

روش‌های ترسیم خطوط هم سرعت و تخمین دبی در کانال‌های روباز

محمود فغفور مغربی
 مجید رحیم پور

دانشیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد -
 بخش مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

چکیده

روش جدید برای پیش‌بینی خطوط هم سرعت بدون بعد در کانال‌های مستطیلی با زبری‌های یکنواخت و غیر یکنواخت ارائه شده است. در ارائه مدل، فرض می‌شود که هم‌المان از مرز بر روی سرعت نقطه دلخواهی از مقطع جریان اثر داشته و کل اثرات مرز با انگرال‌گیری بر روی محیط خیس شده بدست آید. در مدل پیشنهادی قانون توانی سرعت بکار رفته و خطوط هم سرعت بدون بعد در کانال مستطیلی با زبری یکنواخت و غیر یکنواخت ترسیم شده است. با استفاده از خطوط هم سرعت بی بعد و اندازه‌گیری سرعت جریان در یک نقطه مناسب، دبی جریان با خطای کمتر از ۵ درصد تخمین زده می‌شود. جهت کالیبراسیون و همچنین اعتبار مدل، پیش‌بینی‌های حاصل از اجرای مدل با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه گردید و مشخص شد که نتایج حاصل از مدل با داده‌های آزمایشگاهی همبستگی خوبی دارد.

کلمات کلیدی: خطوط هم‌سرعت، تخمین دبی، کانال‌های روباز، زبری غیر یکنواخت.

A Method for Drawing Isovel Contours and Estimation of Discharge in Open-Channels

M. Faghfor Maghrebi Civil Engineering Dept., Ferdowsi University of Mashhad
 M. Rahimpour Water Engineering Dept., Shahid Bahonar University of Kerman

Abstract

In order to obtain the isovel contours in a channel cross section, a simple model is proposed. The model is able to estimate the isovel contours in a channel cross section with uniform and composite roughnesses. In this model, it is assumed that each element of boundary influences the velocity at an arbitrary point of the channel cross section in the same way as a velocity distribution profile such as power law does. By integration of the total effect of channel boundary, using the power law velocity distribution, the isovel contours can be easily obtained. Then, by the use of a single point of velocity measurement, discharge can be estimated. The results of discharge estimations show a good agreement between the calculated discharges using the proposed model and experimental ones.

Key words: isovel contours, discharge estimation, open-channel flow, composite roughness.

۱- مقدمه

سرعت از کمیت‌های اصلی جهت اندازه‌گیری جریان در تحقیقات هیدرولیکی است. برای تعیین توزیع سرعت در کانالهای روباز، کارهای نظری کمی صورت گرفته و بیشتر از روابط تجربی استفاده شده است. در روابط اساسی که برای تعیین توزیع سرعت بکار گرفته می‌شود، وابستگی زیادی بین سرعت و تنش برشی نه تنها در داخل جریان بلکه در مجاورت جداره وجود دارد. توزیع سرعت و تنش برشی مرزها برای جریان کاملاً توسعه یافته، پکتواخت و دائمی در کانال‌های مستطیلی توسط محققین زیادی بررسی شده است [۱،۹،۱۲،۱۹،۲۱]. همچنین توزیع سرعت و نیز سرعت‌های متوسط‌گیری شده عمقی در کانال‌های ۷ شکل در مرجع [۱۷] با استفاده از اندازه‌گیری نقطه‌ای سرعت توسط مولینه ارائه شده است. سرعت جریان در یک مقطع کانال معمولاً از نقطه‌ای به نقطه دیگر تغییر می‌کند. این امر ناشی از تنش برشی در کف و دیواره‌های کناری کانال و به علت وجود سطح آزاد جریان می‌باشد. توزیع سرعت در مقطع کانال به عواملی مانند دانسیته و لزجت سیال، شکل مقطع، زبری جداره‌های کانال و وجود انحناء در مسیر کانال بستگی دارد [۳]. توزیع سرعت جریان در کانال‌ها، پیچیده و سه بعدی بوده و بدست آوردن رابطه‌ای کلی که بیانگر توزیع سرعت جریان در کانال‌هایی با خصوصیات متفاوت باشد، به سادگی میسر نیست [۷].

در حال حاضر روابط اندکی هستند که توزیع خطوط هم سرعت را در مقطع کانال پیش‌بینی می‌کنند. از جمله آنها می‌توان به معادلات Chiu & Lin (1983) اشاره نمود [۶]. این معادلات پایه آماری داشته و از مفهوم آنتروپی در توصیف خطوط هم سرعت در مقطع جریان کانال‌های روباز استفاده می‌کنند. معادله ارائه شده قادر است تغییرات سرعت در دو جهت قائم و افقی در مقطع عرضی را که ماکزیمم سرعت در روی سطح آزاد و با زیر آن قرار گیرده توصیف نماید [۶]:

$$\xi = Y(1-Z)^{\beta} \exp(\beta_1 Z - Y + 1) \quad (1)$$

که در آن:

$$Y = \frac{y + \delta_y}{D + \delta + \epsilon}, \quad Z = \frac{|z|}{R + \delta} \quad (2)$$

و ξ متغیری در قانون توزیع لگاریتمی سرعت است که بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$u = \frac{u^*}{K} \ln\left(\frac{\xi}{\xi_0}\right) \quad (3)$$

