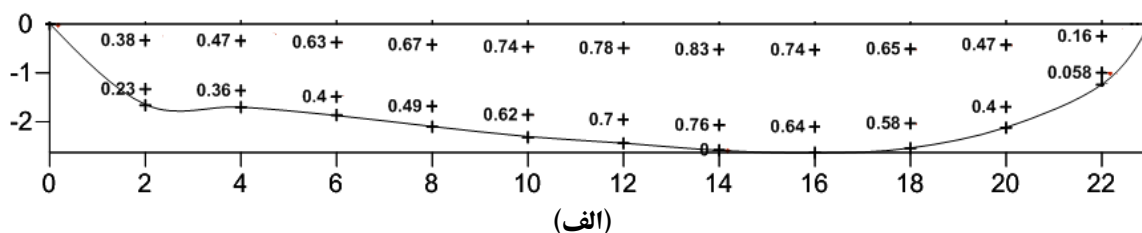
شکل ۵. مقایسه مقادیر سرعت اندازه‌گیری شده

(الف) نتایج به دست آمده از محاسبات روش چپو؛ (ب) در مرحله واسنجی برای ایستگاه آق قلا (دبی جریان ۱۰ مترمکعب بر ثانیه)



شکل ۶. مقایسه مقادیر سرعت اندازه‌گیری شده

(الف) نتایج به‌دست آمده از محاسبات روش چپو؛ (ب) در مرحله واسنجی برای ایستگاه آق‌قلا (دبی جریان ۱۷/۹ مترمکعب بر ثانیه)



شکل ۷. مقایسه مقادیر سرعت اندازه‌گیری شده

(الف) نتایج به‌دست آمده از محاسبات روش چپو؛ (ب) در مرحله واسنجی برای ایستگاه آق‌قلا (دبی جریان ۲۶/۵ مترمکعب بر ثانیه)

و سرعت متوسط جریان آزمایش شد. نتایج نشان داد مناسب‌ترین فرم تغییرات، مربوط به عمق حداکثر جریان است (با ضریب تبیین  $R^2=0/920$ ). این نتایج در شکل ۸ نشان داده شده است. بنابراین، منحنی تغییرات پارامتر  $N$  با عمق حداکثر جریان به‌عنوان رابطه محاسبه ضریب بهینه  $N$  در شرایط کاربردی قابل پیشنهاد است.

برای صحت‌سنجی روش چپو، دو نمونه از اندازه‌گیری‌های سرعت‌های نقطه‌ای به‌صورت تصادفی انتخاب شد. برای محاسبه توزیع دوبعدی سرعت رودخانه و با توجه به ثابت‌بودن مقدار  $M$ ، ابتدا مقدار پارامتر  $N$  برای

هر مدل ریاضی پس از واسنجی به صحت‌سنجی نیاز دارد. به‌بیان بهتر، با انجام صحت‌سنجی، قابلیت کاربرد مدل ریاضی بررسی شده در شرایطی خارج از محدوده واسنجی آزمایش خواهد شد. بدین‌منظور، برای انجام صحت‌سنجی مدل چپو، ابتدا باید روشی برای تعیین پارامتر  $N$  ارائه شود. این روش باید ساده و مستقل از داده‌های اندازه‌گیری توزیع دوبعدی سرعت در مقطع رودخانه باشد. برای انجام این کار، ابتدا تغییرات این پارامتر نسبت به پارامترهای هیدرولیک جریان از قبیل عمق حداکثر جریان، مساحت جریان، عرض فوقانی جریان



سواحل چپ و راست به راحتی قابل تعیین است. حال با توجه به تعیین پارامتر  $N$  و مقادیر  $B_i$ ، توزیع دوبعدی سرعت‌های نقطه‌ای در مقطع عرضی رودخانه به کمک روش چپو محاسبه می‌شود. این نتایج با مقادیر مشاهداتی مقایسه می‌شوند.

