

Application of SPM for Estimating the Velocity Index in Geometric Channels

Ramin Mohammadi¹, Mahmoud F. Maghrebi^{2*}, Seyyed Hossein Mojtahedi³

1- PhD Candidate, Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad.

2- Professor, Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad.

3- Assistant Professor, Civil Engineering Department, University of Gonabad.

* maghrebi@um.ac.ir

Received: 9 August 2025

Revised: 13 September 2025

Accepted: 8 October 2025

Discussion: 22 June 2026



J. Hydraul.

Iranian Hydraulic Association

Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: Accurate flow measurement in open channels is essential for applications such as flood risk assessment, hydropower generation, water resource management, and hydraulic modeling. Traditional in-situ discharge measurements using electromagnetic or mechanical instruments are labor-intensive, costly, and potentially hazardous under high-flow conditions. As a result, surface velocity-based methods including radar and image velocimetry have become increasingly popular for non-contact discharge estimation. A critical step in these methods is converting surface velocity (u_s) to depth-averaged velocity (U_d), typically using the velocity coefficient α . Although many studies report average α values ranging from 0.62 to 0.92 depending on bed roughness, flow depth, and channel geometry, a comprehensive understanding of α variation across geometric channels remains limited. Most existing approaches consider α as a constant, which may introduce significant error, especially in non-uniform or shallow flows. This study aims to address this gap by applying the Single Point Method (SPM), introduced by Maghrebi (2003), to quantify the variation of α across the free surface of geometric channels. Additionally, the study examines the relationship between α variations and isovel contours, and compares SPM results with previous empirical and experimental findings.

Methodology: The core concept of the velocity index α is rooted in establishing a functional relationship between the depth-averaged velocity (U_d) and a single-point measurement, typically the surface velocity (u_s). In this study, a power-law vertical velocity distribution is assumed to represent flow behavior, consistent with experimental observations and theoretical models. The Single Point Method (SPM) provides a semi-analytical approach to estimating point velocities within the channel cross-section based on boundary effects. Derived from analogies with the Biot-Savart law in electromagnetism, the method computes local velocities using an integral formulation that considers the geometry of the wetted perimeter, the relative roughness, and shear velocity parameters. A constant exponent $m=7$ is used in the velocity profile to model turbulent open-channel flow over smooth boundaries. To apply the SPM, each channel section (rectangular, trapezoidal, or triangular) is discretized into vertical strips, and point velocities at the free surface are computed at discrete locations. Under each surface point, a vertical band is analyzed to compute the depth-averaged velocity using numerical integration of the power-law profile. The local α at each surface point is then calculated as the ratio U_d/u_s . To obtain the overall α for the entire section, a discharge-weighted averaging approach is used. This methodology was implemented for multiple geometric configurations (varying B/H ratios and side slope m) and validated by comparison

with published data.

Results and Discussion: The SPM was applied to three types of channel cross-sections: rectangular ($n=0$), trapezoidal, and triangular ($B=0$), over a wide range of width-to-depth ratios (B/H) and side slopes (n). Isovel contours (lines of constant dimensionless velocity λ) were plotted to visualize the velocity distribution and examine the location of maximum flow velocities. In rectangular channels, increasing the B/H ratio shifts the location of maximum velocity toward the free surface, while in narrow sections (low B/H), it moves deeper into the cross-section. This pattern directly affects α : in wide channels, local α values near the centerline decrease, while in narrow channels, they increase. For trapezoidal channels, similar trends were observed. However, additional variations in α appeared near the sloped walls due to a decreasing effective strip height and a declining surface velocity, u_s . Triangular sections exhibited a strong concentration of α around the central region, with lower values at the deepest point. Average α values obtained for each cross-section type were: 0.73–1.04 for rectangular sections (increasing in narrower channels), 0.71–0.88 for trapezoidal sections (depending on B/H and n), and 0.78–0.88 for triangular sections (decreasing with side slope, n). The validation of discharge results using the cross-sectional α -coefficient against the experimental discharge and the measured surface velocity indicates a relative error below 5% and demonstrates a good agreement of the results. Furthermore, these results were consistent with previous studies (e.g., Fujita 2018; Welber et al. 2016), where α values in artificial channels typically ranged from 0.8 to 0.9. The maximum relative error between SPM-based α and literature values was under 12.7%. Notably, the study confirms that α varies significantly across the free surface and is sensitive to channel geometry, highlighting the limitation of assuming a constant α . Two empirical equations were also proposed to estimate α based on geometric parameters, with a maximum error of 2.18%.

Conclusions: This study demonstrates that the Single Point Method (SPM) can effectively model both surface and depth-averaged velocities in geometric channels and accurately estimate local and global α coefficients. The results emphasize that α is not constant and exhibits systematic variation across the free surface, depending on the channel geometry. The proposed method offers a cost-effective, non-contact alternative for discharge estimation and improves upon existing empirical assumptions. The findings validate the applicability of SPM for hydraulic analysis in artificial channels and support its extension to real-world flow conditions with complex geometries.

Keywords: Velocity index, Single point method, Surface velocity, Depth-averaged velocity, Geometric channel.

Conflict of Interest: The authors declared no potential conflicts of interest concerning the research, authorship, and publication of this article.

Funding: The authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Data Availability Statements: All information and results are presented in the text of the article. The datasets generated and/or analyzed during the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

Authors' contribution:

First Author: Introduction, Methodology, and Data Analysis.

Second Author: Review of Results, Article Revision.

Third Author: Abstract, Discussion, and Results.

کاربرد SPM در تخمین ضریب سرعت در کانال‌های هندسی

رامین محمدی^۱، محمود فغفور مغربی^{۲*}، سید حسین مجتهدی^۳

۱- دانشجوی دکتری، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

۲- استاد، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

۳- استادیار، گروه عمران، مجتمع آموزش عالی گناباد.

*maghrebi@um.ac.ir

نشریه هیدرولیک

انجمن هیدرولیک ایران

وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir



دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۱۸

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۲۲

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۱۶

نقد و بررسی: ۱۴۰۵/۰۴/۰۱

چکیده: مقدار ضریب سرعت (α) و تغییرات آن در عرض سطح آزاد آب در کانال‌های هندسی تاکنون به‌طور مشخص بررسی و ارزیابی نشده است. در این پژوهش، با استفاده از روش تک نقطه‌ای (SPM)، که یک روش آسان و کم‌هزینه است، تغییرات ضریب سرعت در عرض سطح آزاد آب در کانال‌های هندسی بررسی و ارزیابی شده است. این ضریب با استفاده از روش یادشده و با در نظر گرفتن توزیع قائم سرعت توانی، برای هر نقطه از سطح آزاد آب به‌دست آمده و آن‌گاه ضریب سرعت برای کل مقطع، به‌صورت میانگین وزنی محاسبه شد. صحت‌سنجی نتایج با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی انجام شد که با توجه به خطای نسبی زیر ۵٪، نشان‌دهنده دقت بسیار خوب مدل SPM است. نتایج نشان می‌دهند که در همه مقطع‌های هندسی، با باریک شدن مقطع کانال، محل سرعت بیشینه از سطح آزاد آب دور شده و مقدار ضریب α محلی افزایش می‌یابد ($\alpha=1.04$ در کانال مستطیلی باریک) و در کانال‌های عریض، محل سرعت بیشینه به سطح آزاد نزدیک شده و مقدار ضریب α محلی کاهش پیدا می‌کند ($\alpha=0.714$ در کانال دوزنقه‌ای عریض). بنابراین، ارتباط کلی بین تغییرات منحنی‌های هم‌سرعت و ضریب α نتیجه گرفته و مشخص شد مقدار پیش‌فرض ۰.۸۵ برای ضریب سرعت نمی‌تواند در همه شرایط هندسی قابل کاربرد باشد. علاوه‌افزون بر این، مقایسه‌هایی بین ضریب سرعت به‌دست آمده از SPM و دیگر پژوهش‌ها انجام شد که نشان داد محدوده تغییرات به‌دست آمده برای ضریب α در کانال‌های هندسی، در محدوده قابل قبول است و مقدارهای خطای نسبی در شرایط همانند از ۰.۹۲٪ تا ۱۲.۶۷٪ متغیر است.

کلیدواژه‌ها: ضریب سرعت، روش تک نقطه‌ای، سرعت سطحی، سرعت میانگین عمقی، کانال هندسی.

۱- مقدمه

حجمی جریان می‌توان به سرعت سنج‌های داپلر صوتی^۱ یا اندازه‌گیری‌های جریان با هر دو روش الکترومغناطیسی یا مکانیکی در عرض مقطع جریان رودخانه اشاره کرد. این اندازه‌گیری‌های مستقیم باید به دفعات متعدد در یک سال در هر ایستگاه، اندازه‌گیری شود که فرآیند آن را زمان‌بر، پرهزینه و به‌طور بالقوه خطرناک می‌کند (Johnson and

اندازه‌گیری جریان رودخانه برای ارزیابی خطر سیلاب، تخصیص منابع آب، تولید برق‌آبی، پایش سلامت اکوسیستم، مهار آلودگی و مدل‌سازی هیدرولیکی و هیدرولوژیکی ضروری است (Smart and Biggs, 2020). از جمله روش‌های تماسی و مستقیم برای اندازه‌گیری دبی

سرعت را برای جریان‌های کم عمق برابر 0.85 پیشنهاد کرده‌اند. (Polatel (2006) بازه ضریب سرعت را برای کانال‌ها با انواع مختلف شکل زبری، 0.91~0.659 ارائه کرده است. (Turnipseed and Sauer (2010) بیان می‌کنند که بر مبنای تجربه، بطور کلی ضریب سرعت از حدود 0.84 تا 0.9، بسته به شکل توزیع منحنی سرعت عمودی، تغییر می‌کند. (Le Coz et al. (2010) در نتایج پژوهش خود بیان می‌کنند که کاربرد مقدار استاندارد α بر مبنای سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده آمریکا^۴ برابر 0.85، بزرگترین عامل خطا در برآورد دبی حجمی است. (Muste et al. (2011) پیشنهاد می‌کنند که برای جریان در رودخانه‌های طبیعی، شاخص سرعت می‌تواند در عرض سطح مقطع رودخانه بطور گسترده‌ای تغییر کند و کاربرد یک مقدار ثابت یکتا می‌تواند نامناسب باشد. تأثیر جریان‌های ثانویه بر ضریب سرعت توسط (Gunawan et al. (2012) بررسی و ارزیابی شد. آنان تغییرات جانبی ضریب سرعت را از 0.86 تا 1.18 پیشنهاد دادند. در پژوهش (Osorio-Cano et al. (2013) برای کانال آزمایشگاهی، مقدار شاخص سرعت در بازه 0.77~0.62 ارائه شده است.