در معادلات فوق D عمق جریان، y مختصات در جهت قائم، ضرایب مشخصات توزیع سرعت، $K, \beta_1, \xi_0, \delta_1, \delta_y, \epsilon$ سرعت برشی متوسط و u سرعت جریان است. پارامترها و سیستم مختصات در شکل (۱) نشان داده شده‌اند. شیب خطوط هم سرعت (S_ξ) را می‌توان با مشتق‌گیری از معادله (۱) محاسبه کرد [۴، ۵].

$$S_\xi = \frac{dy}{d|z|} = \beta_1 \frac{D + \delta_y + \epsilon}{B_1 + \delta_1} \frac{YZ}{(1-Y)(1-Z)} \quad (4)$$

هنگامی که سرعت ماکزیمم زیر سطح آزاد جریان اتفاق افتد ($\epsilon < 0$) با توجه به معادلات (۲) $Y > 1$ است و همچنین $(1-Z)$ ، Y و Z در معادله (۴) مقادیر غیر منفی دارند، بنابراین در منطقه‌ای که $D + \epsilon < y < D$ است، شیب خطوط هم سرعت منفی است ($S_\xi \leq 0$). وقتی که سرعت ماکزیمم درست در سطح آزاد جریان اتفاق افتد ($\epsilon = 0$) خطوط هم سرعت بر سطح آزاد جریان عمود است. برای $\epsilon > 0$ یا $\epsilon < 0$ با $y < D + \epsilon$ شیب خطوط هم سرعت بزرگتر و یا مساوی صفر است.

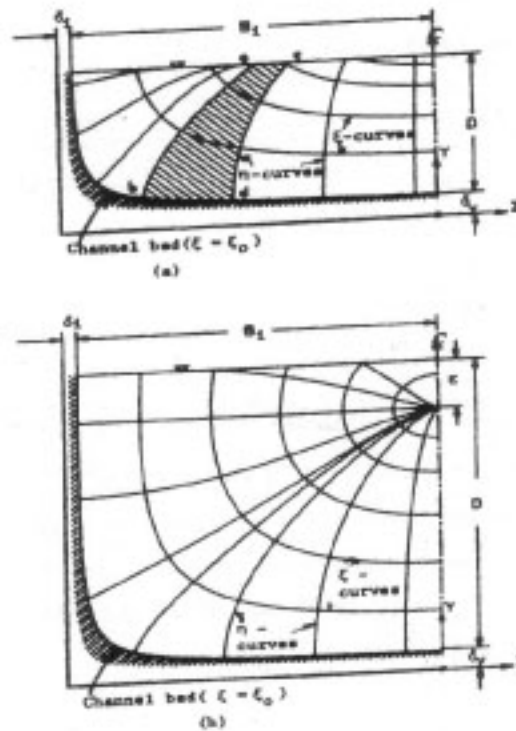
این مدل دارای پارامترهای زیاد بوده که تخمین آنها مشکل است و به رژیم جریان، درجه آشفتگی و نیز وجود جریان‌های ثانویه توجهی ندارد. در ضمن هندسه دقیق کانال را نیز نمی‌تواند شبیه‌سازی کند.

اندازه‌گیری جریان که مقطع کانال به نوارهای قائم متوالی تقسیم‌بندی می‌شود بسته به آنکه سرعت در نقطه‌ای به عمق $0.6d$ (عمق جریان) از نوار قائم مورد نظر برداشت شود (روش تک نقطه ای) و یا در دو نقطه با اعماق $0.2d$ و $0.8d$ اندازه‌گیری شود (روش دو نقطه‌ای) جواب‌های مختلفی از تخمین دبی بدست می‌آید. در این روش‌ها فرض می‌گردد که سرعت اندازه‌گیری شده در عمق $0.6d$ و با میانگین حسابی سرعت برداشت شده در اعماق $0.2d$ و $0.8d$ با سرعت متوسط نوار برابر باشد و لذا دبی کل از حاصل ضرب سرعت متوسط هر نوار در مساحت آن بدست می‌آید. بر اساس اطلاعات میدانی دیده شده است افزایش تعداد نقاط برداشت شده منجر به تخمین‌های بهتری از دبی خواهد شد زیرا پروفیل سرعت دقیقاً از نوع لگاریتمی توزیع سرعت پیروی نمی‌کند. در ایستگاه‌های اندازه‌گیری دبی زمانی که تغییرات زیادی در عمق یا سرعت رخ دهد حداقل در ۲۰ نوار قائم اطلاعات سرعت برداشت می‌شود، انجام چنین کاری ممکن است دشوار، پرهزینه و وقت‌گیر باشد [۲، ۸، ۱۱] با وجود آنکه برداشت سرعت از نقاط اشاره شده فوق بر اساس پیش زمینه هیدرولیکی توزیع لگاریتمی سرعت پیشنهاد شده است لکن وجود جداره‌های جانبی می‌تواند توزیع سرعت را به مقدار قابل ملاحظه‌ای از آنچه در فرمول‌های پیشنهادی رخ می‌دهد، دور سازد.

در مقاله حاضر روشی جدید بر اساس اندازه‌گیری تک نقطه‌ای جریان به عنوان یک کار آزمایشگاهی در ترکیب با روشی برای تخمین خطوط هم سرعت جریان به عنوان کاری تئوریک، جهت تخمین دبی ارائه شده است.