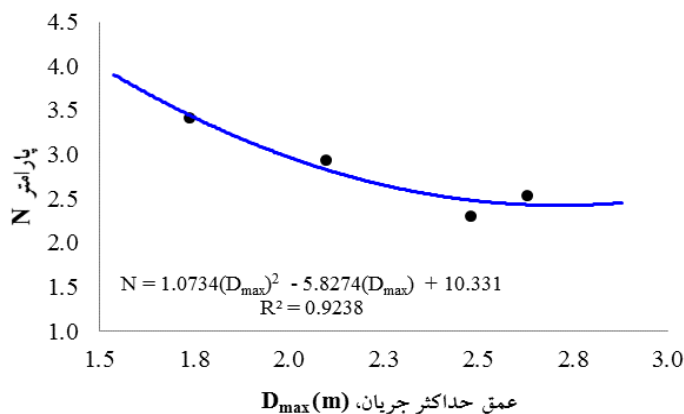
نتایج محاسبات روش چپو در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده سرعت‌های نقطه‌ای در هر دو مقطع، در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل‌های ۹ و ۱۰ مشاهده می‌شود مقادیر سرعت نقطه‌ای به‌دست‌آمده در این مرحله مطابقت خوبی با مقادیر اندازه‌گیری شده دارند. همچنین مقادیر سرعت حداکثر محاسباتی و مشاهداتی در هر دو نمونه بررسی شده مطابقت خوبی با یکدیگر دارند. مقدار سرعت حداکثر واقعی در این دو شکل به ترتیب برابر با ۰/۷۸ و ۰/۷۳ متر بر ثانیه و مقدار سرعت حداکثر محاسبه شده برای آنها به ترتیب برابر با ۰/۷۹ و ۰/۶۸ متر بر ثانیه است. همچنین میانگین خطای توزیع دوبعدی سرعت محاسبه‌شده در دو نمونه مد نظر به ترتیب حدود ۸ و ۳/۸۸ درصد محاسبه شده است که بیان‌کننده دقت قابل قبول روش پیشنهادی است.

دو نمونه یادشده با استفاده از رابطه رگرسیونی ارائه‌شده در شکل ۸ محاسبه می‌شود:

$$N = 1/0.734 D_{max}^2 - 5/8.274 D_{max} + 10/3.31 \quad (6)$$

با توجه به رابطه ۶ و نیز مشخصات مقطع عرضی (عمق بیشترین جریان) ارائه‌شده در جدول ۲، مقادیر پارامتر  $N$  برای دو نمونه انتخاب‌شده در مرحله صحت‌سنجی (نمونه‌های ۱ و ۲) به ترتیب برابر ۲/۴۲۸ و ۲/۴۳۲ به‌دست آمد.

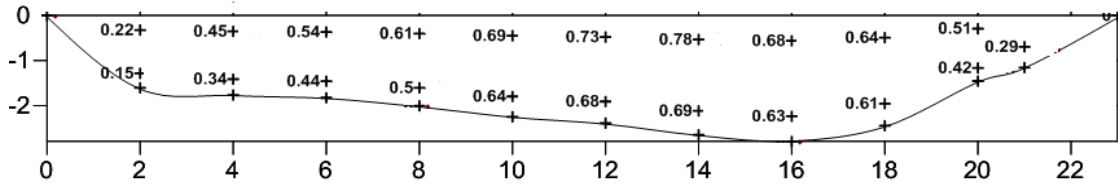
برای محاسبه سرعت‌های نقطه‌ای در عرض و عمق رودخانه به کمک روش چپو، باید بعد از تعیین پارامتر  $N$  مقادیر پارامترهای  $B_i$  مشخص شود.  $B_i$  فاصله افقی محور  $y$  (محل وقوع سرعت بیشترین جریان) در سطح آزاد آب از ساحل سمت چپ و راست مقطع عرضی کانال یا رودخانه است (اندیس  $i=1$  برای ساحل چپ و  $i=2$  برای ساحل راست است). در این تحقیق برای محاسبه مقدار پارامترهای  $B_1$  و  $B_2$  در رودخانه گران‌رود، محل وقوع سرعت حداکثر در محل عمق حداکثر جریان فرض شده است. بنابراین، با توجه به هندسه مقطع عرضی رودخانه و تراز سطح آب، فاصله محل عمق بیشترین جریان از