در پژوهش (Johnson and Cowen (2016) مقدار ضریب α برای بستر صاف بین مقدارهای 0.82 تا 0.93 بدست آمده است. افزون بر این، تغییرات در سطح مقطع رودخانه نیز می‌تواند منجر به تغییر در شاخص سرعت شود (Johnson and Cowen, 2017). (Moramarco et al. (2017) به بررسی و ارزیابی تغییرات ضریب سرعت برای نسبت‌های ابعادی بزرگ در رودخانه‌ها پرداختند و α را برابر 0.85 پیشنهاد کردند. در نتایج پژوهش (Hauet et al. (2018) مقدار میانگین α برای رودخانه‌های طبیعی (دارای ماسه، قلوه‌سنگ یا سنگ‌های درشت) برابر با 0.8 و برای کانال‌های مصنوعی بتنی برابر با 0.9 پیشنهاد شده است (Hauet et al., 2018). (Fujita (2018) در نتایج پژوهش خود بیان می‌کند که بطور کلی، رودخانه‌های کوچک‌تر با بسترهای زبر، مقدارهای α کمتری از خود نشان می‌دهند؛ در حالی که کانال‌های بتنی مصنوعی مقدارهای α بالاتری

(Cowen, 2016). برای چیره شدن بر این محدودیت‌ها، اندازه‌گیری دبی با استفاده از رادار سرعت سطحی^۱ (Welber et al., 2016)، روش‌های نقشه‌برداری هوایی از ساحل‌های رودخانه (Le Coz et al., 2010; Fujita et al., 2018) و پهپادها (Detert et al., 2017) به‌طور فزاینده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این روش‌ها، سرعت سطحی (u_s) برآورد می‌شود. روش‌های سرعت‌سنجی سطحی مدت-ها است که برای اندازه‌گیری جریان رودخانه استفاده می‌شوند (Rantz, 1982). طیف گسترده‌ای از تجهیزات و روش‌ها برای اندازه‌گیری سرعت سطحی وجود دارند، مانند استفاده از شناورها (Costa et al., 2000) و سرعت‌سنجی تصویری سطحی^۲ (Fujita et al., 1998). در پژوهش‌های (Jolley و Gunawan et al. (2012), Fujita et al. (1998) et al. (2021)، از سرعت‌سنجی تصویری ذرات در مقیاس بزرگ^۳ استفاده شده است. در پژوهش‌های (Kinzel and Legleiter (2019) و Cao et al. (2020) از پهپاد و تصویربرداری هوایی برای اندازه‌گیری جریان سطحی و محاسبه دبی رودخانه استفاده می‌کنند. پژوهش انجام شده توسط (Dolcetti et al. (2022)، پتانسیل برآورد سرعت سطحی، عمق آب، سرعت میانگین عمقی و در نهایت دبی یک رودخانه را تنها با استفاده از یک توالی از تصویرهای سطح آب متحرک بررسی می‌کند. یک منبع عمده عدم قطعیت در برآورد دبی، تبدیل سرعت سطحی به سرعت میانگین عمقی (U_d) است. این ضریب تبدیل، به نام ضریب سرعت، شاخص سرعت، ضریب α یا به اختصار α گفته می‌شود (Biggs et al., 2023).

مقدار استاندارد α به‌طور معمول 0.85 یا 0.86 در نظر گرفته شده و در یک کانال مصنوعی صاف، ضریب سرعت سطحی 0.9 استفاده می‌شود (Rantz, 1982). (Rantz (1982) در نتیجه پژوهش خود بیان کرد که مقدار شاخص سرعت α برای یک کانال و موقعیت مشخص اندازه‌گیری در مقطع کانال، منحصر بفرد است. همچنین توضیح می‌دهد که مقدارهای ضریب سرعت در نزدیکی دیواره کانال افزایش پیدا می‌کند. (Weitbrecht et al. (2002) مقدار شاخص

2. Surface Image Velocimetry
3. Large Scale Particle Image Velocimetry
4. United States Geological Survey (USGS)

1. Surface Velocity Radar

تقریب قابل قبول عمل می‌کند و بطور کلی برای بسیاری از شرایط جریان، از جمله کانال‌های مستطیلی عریض، قابل قبول است.

اگرچه ضریب α یک جزء مهم در اندازه‌گیری جریان با استفاده از سرعت‌سنجی سطحی است، اما کمبود اطلاعات منتشر شده در مورد بهترین روش برای برآورد این پارامتر وجود دارد (Biggs et al., 2023). همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در بسیاری از پژوهش‌ها، بطور مشخص به محاسبه سرعت سطحی و ضریب α در کانال‌های هندسی پرداخته نشده و تنها به مقدار کلی α برای کانال‌های مصنوعی اشاره شده است.

برای محاسبه سرعت در هر نقطه از سطح مقطع کانال‌های باز که می‌تواند منجر به رسم تغییرات خطوط هم‌سرعت در مقطع کانال شده و همچنین سرعت سطحی نیز قابل محاسبه باشد، روشی موسوم به روش تک نقطه‌ای^۱ نیز استفاده شده است. این روش توسط (Maghrebi 2003) معرفی شد. (Maghrebi and Rahimpour 2005). Maghrebi and Ball (2006) و Maghrebi (2006) دبی را در کانال‌های مستطیلی با استفاده از روش اندازه‌گیری سرعت تک نقطه‌ای (SPM) برآورد کردند و دقت مدل را با داده‌های اندازه‌گیری شده آزمایشگاهی اعتبارسنجی کردند. نتایج بدست آمده دلالت بر این داشتند که دبی بدست آمده با استفاده از این رویکرد، دارای دقت بالایی است. افزون بر این، دبی می‌تواند با سرعت بالاتر و هزینه کمتری برآورد شود (Maghrebi and Ahmadi, 2017).

از آنجا که مرور منابع نشان می‌دهد، محدوده ضریب سرعت در پژوهش‌های پیشین بسیار گسترده بوده و تا کنون پژوهشی بطور مشخص در مورد مقدار ضریب α و تغییرات آن در کانال‌ها با مقطع‌های هندسی انجام نشده است. بنابراین، هدف این پژوهش به‌طور خاص بر کاربرد روش تک نقطه‌ای، که یک روش کم‌هزینه و آسان در مقایسه با روش‌های آزمایشگاهی و میدانی است، در محاسبه و برآورد ضریب سرعت α در مقطع‌های هندسی تمرکز دارد. افزون بر بدست آوردن خطوط هم‌سرعت در مقطع هندسی کانال‌های دوزنقه‌ای و مثلثی، نوآوری‌های این پژوهش

دارند. بر مبنای این پژوهش، جدول ۱ برای مقدار ضریب سرعت بر مبنای مقدار زبری بستر کانال ارائه شده است. در این جدول، توزیع سرعت در مقطع کانال، توانی فرض شده و m نشان دهنده توان رابطه است (Fujita, 2018):

$$\frac{u(y)}{u_s} = \left(\frac{y}{h}\right)^{1/m} \quad (1)$$

در این رابطه، y مختص عمودی، h ارتفاع کانال، m پارامتر زبری و u_s سرعت سطحی هستند (Fujita, 2018).

جدول ۱ مقدار ضریب سرعت بر مبنای زبری بستر و مقدار m در رابطه توانی توزیع سرعت (Fujita, 2018)

Table 1 Velocity index values based on bed roughness and m values

Roughness	Normal	Smooth	Rough	Very rough	Extreme cases
m	6~7	10	4	2~3	
α	0.86~0.87	0.91	0.80	0.67~0.75	0.6~1.2

مقدار ضریب α که از قانون توان $1/6$ نیمرخ سرعت پیروی می‌کند، 0.857 ناشی می‌شود (Smart and Biggs, 2020). در مقاله Smart and Biggs (2020)، تأثیر جریان‌های کم‌عمق بر ضریب α بررسی شده است. بر مبنای نتایج بدست آمده، برای عمق نسبی کوچک، مقدار α حدود 0.5 برآورد شد و با افزایش عمق نسبی، α به مقدارهای بزرگتری نزدیک می‌شود (تا 0.9). (Randall 2021). در نتایج پژوهش خود بیان می‌کند که نسبت عرض به عمق کانال، تغییرات عمق آب، زبری بستر کانال، سازه‌های آبی موجود در مسیر جریان، پوشش گیاهی بستر کانال و باد بر ضریب α تأثیرگذار هستند. در گزارش Biggs et al. (2021) توصیه شده است که در صورت وجود موج‌های سطحی یا اثرگذاری‌های آشکار باد، از روش‌های تصویربرداری سطحی استفاده نشود و انتخاب مناسب روش برآورد α به ویژگی‌های سایت و داده‌های موجود بستگی دارد. در نتایج پژوهش (Ghorbani et al. 2023) نیز ارزیابی آزمایشگاهی عامل‌های مؤثر بر شاخص سرعت در کانال‌های باز انجام و مقدار میانگین این شاخص 0.92 برآورد شد. (Biggs et al. 2023) توصیه می‌کنند زمانی که هیچ اطلاعات مشخصی از سایت در دسترس نباشد، مقدار استاندارد 0.857 به‌عنوان یک

1. Single Point Method (SPM)

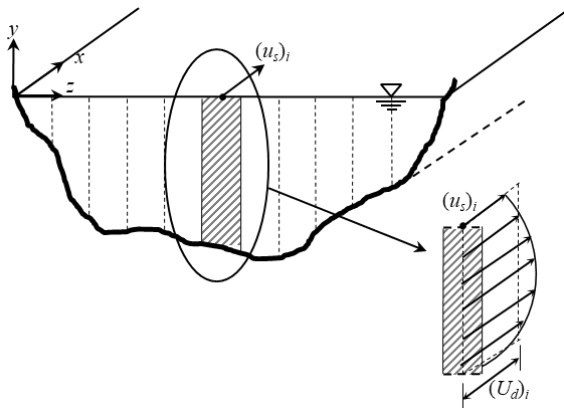


Fig. 1 Surface velocity and depth-averaged velocity
شکل ۱ سرعت سطحی و سرعت میانگین عمقی در کانال

در این شکل، سطح مقطع کانال به نوارهای قائم تقسیم شده است. نوار i ام به صورت هاشورخورده مشخص شده که در آن، $(u_s)_i$ سرعت سطحی ناشی از توزیع قائم سرعت است که با خط پر نشان داده شده و $(U_d)_i$ نیز میانگین سرعت عمقی است که با خط چین نمایش داده شده است. بنابراین، با برآورد سرعت سطحی و سرعت میانگین عمقی در هر نوار، می‌توان تغییرات ضریب سرعت α را در عرض سطح آزاد بدست آورد.