۲- مقدمه‌ای بر روش پیشنهادی

در جریان خارجی یا داخلی، هنگامی که سیال از روی سطح جامد عبور می‌کند، سرعت جریان تحت تأثیر مرزها قرار می‌گیرد به این معنی که در غیاب مرزها، جریان با سرعت یکنواخت از کل مقطع عبور می‌کند اما با وجود مرزها توزیع سرعت یکنواخت نیست و در نقاط نزدیک به مرزها کاهش سرعت بیشتری دیده می‌شود و در نتیجه گرادین سرعت بیشتر است. تقریباً تمامی روابط سرعت به تجوی پروفیل سرعت را بر روی جداره تابعی از y ، فاصله از جداره، معرفی می‌کنند. با توجه به برداشت هیدرومیکسیتی ارائه شده می‌توان تصور نمود که در حالت کلی سرعت تابعی از فاصله نقطه مورد نظر تا جداره



شکل ۱- سیستم مختصات و پارامترهای مدل Chiu
 $|\varepsilon| < 0$ (b) و $\varepsilon > 0$ (a)

با توجه به این حقیقت که سرعت ماکزیمم در زیر سطح آزاد جریان اتفاق می‌افتد اما توزیع‌های مرسوم سرعت مانند توزیع توانی و لگاریتمی سرعت، ماکزیمم سرعت را در سطح آزاد جریان بیش بینی می‌کنند، می‌توان به ضعف روابط کلی موجود زمانیکه در یک کانال با هندسه مشخص بکار برده می‌شوند، پی برد. علاوه بر این توزیع‌های سرعت موجود، قادر نیستند تغییرات سرعت را در دو جهت قائم و جانبی در مقطع کانال توصیف نمایند. بنابراین باید به دنبال مدلی بود که قادر باشد تغییرات سرعت در جهت قائم و عرضی را در نظر گرفته تا بتوان خطوط هم سرعت را در مقطع جریان ترسیم نمود.

یکی از عوامل مهم تصمیم‌گیری درمورد مسائل آبی نظیر طراحی سازه‌های هیدرولیکی، داشتن اطلاعات مربوط به میزان دبی در مقطع جریان است. سهولت و دقت اندازه‌گیری دبی در شرایط مختلف جریان بسیار حائز اهمیت است. روش‌های اندازه‌گیری دبی با استفاده از روش سرعت - مساحت که لازمه آن برداشت سرعت در نقاط نسبتاً زیادی از مقطع جریان می‌باشد، پرهزینه و زمان بر است. مثلاً در روش‌های نقطه‌ای

مرزی بوده و P پیرامون مرطوب است. بزرگی عدد بدست آمده از معادله (۷) معنی خاصی ندارد اما مقدار بی‌بعد شده آنها مهم است. معادله (۷) را می‌توان برای N نقطه دلخواه در مقطع جریان بکار برد، بنابراین می‌توان تابع سرعت متوسط را در مقطع جریان به صورت زیر نوشت:

$$U_e = \frac{\sum_{i=1}^N u_i A_i}{A} \quad (8)$$

که در آن U_e متوسط اثرات کل مرزها در مقطع جریان، A مساحت کل مقطع جریان و A_i مساحت مربوط به هر المان دلخواه در مقطع جریان است. با توجه به روابط فوق می‌توان معادله تجربی زیر را برای سرعت‌های بی‌بعد در هر نقطه دلخواه در مقطع جریان نظیر M نوشت [۱۶]:

$$\frac{u}{U_M} = \frac{u_M}{U_e} \quad (9)$$

که در آن U سرعت متوسط و u سرعت محلی جریان است.

۳- استفاده از قانون توانی سرعت در مدل

قانون توانی سرعت که از معادلات دیفرانسیل جزئی استخراج می‌شود برای جریان آشفته، یکتواخت و دائمی در لوله‌ها و کانال‌های عریض رو باز به صورت زیر نوشته می‌شود [۴]:

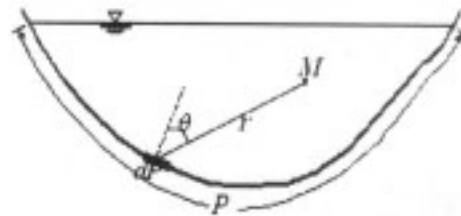
$$\frac{u}{u^*} = a \left(\frac{y}{y_0} \right)^n \quad (10)$$

که در آن y فاصله نقطه مورد نظر از کف کانال، u^* سرعت برشی جداره که از رابطه $u_* = \sqrt{\tau_0 / \rho}$ محاسبه می‌شود و در آن τ_0 تنش برشی جداره، ρ دانسیته سیال بوده و a و n ضرایب ثابت هستند. مقدار m با توجه به رژیم جریان و آشفتگی آن بین ۱/۱۲ تا ۱/۴ تغییر می‌کند اما در اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی یروقیل سرعت برای اعداد رینولدز تا 10^5 مشاهده شده که با $m = 1/7$ نتایج بهتری حاصل می‌شود [21]. مقدار y_0 طول مشخصه‌ای است که بستگی به شرایط هیدرولیکی جریان داشته و اغلب محققان آن را برابر $(9u^*)^2$ برای جریان

در هر امتداد می‌باشد، بنابراین می‌توان برای نقاط مختلف جداره سهمی از تأثیرگذاری سرعت در نقطه مورد نظر را قائل شد. لذا می‌توان اثرات مرزها را روی سرعت نقطه دلخواهی از مقطع جریان را به صورت تابعی نظیر f نوشت:

$$u_M \propto f(r) \quad (5)$$

که در آن u_M اثر مرزها بر روی سرعت نقطه دلخواه M ، f تابعی از سرعت بوده که بستگی به رژیم جریان دارد و r فاصله نقطه دلخواه تا المان مرزی را نشان می‌دهد (شکل ۲).