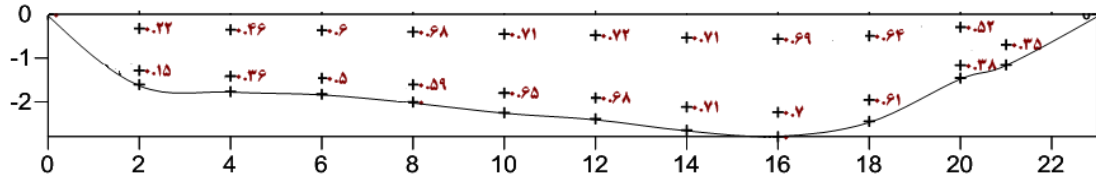
شکل ۸. نمودار تغییرات پارامتر  $N$  نسبت به عمق حداکثر جریان در ایستگاه هیدرومتری آق‌قلا

جدول ۲. میانگین خطای محاسبه توزیع سرعت جریان در محل ایستگاه هیدرومتری در مرحله صحت‌سنجی

	Q	A	$U_m$	$U_{max}$	$D_{max}$	b	Bi-1	Bi-2	N	خطا
	(مترمکعب)	(متر)	(متر بر ثانیه)	(متر بر ثانیه)	(متر)	(متر)	(متر)	(متر)		(%)
مرحله ۱	۲۳/۷۸	۴۳/۲۴	۰/۵۵	۰/۷۸	۲/۷۹	۲۳	۱۴	۹	۲/۴۳	۸/۰۰
مرحله ۲	۲۰/۵۳	۳۹/۹۰	۰/۵۱۵	۰/۷۳	۲/۶۲	۲۱/۵	۱۶	۵/۵	۲/۴۳	۳/۸۸



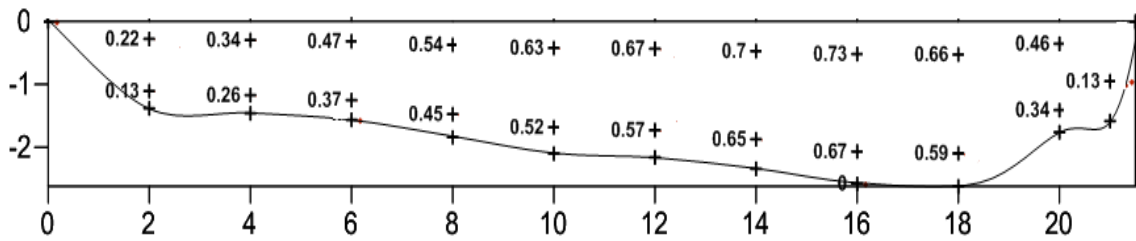
(الف)



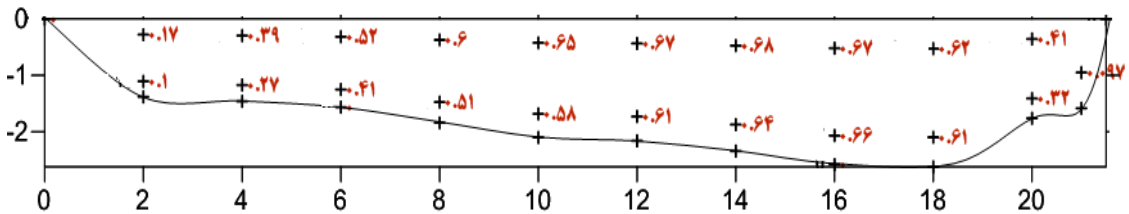
(ب)

شکل ۹. مقایسه مقادیر سرعت اندازه گیری شده

(الف) نتایج به دست آمده از محاسبات روش چپو؛ (ب) در مرحله صحت سنجی برای ایستگاه آق قلا (دبی جریان ۲۳/۷۸ مترمکعب بر ثانیه)



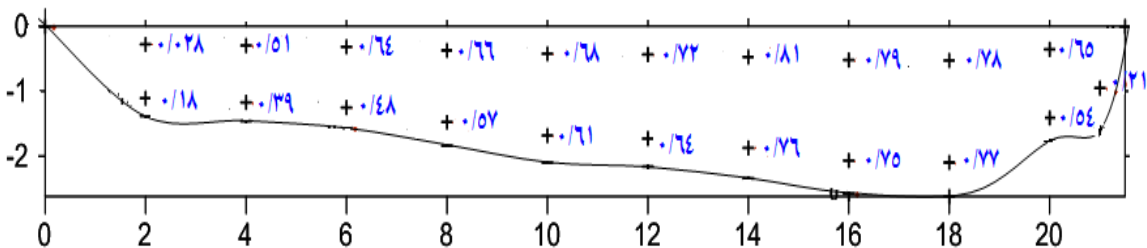
(الف)