۲-۲- اصول حاکم بر روش تک نقطه‌ای

دیدگاه اصلی SPM از قانون بایو-ساوار^۲ در الکترومغناطیس استخراج شده و آن‌گاه همانندی بین میدان مغناطیسی و خطوط هم‌سرعت در هیدرولیک برای فرمول‌بندی آن استفاده شده‌اند (Maghrebi and Ball, 2006). بدست آوردن منحنی‌های هم‌سرعت، پیشتر، با هدف برآورد دبی بر مبنای SPM برای کانال‌های مستطیلی گزارش شده است (Maghrebi, 2006). کاربرد دیگری از این روش که در این پژوهش به آن پرداخته می‌شود برای به‌دست آوردن سرعت‌های سطحی در کانال‌های هندسی و برآورد ضریب سرعت α است.

شکل ۲، هندسه کلی مقطع دوزنقه‌ای را بر اساس رویکرد مورد استفاده در SPM نشان می‌دهد. M یک نقطه دلخواه از سطح مقطع است که می‌توان برای بدست آوردن سرعت‌های سطحی، آن را روی سطح آزاد آب نیز انتخاب

شامل محاسبه ضریب α و بررسی تغییرات آن در عرض سطح آزاد آب در کانال و بدست آوردن ضریب سرعت برای کل مقطع هستند.

برای دستیابی به این هدف‌ها، روش تک نقطه‌ای، هم برای محاسبه سرعت سطحی و هم سرعت‌های میانگین عمقی در مقطع کانال، استفاده شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مفهوم شاخص سرعت

مفهوم برقراری رابطه بین سرعت میانگین عمقی (U_d) و یک اندازه‌گیری نقطه‌ای از سرعت، شاخص‌گذاری^۱ نامیده می‌شود (Polateli, 2006). برای برآورد دبی کانال یا رودخانه، نیاز به یک رابطه تابعی وجود دارد که سرعت اندازه‌گیری‌شده در یک نقطه را به سرعت میانگین عمقی مرتبط کند. اگر سرعت سطح آزاد (u_s) به‌عنوان سرعت مبنای شاخص‌گذاری در نظر گرفته شود، آنگاه شاخص سرعت α ، به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\alpha = U_d / u_s \quad (2)$$

این رابطه فرض می‌کند که نیمرخ قائم سرعت را می‌توان با یک قانون لگاریتمی یا قانون توانی توصیف کرد. اما بطور کلی، تعیین دقیق این ضریب‌ها دشوار بوده و ممکن است با تغییر تراز آب، عمق و موقعیت عرضی در مقطع تغییر کند (Fulton et al., 2020). اگرچه استفاده از سرعت سطحی برای برآورد دبی رودخانه روش به‌نسبت کارآمدی است، اما همچنان لازم است که ضریب‌های سرعت سطحی برای همه مقاطع‌های قائم انتخاب شوند تا دبی جریان با دقت کافی برآورد شود (Chen et al., 2022). Gunawan et al. (2012) در نتیجه پژوهش خود بیان کردند که به دلیل توزیع پیچیده جریان‌های ثانویه که ناشی از آشفتگی ناهمسانگرد و یا هندسه رودخانه است، شاخص سرعت به‌صورت عرضی در سراسر مقطع و همچنین بین مقاطع‌های مختلف تغییر می‌کند. مفهوم ضریب سرعت یاد شده در رابطه (۱) و تغییرات آن در عرض مقطع، در شکل ۱ و برای یک مقطع دلخواه از کانال باز نشان داده شده است.

1. Indexing
2. Biot-Savart

عمودی y از دیواره، $u^* = \sqrt{\tau_0 / \rho}$ سرعت برشی مرز که تنش برشی مرز و ρ چگالی سیال هستند، k_s زبری معادل ماسه نیکورادزه، c ضریبی است که برای جریان‌های به‌طور کامل صاف از نظر هیدرولیکی با عدد رینولدز و برای جریان‌های کاملاً زبر با زبری نسبی تغییر می‌کند و توان m به‌طور معمول بین ۴ تا ۱۲ بسته به شدت آشفتگی متغیر است (Yen, 2002). با این حال، مقدار $m=7$ با شمار زیادی از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی نیمرخ‌های سرعت آشفتگی برای مرزهای صاف، همخوانی خوبی دارد (Chen, 1991). برای تابع $f(r)$ در رابطه (۴)، می‌توان از رابطه (۵) استفاده کرده و آن را به‌صورت زیر نوشت:

$$f(r) = u^* (c_2 r^{1/m}) \quad (6)$$

که در آن، c_2 به زبری مرز و طبیعت جریان بستگی دارد. با قرار دادن تابع $f(r)$ از رابطه (۶) در رابطه (۴)، سرعت نقطه‌ای محلی در هر موقعیت دلخواه در مقطع کانال با مختصات (y, z) در شکل (۱-ب)، $u_{SPM}(y, z)$ ، به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$u_{SPM}(y, z) = \int_{boundary} c_1 c_2 u^* (r^{1/m}) \sin \theta ds \quad (7)$$

با در نظر گرفتن مقدار $c_3 = c_1 c_2$ و $m=7$ رابطه (۷) می‌تواند به‌صورت زیر نوشته شود:

$$u_{SPM}(y, z) = \int_{boundary} u^* (c_3 r^{1/7}) \sin \theta ds \quad (8)$$

سرعت نقطه‌ای در اثر محدودیت‌های زیر است (Maghrebi and Ball, 2006): (۱) توزیع سرعت در زیر لایه لزوج همیشه خطی باقی می‌ماند، (۲) سایر مرزها نمی‌توانند بر سرعت در زیر لایه لزوج تأثیری داشته باشند و (۳) بدلیل شرایط نداشتن لغزش، سرعت در امتداد محیط خیس شده، صفر است. سرعت محلی در امتداد جریان توسط رابطه (۸) بدست خواهد آمد. آن‌گاه، سرعت میانگین با استفاده از پیوستگی به‌صورت زیر قابل محاسبه است:

کرد. B عرض بستر، H ارتفاع آب، n شیب جداره کانال، ds بردار مرز بر روی محیط خیس شده کانال، r بردار مکان تا نقطه M ، θ زاویه بین بردار مرز و بردار مکان و du بردار سرعت عمود بر صفحه سطح مقطع کانال هستند. مبدأ مختصات نیز در وسط عرض بستر کانال نشان داده شده است.

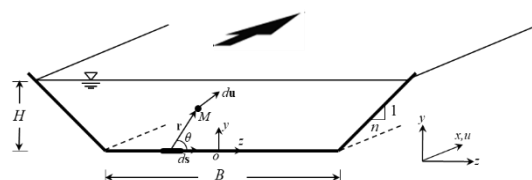


Fig. 2 Cross-sectional geometry used to illustrate boundary effects on the velocity at an arbitrary point M in SPM

شکل ۲ هندسه مقطع برای نشان دادن اثرات مرز بر سرعت یک نقطه دلخواه مانند M در SPM

از شکل ۲ مشاهده می‌شود که محیط خیس شده سطح مقطع به المان‌های دیفرانسیلی ds تقسیم می‌شود. اثر ds از محیط خیس شده بر سرعت یک نقطه دلخواه از سطح مقطع به مختصات (y, z) برابر du_{SPM} است که می‌تواند از معادله برداری زیر محاسبه شود (Maghrebi, 2006):

$$du_{SPM} = f(r) \times c_1 ds \quad (3)$$

بنابراین، اثرگذاری‌های کل مرز بر روی هر المان را می‌توان با انتگرال‌گیری به‌صورت زیر به‌دست آورد:

$$u_{SPM}(y, z) = \int_{boundary} c_1 f(r) \sin \theta ds \quad (4)$$

در این رابطه، c_1 ثابتی است که بستگی به تنش برشی مرز، شدت آشفتگی و زبری نسبی دارد، θ زاویه بین بردار موقعیت r و بردار المان مرز ds است و $f(r)$ نیز تابع سرعت حاکم بر حسب r است. (Chen 1991) تشریح کرد که قانون توانی توزیع سرعت می‌تواند از یک معادله دیفرانسیل با مشتقات جزئی که توصیف‌کننده جریان آشفتگی یکنواخت دائمی سیال در یک لوله یا یک کانال باز است، استخراج شود که به‌صورت زیر است:

$$\frac{u}{u^*} = c \left(\frac{y}{k_s} \right)^{1/m} \quad (5)$$

که در آن، u سرعت محلی در راستای جریان در فاصله

۲-۳- کاربرد SPM در محاسبه ضریب سرعت

کاربرد روش SPM برای محاسبه سرعت سطحی و ضریب سرعت α بشرح زیر است. بر مبنای شکل ۲ اگر نقاط دلخواه M بر روی سطح آزاد در نظر گرفته شوند، می‌توان بر مبنای رابطه (۸)، سرعت سطحی را برای نقطه‌های مختلف سطح آزاد بدست آورد که برای شکل ۳ با $u_s(z_i, H)$ نشان داده شده است. آن‌گاه اگر در زیر هر نقطه از سطح آزاد آب یک نوار عمودی به ارتفاع H_i تا مرز کانال در نظر گرفته شود، می‌توان سرعت نقطه‌های مختلف را در هر نوار عمودی با استفاده از رابطه (۸) محاسبه کرده و با استفاده از رابطه (۹)، سرعت متوسط عمقی، $(U_d)_i$ ، را در هر نوار بدست آورد. در نتیجه، برای هر نقطه از سطح آزاد آب در کانال، یک مقدار ضریب α بدست خواهد آمد که به آن ضریب α محلی نیز گفته می‌شود. آن‌گاه می‌توان تغییرات مقدارهای آن را در عرض سطح آزاد به‌زای B/H و n های مختلف رسم کرد.