شکل ۲- اثر مرزها بر روی سرعت نقطه دلخواه

می‌توان تأثیر جداره بر سرعت در یک نقطه را با در نظر گرفتن اثرات ناشی از نیروی الکتریکی وارد بر یک ذره یا بار ساکن که در میدان الکتریکی سیمی یا جریان الکتریکی قرار می‌گیرد، شبیه سازی نمود. در این شبیه‌سازی سیم نقش بستر جریان و بار ساکن واقع در میدان نقطه مورد نظر که تحت تأثیر میدان جریان قرار می‌گیرد را ایفا می‌کند. با این تعبیر می‌توان فرض کرد که هر المان مرزی، dp بر روی سرعت نقطه M به صورت زیر اثر داشته باشد [۱۴، ۱۵، ۱۶]:

$$\delta u_M = cf(r) \cos \theta dp \quad (6)$$

بنابراین اثرات کل المان‌های مرزی را می‌توان با انتگرال‌گیری بر روی پیرامون مرطوب بدست آورد:

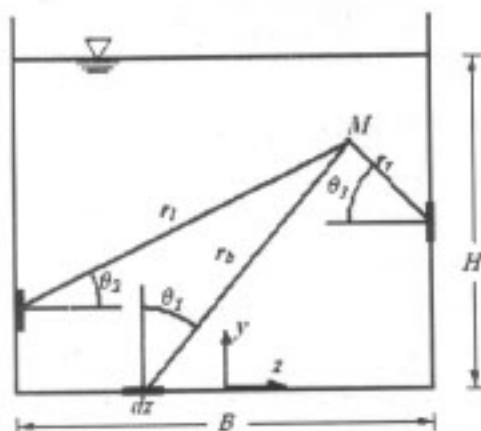
$$u_M = \int_P cf(r) \cos \theta dp \quad (7)$$

که در آن c ضریبی است که به سرعت برشی در جداره، عدد رینولدز محلی، شدت آشفتگی جریان و ارتفاع المان‌های زبری بستگی داشته. θ زاویه بین بردار موقعیت و بردار عمود بر المان

را در معادله (۱۲) جایگزین نمود (شکل ۳)، خواهیم داشت:

$$u_M = \int_{-B/2}^{B/2} c_b \gamma_M r_b^{m-1} dz + \int_{-H/2}^{H/2} c_l (B/2 + z_M) r_l^{m-1} dy + \int_{-H/2}^{H/2} c_r (B/2 - z_M) r_r^{m-1} dy \quad (13)$$

که در آن (z_M, y_M) مختصات نقطه دلبخواه در مقطع جریان، ضرایب c_b ، c_l و c_r مقادیر نسبی زیری است که با توجه به زیری هر جناره در جدول (۱) نشان داده شده است. با استفاده از معادلات (۸)، (۹) و (۱۳) میتوان سرعت‌های بی‌بعد را در کانال مستطیلی محاسبه نمود.



شکل ۳- سیستم مختصات و پارامترهای مدل

جدول ۱- ضریب زیری لایه‌های مختلف زیری

نسبت زیری‌ها	ضریب زیری مانینگ n	ارتفاع زیری k_s (mm)	نام لایه زیر
1	0.008	0.1	شیشه صاف
2.18	0.0183	11	زبری درشت
1.8	0.015	3.5	زبری ریز

۴- کارهای آزمایشگاهی

مطالعات آزمایشگاهی در یک کانال مستطیلی به عرض ۴۰ سانتی‌متر، ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر، طول ۸ متر و شیب حدود

از لحاظ هیدرولیکی صاف و $k_s/30$ برای جریان کاملاً زیر، گزارش کرده‌اند. [۴] k_s زیری معادل نیکورادزه و U لزجت سینماتیکی سیال است.

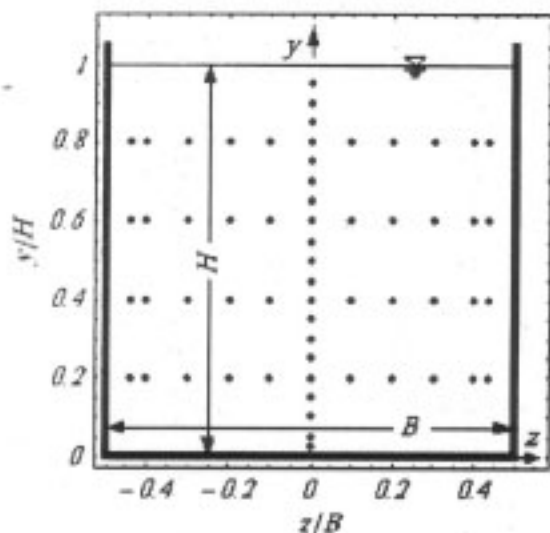
معادله (۱۰) نشان می‌دهد که سرعت با m نسبت مستقیم دارد. با توجه به اینکه در بسیاری از موارد مجرانی که در آن جریان برقرار می‌گردد نه به صورت یک صفحه تخت و عریض بوده و نه بصورت یک مجرای لوله‌ای شکل است. بنابراین بنظر می‌رسد جایگزینی r با r_l در معادله (۱۰) مشکل پیچیدگی هندسی مرزها را بنحوی حل نماید. لذا بمنظور لحاظ نمودن شرایط هندسی مجرانی که در آن جریان برقرار می‌گردد r بجای r_l جایگزین می‌شود و فرض می‌گردد که اثر المان مرزی بر روی تغییرات سرعت را بتوان به صورت زیر محاسبه نمود [۱۵، ۱۳]