(ب)

شکل ۱۰. مقایسه مقادیر سرعت اندازه گیری شده

(الف) نتایج به دست آمده از محاسبات روش چپو؛ (ب) در مرحله صحت سنجی برای ایستگاه آق قلا (دبی جریان ۲۰/۵۳ مترمکعب بر ثانیه)



شکل ۱۱. نتایج سرعت به دست آمده از روش هسو (۲۰۰۴) برای ایستگاه آق قلا (دبی ۲۰/۵۳ مترمکعب بر ثانیه)

روش پیشنهادی نیز مشخص شد که دقت نتایج میدان سرعت جریان به‌دست‌آمده قابل قبول است. خطای متوسط برآورد سرعت جریان برای دو دبی جریان مطالعه‌شده در این تحقیق حدود ۸ و ۳/۹ درصد محاسبه شده است. با توجه به سادگی فرایند محاسباتی روش پیشنهادی نسبت به روش‌های موجود، دقت بهتر نتایج و نیز در دسترس بودن داده‌های ورودی مورد نیاز آن، کاربرد روش یادشده برای رودخانه‌های کشور توصیه می‌شود.

#### منابع

- [1]. Chiu, CL, Entropy and probability concepts in hydraulics. *Journal of Hydraulic Engineering*. 1987 May 1; 113(5):583–600.
- [2]. Kean, JW, Kuhnle, RA, Smith, JD, Alonso, CV, Longendoen, J. Test of a method to calculate near-bank velocity and boundary shear stress. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2009 Feb 2; 135(7): 588-601.
- [3]. Maghrebi, MF. Ball, JE. New Method for Estimation of Discharge. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2006 Oct 1; 132(10): 1044-1051.
- [4]. Seo, IW, Beak, KO. Estimation of the longitudinal dispersion coefficient using the velocity profile in natural stream. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2004 Feb 19; 130(3): 227-236.
- [5]. Chanson, H. *The Hydraulics of open channel flow. An introduction basic principles, sediment motion, hydraulic modeling and design of hydraulic structures*. Second Edition, Elsevier. 2004. 544 pp.
- [6]. Chen, CL. An efficient method of discharge measurement. PhD Thesis, Dept. of Civil Engineering, University of Pittsburgh, PA. 1998. 345 pp.
- [7]. Carlos, DJ, Chaudhry, FH. Experimental evaluation of 2-D entropy model for open-channel flow. *Journal of Hydraulic Engineering*. 1998 Oct 1; 124(10):1064-1067.
- [8]. Ammari, A. Remini, B. Estimation of Algerian Rivers discharges based on Chiu's equation. *Arab Journal of Geosciences*. 2010 Feb 6; 3:59–65.
- [9]. Ardiclioglu, M, Genc, O, Kalin, L, Agiralioglu, N. Investigation of flow properties in natural streams using the entropy concept. *Water and Environment Journal*. 2012 Jun 7; 26(2): 147–154.
- [10]. Corato, G, Ammari, A, Moramarco, T. Conventional point-velocity records and surface velocity observations for estimating high flow discharge. *Entropy*. 2014 Oct 21; 16: 5546-5559.

به‌منظور مقایسه نتایج روش پیشنهادی با روش‌های محققان دیگر، در شکل ۱۱ نتایج توزیع دوبعدی سرعت جریان از روش هسو (۲۰۰۴) در دبی جریان ۲۰/۵۳ مترمکعب بر ثانیه ارائه شده است. در این روش، پارامتر  $N$  از شکل ۲ تعیین می‌شود. بر اساس  $M=3/22$  در ایستگاه آق‌قلا، از این شکل  $N$  حدود ۱/۶ به‌دست می‌آید. مقایسه نتایج شکل ۱۱ با شکل ۱۰-ب (روش پیشنهادی) نشان می‌دهد روش هسو مقادیر سرعت را بسیار بیشتر از روش پیشنهادی برآورد کرده است. افزایش مقادیر سرعت جریان در کناره‌های رودخانه بسیار بیشتر از ناحیه میانی رودخانه است. در این حالت دبی جریان حدود ۲۸/۴۵ مترمکعب بر ثانیه به‌دست می‌آید که در مقایسه با دبی واقعی (۲۰/۵۳) بیان‌کننده خطایی حدود ۳۸/۶ درصد است. همچنین میانگین خطای توزیع دوبعدی سرعت در این حالت حدود ۱۹/۲۵ درصد است. بنابراین، در مقایسه با دقت روش پیشنهادی، در هر دو جنبه تخمین دبی و توزیع سرعت جریان خطای به‌مراتب بیشتری دارد.

#### نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت فراوان توزیع دوبعدی سرعت جریان (میدان سرعت) در رودخانه‌ها و پیچیدگی محاسبه آن، ارائه راه‌حل‌های ساده و با دقت مناسب کاربرد زیادی خواهد داشت. در این تحقیق، با استفاده از ایده احتمالاتی چپو، روشی نسبتاً ساده و کاربردی برای محاسبه توزیع قائم و عرضی سرعت جریان در رودخانه‌ها پیشنهاد شده است. نتایج کاربرد این روش در رودخانه گرگان‌رود (ایستگاه هیدرومتری آق‌قلا) در دبی‌های مختلف جریان نشان داد پارامتر آنتروپی  $M$  در این ایستگاه حدود ۳/۲۲ است که به مقادیر به‌دست‌آمده در رودخانه‌های مختلف دنیا بسیار نزدیک است. همچنین بین مقادیر سرعت متوسط و سرعت بیشینه جریان رابطه خطی با ضریب تبیین بالا (۰/۹۶) برقرار است. با واسنجی پارامتر آنتروپی  $N$  به کمک نتایج میدان سرعت اندازه‌گیری‌شده در رودخانه در دبی‌های مختلف جریان، مشخص شد که این پارامتر با عمق حداکثر جریان در رودخانه ارتباط مستقیم دارد. نتایج میدان سرعت محاسباتی نسبت به مقادیر اندازه‌گیری‌شده دقت مناسبی دارد به‌طوری‌که بیشترین خطا در برآورد سرعت جریان حدود ۳/۳ درصد به‌دست آمد. با انجام فرایند صحت‌سنجی

- [11]. Farina, G, Alvisi, S, Franchini, M, Moramarco, T. Three methods for estimating the entropy parameter M based on a decreasing number of velocity measurements in a river cross-section. *Entropy*. 2014 May 9; 16(5): 2512-2529.
- [12]. Stosic, B, Sacramento, V, Filho, MC, Cantalice, JRB, Singh, VP. Computational approach to improving the efficiency of river discharge measurement. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2016 Aug 19; 21(12).
- [13]. Omid., MH, Karbasi, M. Application of entropy concept in solution of velocity distribution in open channels. 4th National Congress on Civil Engineering. Tehran. 2008 Apr 19. [Persian].
- [14]. Esmaeali Varaki, M, Ghorbani Nasrabadi, S, Navabian, M. Evaluation of entropy based chiu's method for prediction of the velocity distribution and discharge in rivers. *J. of Water and Soil Conservation*. 2013; 20(6): 147-164.
- [15]. Moramarco, T, Singh, VP. Formulation of the entropy parameter based on hydraulic and geometric characteristics of river cross sections. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2010 Apr 27; 15(10): 852-858.
- [16]. Chiu, CL. Entropy and 2-D velocity distribution in open channels. *Journal of Hydraulic Engineering*. 1988 Jul 1; 114(7):738-756.
- [17]. Chiu, CL, Chiou, JD. Structure of 3-D flow in rectangular open channels. *Journal of Hydraulic Engineering*. 1986 Feb 1; 112: 1050-1068.
- [18]. Cui, HJ, Singh, VP. Two-dimensional velocity distribution in open channels using the Tsallis entropy. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2013 Mar 15; 18(3): 331-339.
- [19]. Chiu, CL, Tung, NC. Maximum velocity and regularities in open-channel flow. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2002 Apr 1; 128(4):390-398.
- [20]. Hsu, SM. Probability-based simulation of 2-D velocity distribution and discharge estimation in open channel flow. PhD Thesis, The University of Pittsburgh, 2004. 127 pp.
- [21]. Ghoochi, S. Numerical solution of transverse and vertical distribution of flow velocity in open channels. MSc. Thesis, Dept. of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, 2014. 96 pp. [Persian]