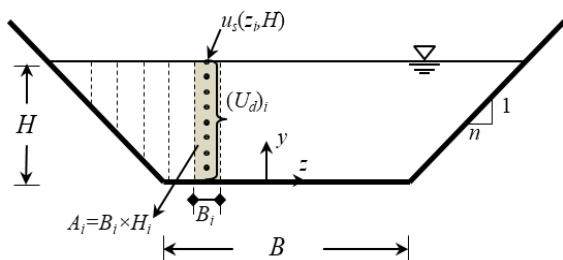


Fig. 3 Method for calculating the local velocity index
شکل ۳ چگونگی محاسبه ضریب سرعت محلی

هرچند که در برخی از مقالات یک مقدار ضریب α برای کل مقطع ارائه شده است اما با توجه به تغییرات سرعت سطحی در نقطه‌های مختلف عرض سطح آزاد کانال، منطقی است که ضریب α نیز باید در عرض سطح آزاد متغیر باشد. رویکرد پیشنهادی ارائه شده توسط Pumo et al. (2025) بر این فرض استوار است که استفاده از یک α کلی یکسان برای کل مقطع عرضی اغلب نامناسب است زیرا تغییرپذیری α در طول سطح آزاد را در نظر نمی‌گیرد. با این حال، به‌عنوان یک روش جایگزین می‌توان بر مبنای روش محاسبه مقادیر ضریب α محلی، مقدار میانگین آن را برای کل مقطع بدست آورد. اگر هر مقدار آلفای محلی متناظر با یک بخش از کانال باشد، آنگاه آلفای میانگین برای

$$U = \frac{\int_A u_{SPM}(y, z) dA}{A} = \frac{\int_{boundary} [u_* (c_3 r^{1/m}) \sin \theta ds]}{A} \quad (9)$$

سرعت نقطه‌ای نرمال شده، u_* با استفاده از نسبت معادله‌های (۸) و (۹) به‌دست خواهد آمد:

$$\lambda = \frac{u_{SPM}(y, z)}{U} = \frac{\int_{boundary} u_* (c_3 r^{1/m}) \sin \theta ds}{(1/A) \int_{boundary} [u_* (c_3 r^{1/m}) \sin \theta ds] dA} \quad (10)$$

اندازه‌گیری‌های موفق سرعت برشی نادر است. تنش برشی محاسبه و اندازه‌گیری شده در امتداد پیرامون خیس شده در کانال‌های منظم نشان می‌دهند که به‌جز در منطقه‌های محدود نزدیک به گوشه‌ها، توزیع به‌تقریب یکنواختی را می‌توان مشاهده کرد. این موضوع به نوبه خود، توزیع سرعت برشی را یکنواخت‌تر می‌کند (Nezu and Nakagawa, 1993). با فرض مقدار ثابت برای u_* ، رابطه (۱۰) به‌شکل تفاضل محدود به‌صورت زیر ساده خواهد شد:

$$\lambda = \frac{\sum_{boundary} (c_3 r^{1/m}) \sin \theta \delta s}{(1/A) \sum_A \left[\sum_{boundary} (c_3 r^{1/m}) \sin \theta \delta s \right] \delta A} \quad (11)$$

معادله (۱۱)، سرعت نرمال شده در یک نقطه را به‌عنوان یک تابع ساده از هندسه مرز و زبری نسبی، c_3 ، ارائه می‌کند. در نتیجه، سرعت میانگین می‌تواند تنها با یک اندازه‌گیری، $u(y, z)_M$ ، به‌صورت زیر به‌دست آید:

$$U = \frac{u(y, z)_M}{\lambda_M} \quad (12)$$

برتری مدل پیشنهادی SPM، در نظر گرفتن ویژگی‌های هیدرولیکی مرز و اثر آن‌ها بر جریان است. برای تغییر شرایط مرز مانند زبری یا سرعت برشی، ضروری است که تنها مقدار نسبی c_3 در رابطه (۱۱) تغییر داده شود (Maghrebi and Ball, 2006).

مشاهده کرد. به دلیل نادیده گرفتن اثر مرز، مانند تفاوت زبری بستر یا گردابه‌های کوچک در نزدیکی مرز، می‌توان برخی انحراف‌ها را در نزدیکی کناره‌ها مشاهده کرد (Maghrebi, 2006).

۳- نتایج و بحث

۳-۱- خطوط هم‌سرعت در کانال‌های هندسی

برای بررسی تغییرات سرعت نرمال شده λ در کانال‌های هندسی، سه مقطع دوزنقه‌ای، مستطیلی ($m=0$) و مثلثی ($B=0$) در نظر گرفته شده‌اند. بر مبنای SPM، مقدارهای λ بر مبنای رابطه (۱۰) یا (۱۱) محاسبه شده و به شکل منحنی‌های هم‌سرعت در مقطع‌های این کانال‌ها ترسیم می‌شوند. در این مرحله، ابتدا خطوط هم‌سرعت برای مقطع مستطیلی و بر حسب نسبت‌های مختلف B/H ترسیم و با نتایج Maghrebi and Rahimpour (2005) و Maghrebi (2006) مقایسه شده و در ادامه، منحنی‌های هم‌سرعت برای مقطع‌های دوزنقه‌ای و مثلثی ترسیم خواهند شد. در نتیجه پژوهش Maghrebi and Ball (2006) نیز منحنی‌های هم‌سرعت برای مقطع مستطیلی به دست آمده است. محورهای افقی و قائم به صورت بدون بعد، z/B و y/H ، نشان داده می‌شوند.

منحنی‌های هم‌سرعت λ برای یک مقطع مستطیلی با مقدارهای $B/H=0.5, 1, 4, 10, 20$ در شکل ۴ نشان داده شده‌اند تا نتایج مربوط به SPM کنترل شوند. بررسی نتایج بر مبنای شکل ۴ نشان می‌دهند که منحنی‌های هم‌سرعت و تغییرات آن در سطح مقطع یک کانال مستطیلی بر حسب تغییرات B/H منطقی و بر مبنای نتایجی است که در نتایج پژوهش‌های Maghrebi and Rahimpour (2005) و Maghrebi (2006) به آن پرداخته شده است. در یک کانال با مقطع مستطیلی، هر چه نسبت B/H کاهش یابد، بیشینه سرعت به مرکز کانال نزدیک شده و از سطح آزاد آب دور می‌شود (یعنی بیشینه سرعت در سطح آزاد آب رخ نخواهد داد) و هر چه نسبت B/H افزایش یابد، بیشینه سرعت به سطح آب نزدیک خواهد شد و منحنی‌های هم‌سرعت، موازی بستر کانال مستطیلی خواهند بود.

کل مقطع را می‌توان به صورت میانگین وزنی بر اساس دبی آلفاهای محلی در همه‌ی بخش‌های کانال (منظور از هر بخش، دبی در هر نوار عمودی است؛ به عنوان مثال نوار هاشورخورده در شکل ۳) به دست آورد (Biggs et al., 2016; Welber et al., 2023). این روش را می‌توان به صورت رابطه زیر نوشت:

$$\alpha_{ave} = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i Q_i}{\sum_{i=1}^n Q_i} \quad (13)$$

که در این رابطه، α_i و Q_i ، به ترتیب، مقدارهای ضریب سرعت و دبی در نوار عمودی i ام از مقطع کانال هستند. بر اساس رابطه (۱۳)، می‌توان یک آلفای میانگین‌گیری شده وزنی بر مبنای دبی هر آلفای محلی به دست آورد. در رابطه (۱۳)، Q_i را می‌توان با استفاده از روش USGS محاسبه کرد (Johnson and Cowen, 2016). دبی برای هر نوار مانند شکل ۳ برابر است با:

$$Q_i = (B_i H_i) (\alpha_i \times u_s(z_i, H)) = (A_i) (U_d)_i \quad (14)$$

که در آن Q_i (m^3/s)، دبی حجمی و برابر حاصل ضرب سرعت میانگین عمقی هر بخش از سطح مقطع، $(U_d)_i$ (m/s)، در مساحت آن بخش (حاصل ضرب عرض هر بخش، B_i (m))، در عمق میانگین آن، H_i (m) می‌باشد (Rantz, 1982). قابل یادآوری است برای نوارهایی که بر روی سطح شیبدار قرار می‌گیرند (در مقطع‌های هندسی دوزنقه‌ای و مثلثی)، ارتفاع میانگین یا ارتفاع مؤثر نوار برای H_i در نظر گرفته خواهد شد.

۲-۴- اعتبارسنجی SPM در محاسبه سرعت

سطحی و سرعت میانگین عمقی

دقت روش SPM در مورد سرعت میانگین عمقی و سرعت سطحی، به ترتیب، از طریق داده‌های اندازه‌گیری شده از رودخانه‌های Severn در بریتانیا و Unon در ژاپن ارزیابی شده است (Maghrebi, 2006). نتایج بدست آمده نشان دادند که مقدارهای پیش‌بینی شده مدل SPM روی دشت سیلابی کمی کمتر از داده‌های اندازه‌گیری شده است، با این حال، در کل می‌توان همخوانی خوبی بین سرعت سطح آب اندازه‌گیری شده و مقدارهای سرعت میانگین عمقی اندازه‌گیری شده با مقدارهای پیش‌بینی شده

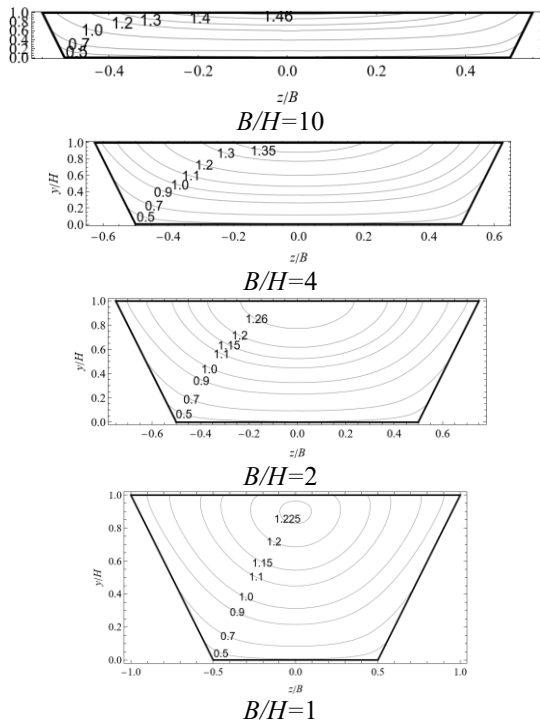


Fig. 5 Contour plots of velocity distribution in trapezoidal channels for $n=0.5$
 شکل ۵ نمودار تغییرات خطوط هم‌سرعت در سطح مقطع کانال دوزنقه‌ای به ازای $n=0.5$

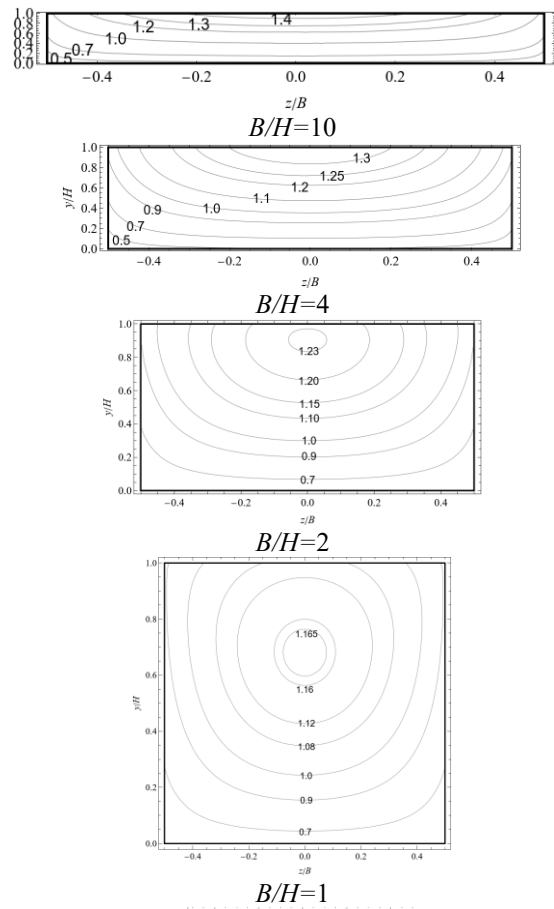


Fig. 4 Contour plots of velocity distribution in rectangular channels for different B/H ratios
 شکل ۴ نمودار تغییرات خطوط هم‌سرعت در سطح مقطع کانال مستطیلی به ازای B/H های مختلف