$$\delta u_M = c r^m \cos \theta dP \quad (11)$$

در رابطه اخیر مقدار δu_M تغییرات اثر مرزها بر روی سرعت نقطه M است. با توجه به شکل (۳)، تابع سرعت شامل سه عامل مهم است [۱۰] اثر کف، اثرات دیواره‌ها و اثر سطح آزاد جریان. اگر از اثر سطح آزاد جریان صرفنظر شود برای تعیین اثرات مرزها از معادله (۱۱) برروی پیرامون مرطوب انگرال گیری می‌شود:

$$u_M = \int_{bed} c_b r_b^m \cos \theta_1 dz + \int_{left} c_l r_l^m \cos \theta_2 dy + \int_{right\ wall} c_r r_r^m \cos \theta_3 dy \quad (12)$$

که در معادله فوق c_b ، c_l و c_r به ترتیب برای کف، دیواره چپ و دیواره راست کانال، مقادیری هستند که به سرعت برشی جداره a ، m و y_0 بستگی دارند. با فرض واقع بودن مبدا مختصات در وسط کف کانال می‌توان نوشت: $r_b \cos \theta_1 = y_M$ و بطریق مشابه می‌توان روابط $r_r \cos \theta_3 = B/2 - z_M$ و $r_l \cos \theta_2 = B/2 + z_M$

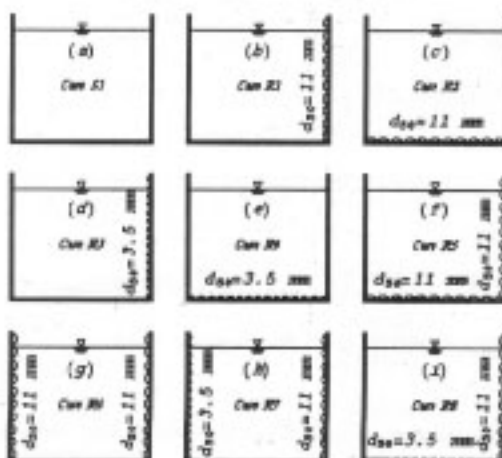
شکل ۵- نقاط اندازه‌گیری سرعت برای B/H های مختلف

۵- نتایج و بحث

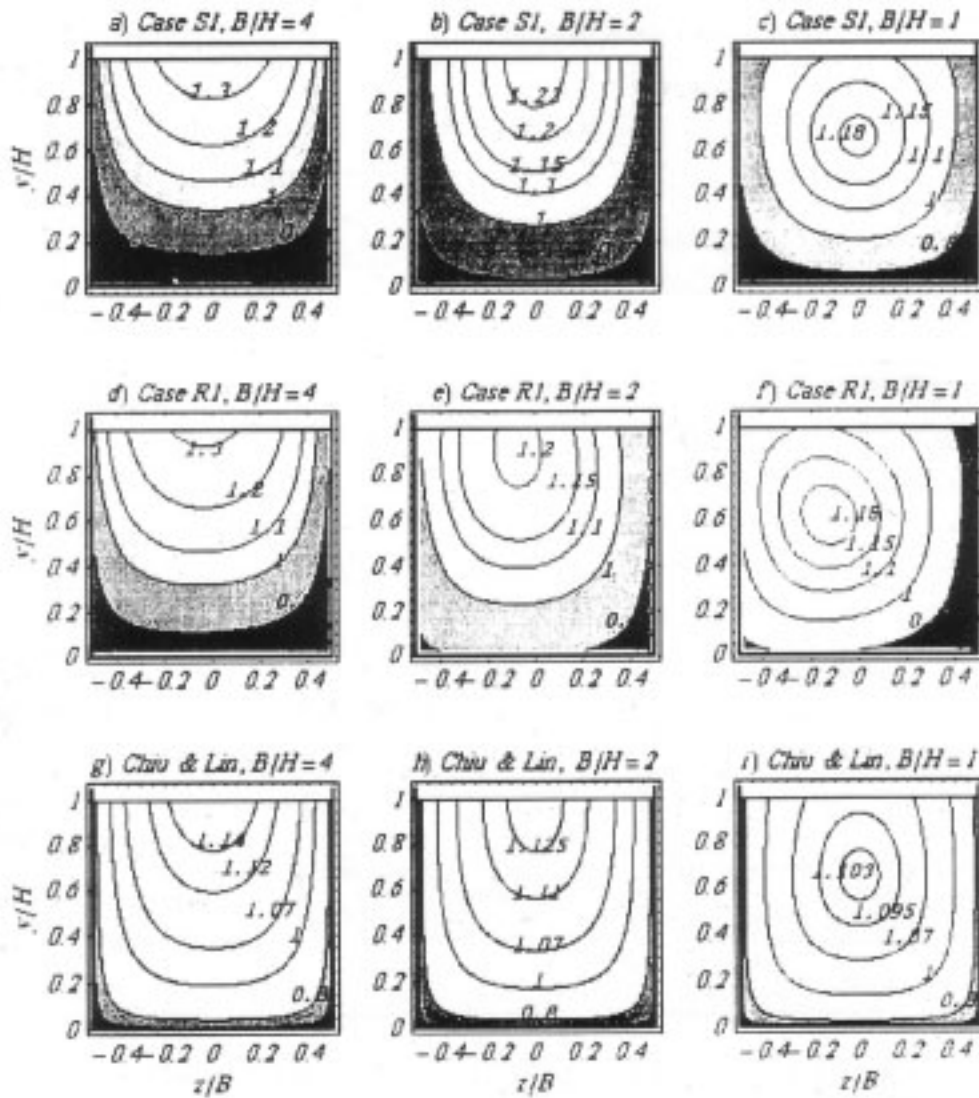
با استفاده از مدل پیشنهادی با مقدار $m=1/7$ خطوط هم سرعت بدون بعد در کانال مستطیلی در حالت‌های SI و $R1$ برای B/H های ۱، ۲، ۴ در شکل (۶) ترسیم شده است. مقادیر نشان داده شده بر روی خطوط هم سرعت نشان دهنده سرعت‌های بدون بعد شده با استفاده از سرعت میانگین مقطع، U می‌باشد. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که در حالت SI خطوط هم سرعت نسبت به $z/B=0$ متقارن بوده و ماکزیمم سرعت در $z/B=0$ اتفاق می‌افتد (شکل ۶a-c) اما در حالت $R1$ خطوط هم سرعت تقارن ندارند و ماکزیمم سرعت به دور از سطح زبر رانده شده و در $z/B < 0$ اتفاق می‌افتد (شکل ۶d-f). در $B/H=4$ خطوط هم سرعت برای هر دو حالت تقریباً موازی بستر کانال بوده و سرعت ماکزیمم در سطح آزاد جریان اتفاق می‌افتد. با این تفاوت که در حالت $R1$ مقدار سرعت ماکزیمم کمتر از حالت SI است (شکل ۶a,d).