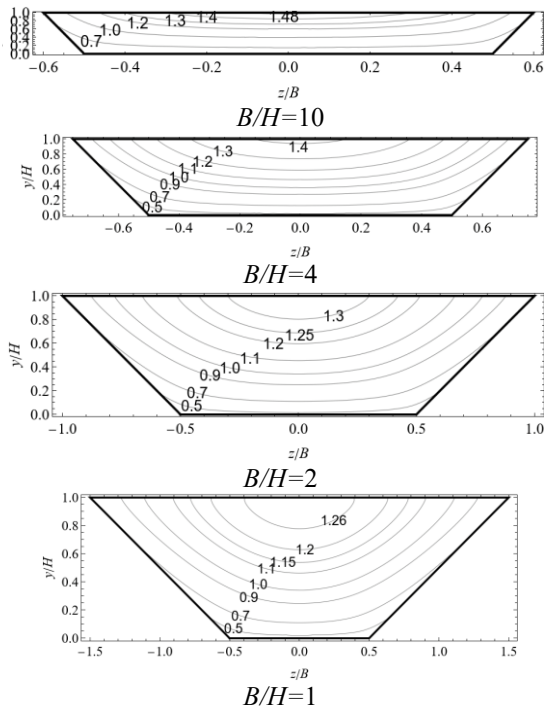
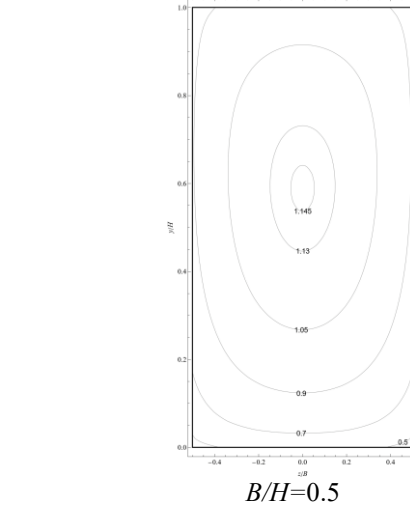


Fig. 6 Contour plots of velocity distribution in trapezoidal channels for $n=1$
 شکل ۶ نمودار تغییرات خطوط هم‌سرعت در سطح مقطع کانال دوزنقه‌ای به ازای $n=1$



بر مبنای روش تک نقطه‌ای، مشابه مقطع مستطیلی، به‌ترتیب نمودار تغییرات منحنی‌های هم‌سرعت در سطح مقطع کانال دوزنقه‌ای به‌ازای B/H های مختلف و $n=0.5$ و $n=1$ و سطح مقطع کانال مثلثی با n های مختلف در شکل‌های ۵، ۶ و ۷ نشان داده شده‌اند.

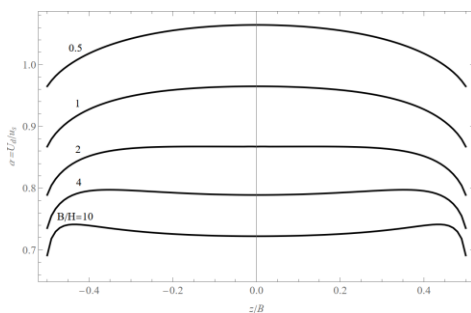


Fig. 8 Variation of the velocity index across the free surface of rectangular channel for various B/H ratios
شکل ۸ نمودار تغییرات ضریب سرعت در عرض سطح آزاد آب در کانال مستطیلی

ضریب α نشان داده شده در شکل ۸، ضریب آلفای محلی (Pumo et al., 2025) نیز نام دارد؛ چون مقدار آن در عرض سطح آزاد متغیر است. در شکل ۸ مشاهده می‌شود که در کانال‌های عریض، ($B/H \geq 4$)، مقدار α در وسط مقطع کمتر بوده و به تدریج و با دور شدن از وسط مقطع افزایش می‌یابد؛ اما در کناره‌های کانال به سرعت کاهش پیدا می‌کند (شکل تغییرات به صورت مقعر است). تغییرات ضریب α در $B/H=2$ به جز در کناره‌ها، ثابت است و برای مقطع‌های مستطیلی باریک ($B/H \leq 1$)، مقدار ضریب α در وسط مقطع بیشتر بوده و با دور شدن از وسط مقطع کاهش پیدا می‌کند (شکل تغییرات به صورت محدب است). روند تغییرات در نزدیکی کناره‌ها در تمام حالت‌ها همانند هم هستند. با محاسبه مقدار ضریب α برای کل مقطع مستطیلی (بر مبنای رابطه (۱۳))، مقادیر آن در جدول ۲ نشان داده شده است. در کانال‌های عریض، مقدار ضریب α کمتر از کانال‌های عمیق است. در واقع هر چه کانال عریض‌تر می‌شود مقدار این ضریب کاهش می‌یابد.

جدول ۲ مقدار میانگین ضریب α در کانال مستطیلی به‌ازای

B/H ‌های مختلف

Table 2 Average α value in rectangular channel for various B/H ratios

B/H	0.5	0.67	1.0	1.5
α_{ave}	1.04	1.0	0.946	0.893
B/H	2.0	4.0	8.0	10
α_{ave}	0.859	0.79	0.741	0.728

در شکل‌های ۹ و ۱۰، تغییرات α در سطح آزاد آب در مقطع‌های دوزنقه‌ای برای دو حالت $n=0.5$ و $n=1$ و به‌ازای B/H ‌های مختلف نشان داده شده است.

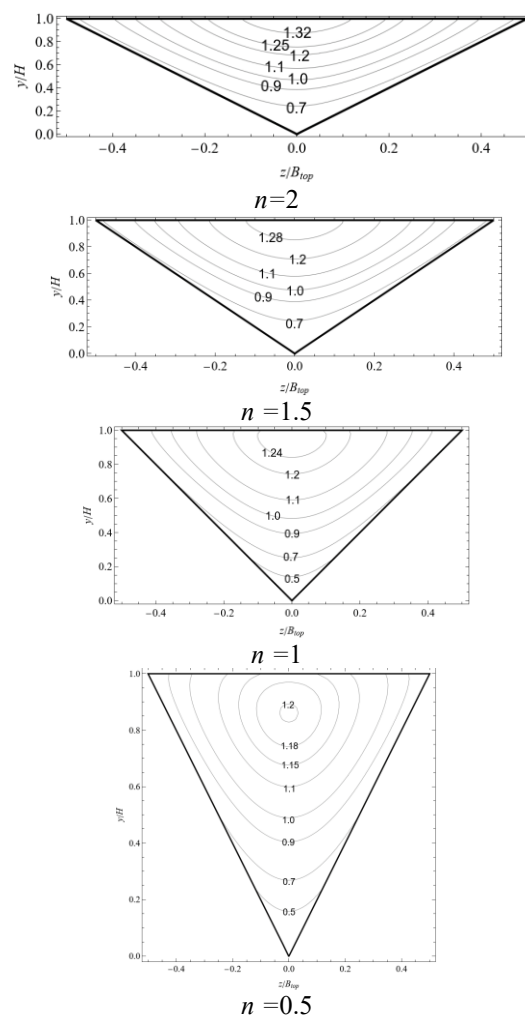


Fig. 7 Contour plots of velocity distribution in triangle channels for different n

شکل ۷ نمودار تغییرات خطوط هم‌سرعت در سطح مقطع کانال مثلثی به‌ازای n ‌های مختلف

در شکل‌های ۵، ۶ و ۷ نیز همان روند شکل ۴ در مورد کانال‌های مستطیلی مشاهده می‌شود. در ضمن، با افزایش شیب جداره کلنل دوزنقه‌ای و مثلثی، n حداکثر مقدار منحنی‌های هم‌سرعت افزایش می‌یابند.

۳-۲- تغییرات ضریب سرعت در عرض سطح

آزاد

حال بر مبنای توضیح‌های بخش ۲-۳، تغییرات ضریب سرعت α در عرض سطح آزاد برای سه مقطع مستطیلی، دوزنقه‌ای و مثلثی محاسبه شده و به‌صورت نمودار در شکل‌های ۸ الی ۱۱ ارائه می‌شوند. جدول‌های ۲ تا ۴ نیز مقادیر α متوسط مقطع را بر مبنای رابطه (۱۳) ارائه کرده‌اند.

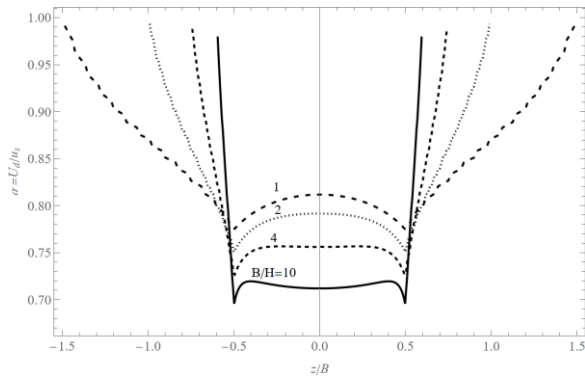


Fig. 10 Variation of the velocity index across the free surface of trapezoidal channel, $n=1$

شکل ۱۰- نمودار تغییرات α در سطح آزاد آب در کانال دوزنقه‌ای به ازای $n=1$

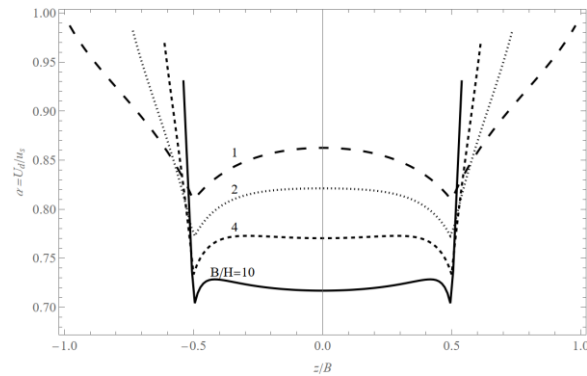


Fig. 9 Variation of the velocity index across the free surface of trapezoidal channel, $n=0.5$

شکل ۹- نمودار تغییرات α در سطح آزاد آب در کانال دوزنقه‌ای به ازای $n=0.5$

جدول ۳ مقدار میانگین ضریب α در کانال دوزنقه‌ای به ازای n و B/H های مختلف

Table 3 Average α value in trapezoidal channel for various n and B/H ratios

$n=0.5$	B/H	0.5	0.67	1.0	1.5
	α_{ave}	0.879	0.873	0.858	0.837
$n=0.67$	B/H	2.0	4.0	8.0	10
	α_{ave}	0.819	0.774	0.735	0.724
$n=1.0$	B/H	0.5	0.67	1.0	1.5
	α_{ave}	0.859	0.853	0.826	0.826
$n=1.5$	B/H	2.0	4.0	8.0	10
	α_{ave}	0.811	0.771	0.733	0.723
$n=2.0$	B/H	0.5	0.67	1.0	1.5
	α_{ave}	0.831	0.828	0.820	0.807
$n=0.5$	B/H	2.0	4.0	8.0	10
	α_{ave}	0.795	0.763	0.73	0.720
$n=1.0$	B/H	0.5	0.67	1.0	1.5
	α_{ave}	0.804	0.802	0.788	0.788
$n=1.5$	B/H	2.0	4.0	8.0	10
	α_{ave}	0.78	0.754	0.726	0.717
$n=2.0$	B/H	0.5	0.67	1.0	1.5
	α_{ave}	0.786	0.785	0.775	0.775
$n=0.5$	B/H	2.0	4.0	8.0	10
	α_{ave}	0.768	0.747	0.722	0.714

رابطه (۱۳) ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، اعداد این جدول نشان می‌دهند که همانند مقطع مستطیلی، با افزایش B/H ، ضریب سرعت مقطع کاهش می‌یابد و با افزایش شیب n (یعنی بازتر شدن مقطع دوزنقه‌ای) نیز شاهد کاهش ضریب سرعت خواهیم بود. در شکل ۱۱ تغییرات α در سطح آزاد آب در مقطع‌های مثلی برای حالت‌های $n=0.5, 1, 1.5, 2$ نشان داده شده و در جدول ۴، مقدار α میانگین کل مقطع مثلی ارائه شده است. همان‌طور که از شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، در یک کانال مثلی شکل، کمترین مقدار ضریب سرعت در موقعیت بیشترین عمق رخ می‌دهد.

تغییرات همانندی برای مقدارهای α در نقاط متناظر با عرض بستر کانال دوزنقه‌ای بر روی سطح آزاد، نسبت به کانال‌های مستطیلی مشاهده می‌شود. اما مقدارهای α در نقطه‌های متناظر با شیب جداره بر روی سطح آزاد، تغییرات زیادی را تجربه می‌کنند. دلیل آن‌هم، کاهش تدریجی مقدار $(u_s)_i$ و همچنین کاهش مقدار $(U_d)_i$ در نوارهای قائمی است که بر روی شیب قرار دارند و به تدریج ارتفاع مؤثر آن‌ها کم شده و باعث کاهش U_d برای محاسبه α در هر نقطه متناظر از سطح آزاد می‌شوند. اما در مقطع‌های عریض، می‌توان از تغییرات مربوط به شیب جداره بر روی α صرف نظر کرد. در جدول ۳ نیز مقدارهای میانگین α برای کل مقطع بر مبنای

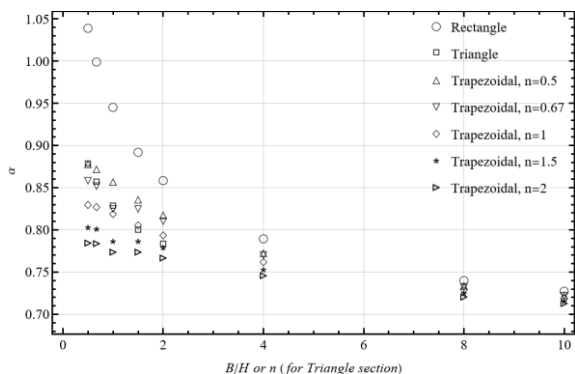


Fig. 12 Distribution of the average α index for different geometric channel cross-sections

شکل ۱۲ پراکندگی مقدار میانگین ضریب α سطح مقطع کانال‌های هندسی

$$\alpha = 1.155 - 0.267(B/H) + 0.06(B/H)^2, \quad (15)$$

for $B/H \leq 2.0, n = 0$

$$\alpha = 0.908 - 0.03(B/H) + 0.0012(B/H)^2 - 0.072n + 0.0058n(B/H) + 0.0072n^2, \quad \text{for } B/H > 2.0 \quad (16)$$

بر اساس رابطه‌های بالا، مقدار بیشینه خطای نسبی بین مقادیر ضریب سرعت بر اساس SPM و بر اساس روابط برازش داده شده در حدود 2.18% است. مقدار ضریب سرعت α در کانال‌های هندسی یاد شده در این پژوهش برای شرایط جریان یکنواخت با بستر صاف، از مقدار 0.714 در کانال‌های عریض با مقطع دوزنقه‌ای ($B/H=10$) و شیب جداره $n=2$ تا 1.04 برای کانال‌های مستطیلی باریک ($B/H=0.5$) متغیر است.

۳-۳- صحت‌سنجی نتایج SPM

در این بخش، برای صحت‌سنجی نتایج بدست آمده برای ضریب سرعت α با استفاده از SPM، از نتایج آزمایشگاهی Lyn (1992) استفاده شده است. در آزمایشگاه، سرعت‌های سطحی در وسط عرض سطح آزاد کانال مستطیلی اندازه‌گیری شده است. با استفاده از این نتایج، ضریب α برای B/H ‌های آزمایشگاهی بر مبنای SPM و روابط (۱۳) و (۱۶) برآورد شده و همچنین دبی با استفاده از رابطه (۱۴)، محاسبه و با نتایج دبی آزمایشگاهی مقایسه می‌شوند. این نتایج در جدول ۵ ارائه شده‌اند. در این جدول، α_{SPM} بر مبنای رابطه (۱۳) و α_{Reg} بر مبنای رابطه (۱۶) برآورد

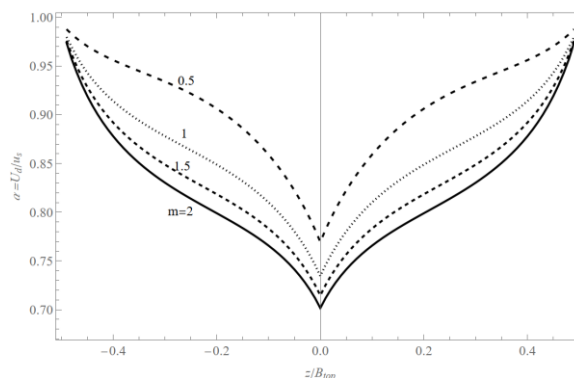


Fig. 11 Variation of the velocity index across the free surface of triangle channel for different n values

شکل ۱۱ نمودار تغییرات α در سطح آزاد کانال مثلثی به ازای n ‌های مختلف

جدول ۴ مقدار میانگین ضریب α در کانال مثلثی به‌ازای شیب جداره‌های مختلف

Table 4 Average α value in triangle channel for various side slopes (n)

m	0.5	0.67	1.0	1.5	2.0
α	0.878	0.857	0.828	0.8	0.783

اعداد جدول ۴ نشان می‌دهند که همانند مقطع دوزنقه‌ای، با افزایش شیب n (یعنی بازتر شدن مقطع مثلثی) شاهد کاهش ضریب α خواهیم بود. در شکل ۱۲ نیز پراکندگی مقدارهای α میانگین کل مقطع برای مقطع‌های هندسی مختلف بر مبنای جدول‌های ۲، ۳ و ۴ نشان داده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، در کانال‌های عریض (چه مستطیلی و چه دوزنقه‌ای) مقدار ضریب سرعت کل مقطع به تقریب مقدارهای همانندی دارد. با توجه به مقدار پیش‌فرض ضریب سرعت برابر 0.85 برای جریان بر روی بستر صاف و هموار که در رودخانه‌ها مورد قبول است (Polatel, 2006)، حدود 22.6% از مقطع‌های کانال‌ها شامل کانال‌های مستطیلی با $B/H \leq 2$ و دیگر کانال‌ها با $B/H \leq 1$ و $n=0.5, 0.67$ دارای ضریب سرعت بیش از مقدار پیش‌فرض توصیه شده هستند. با اعمال رگرسیون غیرخطی چند متغیره بر مبنای داده‌های ضریب سرعت در کانال‌های هندسی با استفاده از SPM، دو رابطه زیر برازش مناسبی بر داده‌ها دارند:

شده‌اند. برای بررسی دقت صحت‌سنجی، از شاخص‌های آماری شامل R^2 ، RE ، $RMSE$ و KGE استفاده شده که در

جدول ۵ مقایسه دبی بر مبنای ضریب α با استفاده از SPM با نتایج دبی آزمایشگاهی

Table 5 Comparison of discharge based on α index using SPM with experimental discharge results

Case of Lyn (1992)	B/H	A (cm ²)	$(u_s)_{Exp}$ (cm/s)	Q_{Exp} (lit/s)	α_{SPM}	Q_{SPM} (lit/s)	RE (%)	α_{Reg}	Q_{Reg} (lit/s)	RE (%)
C-1	4.08	174.4	75	10.84	0.792	10.36	4.43	0.806	10.54	2.77
C-2	4.08	174.2	86.5	12.66	0.792	11.93	5.77	0.806	12.15	4.03
C-3	4.64	153.4	85.5	10.77	0.781	10.24	4.92	0.795	10.43	3.16
C-4	4.69	151.8	101.5	12.66	0.78	12.01	5.13	0.794	12.23	3.4
1957EQ	4.66	152.6	79.5	9.85	0.781	9.5	3.55	0.794	9.63	2.23
2565EQ	4.08	174.4	85	12.07	0.792	11.71	2.98	0.806	11.95	1
1565EQ	4.14	172	75	10.8	0.791	10.2	5.56	0.804	10.37	3.98
1965EQ	4.10	173.6	77.5	11.05	0.791	10.67	3.44	0.805	10.83	1.99

(1992) را معرفی می‌کند. Q_{Reg} نیز دبی برآورد شده بر مبنای ضریب سرعت (α_{Reg}) محاسبه شده از رابطه رگرسیون غیرخطی، رابطه (۱۶)، است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشینه خطای نسبی (RE) بین نتایج دبی آزمایشگاهی و دبی‌های برآورد شده با α_{SPM} و α_{Reg} به ترتیب 5.77% و 4.03% هستند که دقت قابل قبول SPM را در برآورد دبی با استفاده از ضریب α محاسبه شده و اندازه‌گیری سرعت سطحی در یک نقطه، نشان می‌دهد. شکل ۱۳ مقایسه بین دبی‌های آزمایشگاهی و مدل SPM را نشان می‌دهد که با توجه به خط سازگاری کامل 1:1 و ضریب R^2 ، نشان دهنده برآورد مناسب دبی بر مبنای SPM در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی است. در جدول ۶ نیز مقدارهای شاخص‌های آماری مقایسه بین نتایج دبی آزمایشگاهی و دبی مدل SPM (در دو حالت α_{SPM} و α_{Reg}) ارائه شده‌اند.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [(Q_{Exp})_i - (Q_{SPM})_i]^2}{\sum_{i=1}^n [(Q_{Exp})_i - \bar{Q}_{Exp}]^2} \quad (17)$$

$$RE\% = \frac{|Q_{Exp} - Q_{SPM}|}{Q_{Exp}} \times 100 \quad (18)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(Q_{Exp})_i - (Q_{SPM})_i]^2}{n}} \quad (19)$$

$$KGE = 1 - \sqrt{(R-1)^2 + (\beta-1)^2 + (\gamma-1)^2} \quad (20)$$

در رابطه‌های (۱۷) تا (۱۹)، Q_{Exp} و Q_{SPM} به ترتیب دبی آزمایشگاهی و دبی بر مبنای SPM هستند. \bar{Q}_{Exp} نیز میانگین دبی‌های آزمایشگاهی است. در رابطه (۲۰)، R ضریب همبستگی، β نسبت میانگین داده‌های مدل و آزمایشگاهی و γ نسبت تغییرپذیری یا انحراف معیار داده‌های مدل و آزمایشگاهی نام دارند.