۰/۰۰۱ جهت برقراری جریان یکنواخت انجام شد. سرعت محلی جریان به وسیله میکروپروپلر (Low Speed Probe 403) با دقت ۱٪ در محدوده ۱۵ تا ۳۰۰ سانتی‌متر بر ثانیه در مقطعی به فاصله ۲/۸ متر از بالادست کانال اندازه‌گیری شد. برای ایجاد زبری کف و دیواره‌های کانال از دو نوع شن به قطرهای $d_{50}=3.5\text{ mm}$ و $d_{50}=11\text{ mm}$ دانسیته نسبی ذرات ۲/۴۵ و زاویه پایداری برای دانه‌های درشت ۳۵ درجه و برای دانه‌های ریز ۳۱ درجه محاسبه شده است. برای محاسبه انحراف معیار هندسی ذرات، تعداد ۱۲۰ ذره با کولیس اندازه‌گیری شده و مقدار آن برابر ۲/۴ و ۱/۲۵ پرتیب برای دانه‌های درشت و ریز محاسبه شده است.

دانه‌های شن بطور یکنواخت بر روی شیشه چسبانده شدند و شیشه‌ها در امتداد یکدیگر در طول کانال بر روی کف و یا دیواره‌های کانال نصب شدند. آزمایشات برای ۹ حالت مختلف که در شکل (۳) نشان داده شده است، انجام شد. در هر حالت داده‌های آزمایشگاهی برای B/H های ۰.۴، ۲، ۴ و ۱/۳۳ جمع‌آوری شد و برای هر B/H حدود ۵۰ تا ۶۰ اندازه‌گیری سرعت در مرکز مقطع کانال در هر ۱ یا ۲ سانتی‌متر در جهت قائم و در هر y/H برابر ۰.۱۲، ۰.۲۴، ۰.۳۶ و ۰.۴۸ در جهت عرضی، به فواصل ۴ سانتی‌متر انجام شد (شکل ۵). در مجموع حدود ۹۳۰۰ داده جمع‌آوری شد.



شکل ۶- نمایش چیدمان‌های مختلف زبری در مقطع کانال



شکل ۶ - خطوط هم سرعت بدون بعد محاسبه شده در کانال مستطیلی صاف و با زبری غیر یکنواخت

معادلات توزیع سرعت Chiu & Lin نمیتواند خطوط هم سرعت را در مقطع کانال با زبری‌های مرکب پیش‌بینی کنند با این وجود نمایش خطوط هم‌سرعت در حالت $S1$ برای B/H های ۴، ۲ و ۱ با استفاده از این معادلات در شکل‌های (۶ g-i) ترسیم شده است. با توجه به شکل‌ها و همچنین معادلات توزیع سرعت Chiu & Lin مشاهده می‌شود که در $B/H = 4$ خطوط هم سرعت برای حالت $S1$ تقریباً موازی بستر کانال بوده و شیب خطوط هم سرعت بزرگتر از صفر است [۵]. در $B/H = 2$ خطوط هم سرعت برای حالت $S1$ بر سطح آزاد جریان عمود هستند و شیب خطوط هم سرعت بزرگتر