ستون اول جدول ۵، حالت‌های مختلف آزمایشگاهی Lyn

جدول ۶ شاخص‌های آماری مقایسه نتایج مدل SPM با نتایج آزمایشگاهی

Table 6 Statistical metrics of comparison between SPM and experimental results

Mode	Mean RE (%)	R^2	$RMSE$	$NRMSE$ (%)	KGE
Q based on α_{SPM}	4.47	0.985	0.527	4.65	0.911
Q based on α_{Reg}	2.82	0.984	0.344	3.03	0.947

مقدارهای $RMSE$ کمتر از واحد و خطای نرمال شده مدل یعنی $NRMSE$ کمتر از 5% است.

از جدول ۶ مشاهده می‌شود که مقدار میانگین خطای نسبی (RE) زیر 5% است و با توجه به مقدار ضریب R^2 ، مدل SPM تغییرات آزمایشگاهی را خیلی خوب باز تولید کرده است. با توجه به دامنه دبی‌ها (بر مبنای جدول ۵)،

شدید بسیار خطرناک هستند (Smart and Biggs, 2020). بنابراین روش‌هایی مانند SPM می‌تواند این محدودیت مهم را مرتفع سازد و به‌عنوان یکی از روش‌های ساده و کم‌هزینه غیرتماسی برای برآورد سرعت جریان در مقطع کانال‌های باز استفاده می‌شود. در این بررسی و ارزیابی، با توجه به اصول SPM، کاربرد این روش برای برآورد ضریب سرعت در مقطع‌های هندسی بررسی شد.

با توجه به رسم منحنی‌های هم‌سرعت در مقطع کانال و تغییرات α می‌توان گفت نوع تغییرات ضریب سرعت، می‌تواند به تغییرات مقدارهای منحنی‌های هم‌سرعت و محل رخداد سرعت بیشینه بستگی داشته باشد. اهم نتایج این پژوهش به‌صورت زیر ارائه می‌شوند:

۱) با باریک شدن مقطع، محل رخداد بیشینه سرعت از سطح آزاد دور می‌شود، بنابراین مقدار α محلی در $z/B=0$ (خط مرکزی مقطع کانال) افزایش یافته و در کانال‌های عریض‌تر بیشینه سرعت به سطح آب نزدیک شده بنابراین مقدار α محلی در $z/B=0$ (خط مرکزی کانال) کاهش می‌یابد.

۲) شرایط شکل مقطع و عمق آب، بطور قابل ملاحظه‌ای بر برآورد α محلی در مقطع‌های عمودی مختلف در سطح مقطع، تأثیر می‌گذارند. در مقطع‌های عریض (به جز در نزدیکی کناره‌ها)، تغییرات α محلی کمتر است.

۳) صحت‌سنجی نتایج ضریب سرعت و برآورد دبی با استفاده از مدل SPM و نتایج دبی آزمایشگاهی نشان داد اندازه‌گیری سرعت سطحی در یک نقطه و برآورد ضریب سرعت با SPM دقت بسیار خوبی داشته (خطای نسبی زیر 5%) و می‌تواند در زمان و هزینه برآورد دبی نسبت به روش‌های میدانی یا آزمایشگاهی صرفه‌جویی کند.

۴) صحت‌سنجی با داده‌های آزمایشگاهی نشان داد که ضریب سرعت برآورد شده با استفاده از معادله رگرسیون غیرخطی چند متغیره بر مبنای داده‌های ضریب سرعت مدل SPM در کانال‌های هندسی، دقت بسیار خوبی برای برآورد دبی دارد.

۵) با توجه به نتایج تغییرات ضریب سرعت در مقطع، نشان داده شد که مقدار پیش‌فرض $\alpha=0.85$ نمی‌تواند برآورد مناسبی از ضریب سرعت در کل مقطع باشد و دبی را با

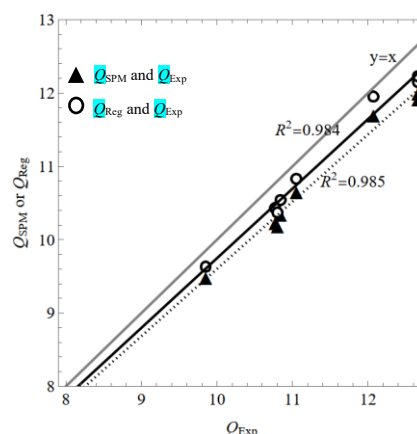


Fig. 13 Comparison of experimental and SPM model discharges

شکل ۱۳ مقایسه دبی‌های آزمایشگاهی و مدل SPM

مقدارهای شاخص آماری KGE نزدیک به واحد، نشان دهنده دقت بالاتر مدل است. این شاخص ترکیبی است بطوری که همبستگی، انحراف و تغییرپذیری را برای ارزیابی جامع عملکرد مدل در نظر می‌گیرد (Hassanzadeh et al., 2024). مقدارهای KGE در جدول ۶، نشان دهنده عملکرد خوب مدل SPM در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی است.

۳-۴- مقایسه مقدارهای α با SPM با مقدارهای

پیشنهاد شده دیگر محققان

بر اساس پژوهش‌های مربوط به دیگر محققان، مقایسه‌ای بین مقدارهای ضریب سرعت بدست آمده از پژوهش‌های پیشین و مقدارهای ضریب سرعت بر مبنای SPM در قالب جدول ۷ انجام شده است. مقدار میانگین ضریب سرعت در کانال‌های مستطیلی، دوزنقه‌ای و مثلثی بر مبنای SPM، به‌ترتیب، 0.857، 0.786 و 0.83 برآورد می‌شود.

همان‌طور که در جدول ۷ مشاهده می‌شود، ضریب سرعت با توجه به شرایط برآورد آن در پژوهش‌های مختلف دارای تغییرات گوناگونی است. برای مقایسه سعی شده نزدیک‌ترین شرایط به این پژوهش مقایسه شوند. با این حال مشاهده می‌شود، روند تغییرات اساسی ضریب سرعت با استفاده از SPM همانند پژوهش‌های پیشین بوده و مقدارهای خطای نسبی در شرایط همانند از 0.92% تا 12.67% متغیر است.

۴- نتیجه‌گیری

اندازه‌گیری مستقیم سرعت سطحی در شرایط سیلابی

دیگر پژوهش‌ها در جدول ۷، نشان می‌دهند که نتایج α این پژوهش، اعتبار داشته و می‌توان از آن برای توسعه روش تک‌نقطه‌ای در دیگر حالت‌های شرایط جریان در کانال استفاده کرد.

دقت مناسبی برآورد کند. افزون بر صحت‌سنجی انجام شده با نتایج آزمایشگاهی، نتایجی که برای α با استفاده از مدل SPM در مقطع‌های هندسی حاصل شده در مقایسه با ضریب بدست آمده از

جدول ۷ مقایسه ضریب α با نتایج بررسی‌های محققان دیگرTable 7 Comparison of average α index with findings from previous studies

Previous Studies	Conditions of α estimation	Range of α or α -value	Comparison with α_{SPM}
Weitbrecht et al. (2002)	For shallow flows	0.805	$RE = 11.3\%$, for the widest channel cross-section
Polatel (2006)	For channels with smooth beds, higher values of α are observed in deeper sections	0.659~0.91	Fig. 12 confirms this trend
Gunawan et al. (2012)	In natural rivers, when the maximum velocity occurs beneath the free surface, $\alpha > 1.0$	0.397~1.175	In rectangular channels with $B/H = 0.5, 0.67, \alpha > 1.0$, the maximum velocity occurs beneath the water surface
Osorio-Cano et al. (2013)	Experimental channels with $B/H \geq 4.9$	0.62~0.77	For rectangular channel with $B/H = 4.9$, $RE = 2.6\%$
Welber et al. (2016)	In artificial channels at power plant outlets, $\alpha \approx 0.9$	0.71~0.92	Considering the average α values in rectangular and trapezoidal channels, the $RE_{rectangle} = 4.78\%$, $RE_{trapezoidal} = 12.67\%$
Moramarcio et al. (2017)	For large aspect ratios in rivers, α decreases, $\alpha = 1.05$ in the narrowest section to $\alpha = 0.86$ in the widest section	0.86~1.05	$\alpha = 1.04$ in the narrowest section and gradually decreases as the cross-section becomes wider
Haut et al. (2018)	In artificial concrete channels	0.9	RE corresponding to geometric channels are $RE_{rectangle} = 4.78\%$, $RE_{trapezoidal} = 12.67\%$, and $RE_{triangle} = 7.78\%$
Fujita et al. (2018)	For channels with normal roughness	0.86~0.87	RE corresponding to geometric channels are $RE_{rectangle} = 0.92\%$, $RE_{trapezoidal} = 9.13\%$, and $RE_{triangle} = 4.05\%$
Biggs et al. (2021)	For channels with normal roughness	0.86	Similar to the comparison with Fujita et al. (2018)
Ghorbani et al. (2021)	For channels with $B/H = 2.18 \sim 9.22$, the average α has been determined	0.92	$RE \approx 4.89\%$

		۵- نشانه‌ها	
m	پارامتر زبری معادله توزیع سرعت		
n	شیب جداره کانال	A	سطح مقطع (m^2)
$NRMSE$	شاخص آماری ریشه میانگین مربع‌های	B	عرض بستر کانال (m)
	خطای نرمال شده	c, c_1, c_2, c_3	ثابت
Q	دبی حجمی (m^3s^{-1})	$dA, \delta A$	جزء مساحت
r, r	بردار مکان	$ds, \delta s$	جزء بردار طول محیط خیس شده
R^2	شاخص آماری ضریب تعیین	du	جزء بردار سرعت
RE	شاخص آماری خطای نسبی	$f(r)$	تابع سرعت
$RMSE$	شاخص آماری ریشه میانگین مربع‌های	h	ارتفاع کانال، ارتفاع آب (m)
	خطا	H	ارتفاع آب کانال (m)
R_h	شعاع هیدرولیکی (m)	KGE	شاخص آماری کلینگ-گوپتا
u	سرعت (ms^{-1})	k_s	ضریب زبری نیکورادزه

نویسنده دوم: بررسی نتایج، بازبینی مقاله.

نویسنده سوم: چکیده و بحث و نتایج.

۶- منابع

Abbaszadeh, H., Norouzi, R., Sume, V., Kuriqi, A., Daneshfaraz, R. & Abraham, J. (2023). Sill role effect on the flow characteristics (Experimental and regression model analytical). *Fluids*, 8(235), 1-18, <https://doi.org/10.3390/fluids8080235>.

Biggs, H., Smart, G.M., Doyle, M., Eickelberg, N., Aberle, J., Randall, M. & Detert, M. (2023). Surface velocity to depth-averaged velocity—A review of methods to estimate alpha and remaining challenges. *Water*, 15(3711), 1-21, <https://doi.org/10.3390/w15213711>.

Biggs, H., Doyle, M., McDonald, M., Smart, G., Holwerda, N. & Ede, M. (2021). River discharge from surface velocity measurements a field guide for selecting alpha. National Institute of Water & Atmospheric Research Ltd, Christchurch, New Zealand.

Cao, L., Weitbrecht, V., Li, D. & Detert, M. (2020). Airborne feature matching velocimetry for surface flow measurements in rivers. *Journal of Hydraulic Research*, 59(4), 637-650.

Chen, C.L. (1991). Unified theory on power laws for flow resistance. *J. Hydraulic Eng., ASCE* 117 (3), 371-389.

Chen, Y.C., Hsu, Y.C., and Zai, E.O. (2022). Streamflow measurement using mean surface velocity. *Water*, 14(15), 1-15, <https://doi.org/10.3390/w14152370>

Costa, J.E., Spicer, K.R., Cheng, R.T., Haeni, F.P., Melcher, N.B., Thurman, E.M., Plant, W.J. & Keller, W.C. (2000). Measuring stream discharge by non-contact methods: A proof-of-concept experiment. *Geophysical Research Letters*, 27(4), 553-556.

Detert, M., Johnson, E.D. & Weitbrecht, V. (2017). Proof-of-concept for low-cost and non-contact synoptic airborne river flow measurements. *International Journal of Remote Sensing*, 38(8-10), 2780-2807.

Dolcetti, G., Hortobágyi, B., Perks, M., Tait, S.J. & Dervilis, N. (2022). Using noncontact measurement of water surface dynamics to estimate river discharge. *Water Resources Research*, 58(9), 1-23, <https://doi.org/10.1029/2022WR032829>.

Fujita, I., Muste, M. & Kruger, A. (1998). Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in

سرعت میانگین (ms^{-1}) U

سرعت سطحی (ms^{-1}) u_s

سرعت میانگین عمقی (ms^{-1}) U_d

سرعت برشی (ms^{-1}) μ

مختص راستای جریان، قائم و افقی (m) x, y, z
نشانه‌های یونانی:

ضریب (شاخص) سرعت α

چگالی (kgm^{-3}) ρ

تنش برشی مرز (Nm^{-2}) τ_0

زاویه θ

سرعت نرمال شده λ
زیرنویس‌ها:

مقدار میانگین ave

مرز boundary

معرف جزء i

رگرسیون Reg

روش تک نقطه‌ای SPM

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

منابع مالی

نویسنده (نویسندگان) هیچ گونه حمایت مالی برای تحقیق، تالیف و انتشار این مقاله دریافت نکردند.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است. مجموعه داده‌های تولید شده و یا تحلیل شده در طول مطالعه حاضر، در صورت درخواست معقول، از نویسنده مسئول در دسترس هستند.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: مقدمه، روش‌شناسی، تجزیه و تحلیل داده‌ها.

- Johnson, E.D. & Cowen, E.A. (2017). Remote determination of the velocity index and mean streamwise velocity profiles. *Water Resources Research*, 53(9), 7521–7535.
- Kinzel, P.J. & Legleiter, C.J. (2019). sUAS-based remote sensing of river discharge using thermal particle image velocimetry and bathymetric lidar. *Remote Sensing*, 11(19), 1–19, <https://doi.org/10.3390/rs11192317>.
- Le Coz, J., Hauet, A., Pierrefeu, G., Dramais, G. & Camenen, B. (2010). Performance of image-based velocimetry (LSPIV) applied to flash-flood discharge measurements in Mediterranean rivers. *Journal of Hydrology*, 394(1-2), 42–52.
- Maghrebi, M.F. (2003). Discharge estimation in flumes using a new technique for the production of isovel contours. In: Proceedings of Inter. Conf. on Civil and Envi. Eng., ICCEE, Hiroshima, Japan.
- Maghrebi, M.F. & Rahimpour, M. (2005). A simple model for estimation of dimensionless isovel contours in open channels. *Flow Measurement and Instrumentation*, 16(6), 347–352.
- Maghrebi, M.F. (2006). Application of the single point measurement in discharge estimation. *Advances in Water Resources*, 29(10), 1504–1514.
- Maghrebi, M.F. & Ball, J.E. (2006). New method for estimation of discharge. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 32(10), 1044–1051.
- Maghrebi, M.F. & Ahmadi, A. (2017). Stage-discharge prediction in natural rivers using an innovative approach. *Journal of Hydrology*, 545, 172–181.
- Moramarco, T., Barbetta, S. & Tarpanelli, A. (2017). From surface flow velocity measurements to discharge assessment by the entropy theory. *Water*, 9(2), 1-12, <https://doi.org/10.3390/w9020120>.
- Muste, M., Ho, H.-C. & Kim, D. (2011). Considerations on direct stream flow measurements using video imagery: Outlook and research needs. *Journal of Hydro-environment Research*, 5(4), 289–300.
- Nezu, I. & Nakagawa, H. (1993). Turbulence in open-channel flows. IAHR-Monograph. Rotterdam, The Netherlands: A.A. Balkema Publishers.
- Osorio-Cano, J.D., Osorio, A.F. & Medina, R. (2013). A method for extracting surface flow velocities and discharge volumes from video images in laboratory. *Journal of Flow Measurement and Instrumentation*, 33, 188–196.
- Polatel, C. (2006). Large-scale roughness effect on hydraulic engineering applications. *Journal of Hydraulic Research*, 36(3), 397–414.
- Fujita, I. (2018). Principles of surface velocity gaugings. In: Proceedings of the 4th IAHR-WMO-IAHS Training Course on Stream Gauging, Lyon, France.
- Fulton, J.W., Mason, Ch.A., Eggleston, J.R., Nicotra, M.J., Chiu, Ch., Henneberg, M.F., Best, H.R., Cederberg, J.R., Holnbeck, S.R., Lotspeich, R.R., Laveau, Ch.D., Moramarco, T., Jones, M.E., Gourley, J.J. & Wasielewski, D. (2020). Near-field remote sensing of surface velocity and river discharge using radars and the probability concept at 10 U.S. Geological Survey stream gages. *Remote Sensing*, 12(8), 1-28, <https://doi.org/10.3390/rs12081296>.
- Ghorbani, Z., Zahiri, A., Khalili Shayan, H., Dehghani, A.A. & Ghorbani, Kh. (2023). Experimental Investigation of Effective Factors on the Velocity Index for Calculating Discharge in Open Channels. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 17(5), 997–1009. (In Persian)
- Gunawan, B., Sun, X., Sterling, M., Shiono, K., Tsubaki, R., Rameshwaran, P., Knight, D.W., Chandler, J.H., Tang, X. & Fujita, I. (2012). The application of LS-PIV to a small irregular river for inbank and overbank flows. *Flow Measurement and Instrumentation*, 24, 1–12, <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2012.02.001>.
- Hassanzadeh, Y., Abbaszadeh, H., Abedi, A. & Abraham, J. (2024). Numerical simulation of the effect of downstream material on scouring-sediment profile of combined spillway-gate. *AQUA- Water Infrastructure, Ecosystems, and Society*, 73(12), 1-22, doi: 10.2166/aqua.2024.360.
- Hauet, A., Morlot, T. & Daubagnan, L. (2018). Velocity profile and depth-averaged to surface velocity in natural streams: A review over a large sample of rivers. In: Proceedings of the River Flow, Lyon, France, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184006015>.
- Jolley, M.J., Russell, A.J., Quinn, P.F. & Perks, M.T. (2021). Considerations when applying large-scale PIV and PTV for determining river flow velocity. *Frontiers in Water*, 3(709269), 1–21, <https://doi.org/10.3389/frwa.2021.709269>.
- Johnson, E.D. & Cowen, E.A. (2016). Remote monitoring of volumetric discharge employing bathymetry determined from surface turbulence metrics. *Water Resources Research*, 52(3), 2178–2193.

DC, USA, 2175.

Smart, G.M. & Biggs, H.J. (2020). Remote gauging of open channel flow: Estimation of depth averaged velocity from surface velocity and turbulence. In: Proceedings of the River Flow, Delft, The Netherlands.

Turnipseed, D. & Sauer, V. (2010). Discharge measurements at gaging stations (No. 3-A8). United States Geological Survey Report, United States Geological Survey: Reston, VA, USA, No. 3-A8.

Welber, M., Le Coz, J., Laronne, J.B., Zolezzi, G., Dramais, G., Hauet, A. & Salvaro, M. (2016). Field assessment of noncontact stream gauging using portable surface velocity radars (SVR). *Water Resources Research*, 52(2), 1108–1126.

Yen, B.C. (2002). Open channel flow resistance. *J. Hydraulic Eng., ASCE*, 128(1), 20–39.

free- surface and bulk flow characteristics in open-channel flows. PhD Thesis, Iowa Institute of Hydraulic Research, The University of Iowa, Ames, Iowa.

Pumo, D., Alongi, F., Nasello, C. & Noto, L.V. (2025). A simplified method for estimating the alpha coefficient in surface velocity based river discharge measurements. *Journal of Hydrology*, 648, 1–15, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.132468>

Randall, M. (2021). National industry guidelines for hydrometric monitoring—Part 11: application of surface velocity methods for velocity and open channel discharge measurements. Bureau of Meteorology Publication, Melbourne, Australia.

Rantz, S. (1982). Measurement and computation of stream-flow: Measurement of stage and discharge. U.S. Geological Survey Water Supply Paper, United States Government Printing Office: Washington,



© 2026 The Author(s). Published by Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.