در $B/H = 2$ خطوط هم سرعت برای حالت $S1$ بر سطح آزاد جریان عمود هستند و سرعت ماکزیمم در سطح آزاد جریان اتفاق می‌افتد اما برای حالت $R1$ سرعت ماکزیمم در زیر سطح آزاد جریان اتفاق می‌افتد (شکل ۶b,e). در $B/H = 1$ سرعت ماکزیمم برای هر دو حالت در زیر سطح آزاد جریان اتفاق می‌افتد (شکل‌های ۶c,f) و برای حالت $R1$ به صورت واضح دیده می‌شود که ماکزیمم سرعت به فاصله‌ای دورتر از سطح زبر رانده شده است (شکل ۶f). مقایسه نتایج آزمایشات نیز موارد فوق را تأیید می‌نماید.

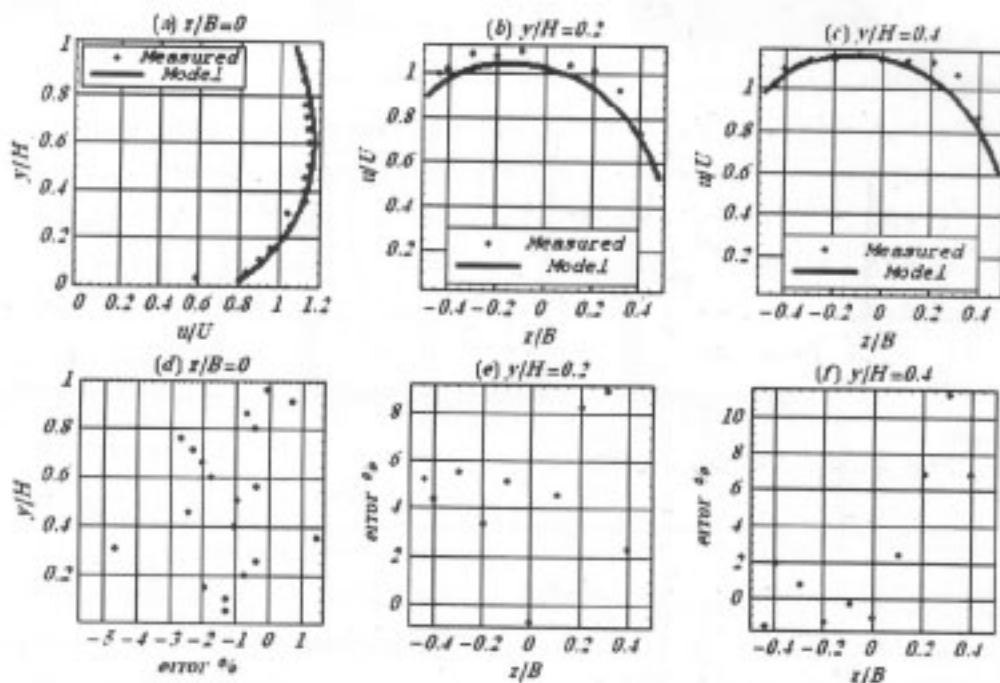
(شکل‌های 7a-c). خطای بین نقاط اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی‌های مدل با استفاده از معادله (۱۴) محاسبه شده است:

$$error = \frac{Q_m - Q_c}{Q_m} \times 100 \quad (14)$$

که مقدار Q_m مقدار اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه و Q_c مقدار محاسبه شده با استفاده از مدل می‌باشد. خطاها برای همه نقاط اندازه‌گیری شده برای حالت R1 در شکل‌های (7d-f) ترسیم شده است. مشاهده می‌شود که مدل پروفیل قائم را با خطای نسبی ۱۴٪ و پروفیل عرضی در $y/H = 0.2$ را با خطای نسبی ۴۱٪ و پروفیل عرضی در $y/H = 0.4$ را با خطای نسبی ۳۴٪ پیش‌بینی می‌کند.

و یا مساوی صفر است ($\epsilon = 0$) و سرعت ماکزیمم دقیقاً در سطح آزاد جریان اتفاق می‌افتد. در $B/H = 1$ سرعت ماکزیمم برای حالت S1 در زیر سطح آزاد جریان اتفاق می‌افتد ($\epsilon < 0$) و برای $y < D + \epsilon$ شیب خطوط هم سرعت بزرگتر از صفر و برای $y = D + \epsilon$ شیب خطوط هم سرعت مساوی صفر و برای $y > D + \epsilon$ شیب خطوط هم سرعت کوچکتر از صفر است [5, 6]. این مدل قادر به ارائه خطوط هم سرعت در کف‌های با زبری‌های غیر یکنواخت نمی‌باشد مگر آن که موقعیت حداکثر سرعت شناخته شده باشد.

در شکل (۷) پروفیل‌های سرعت در جهت قائم در محور مرکزی کانال ($z/B = 0$) و در جهت عرضی در y/H برابر ۰/۲ و ۰/۴ با استفاده از مدل ترسیم شده و با نقاط اندازه‌گیری شده برای حالت R1 با $B/H = 1$ مقایسه شده است



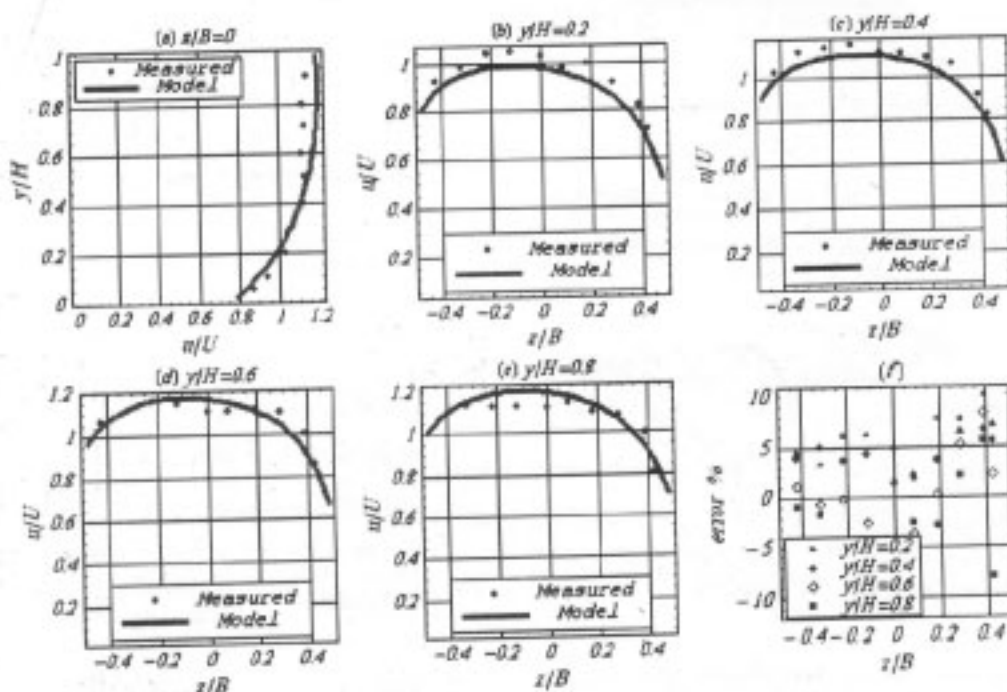
شکل ۷ - (a-c) مقایسه پروفیل‌های سرعت حاصل از مدل و نقاط اندازه‌گیری شده برای حالت R1 با $B/H = 2$ و (d-f) خطای تخمین دبی نظیر نقاط اندازه‌گیری شده

شده و با نقاط اندازه‌گیری شده برای حالت R5 با $B/H = 2$ مقایسه شده است (شکل‌های 8a-e). خطاها برای نقاط اندازه‌گیری شده در جهت عرضی برای حالت R5 در شکل

در شکل (۸) پروفیل‌های سرعت در جهت قائم ($z/B = 0$) و در جهت عرضی ($y/H = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$) با استفاده از مدل ترسیم

می‌کند. در شکل (۹) درصد خطای مقادیر محاسبه شده u/U و تعداد وقوع آنها ترسیم شده است. مشاهده می‌شود که ۹۵٪ مقادیر محاسبه شده، خطای کمتر از ۲۰٪ دارند و ۷۰٪ مقادیر محاسبه شده، خطای کمتر از ۱۰٪ دارند.

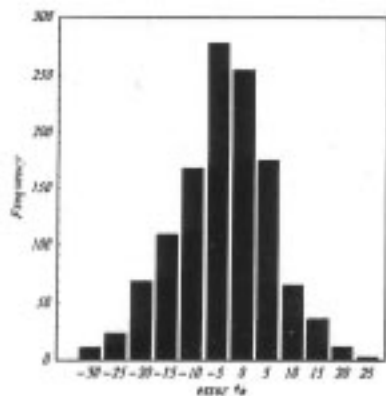
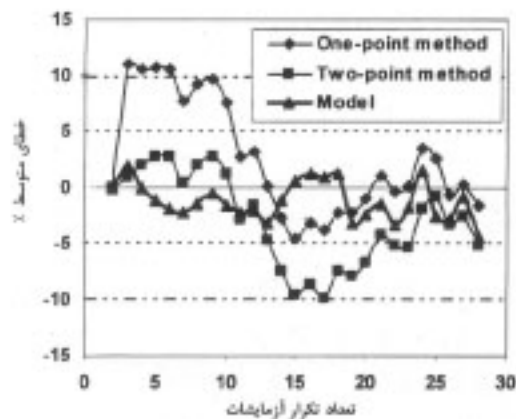
(۸ف) ترسیم شده است. مشاهده می‌شود که مدل پروفیل قائم را با خطای نسبی ۴/۱٪ و پروفیل عرضی در $y/H = 0.2$ را با خطای نسبی ۶/۴٪ و پروفیل عرضی در $y/H = 0.4$ را با خطای نسبی ۴/۵٪ و پروفیل عرضی در $y/H = 0.6$ را با خطای نسبی ۳٪ و پروفیل عرضی در $y/H = 0.8$ را با خطای نسبی ۴/۲٪ پیش بینی می‌کند. در مجموع دو حالت مدل پروفیل‌های قائم و عرضی را با خطای نسبی ۴٪ پیش‌بینی



شکل ۸ - مقایسه پروفیل‌های سرعت حاصل از مدل و نقاط اندازه‌گیری شده برای حالت $R5$ با $B/H = 2$. محور مرکزی کانال، (b-e) بترتیب در $y/H = 0.2$ الی 0.8 و (f) خطای تخمین دبی نظیر نقاط اندازه‌گیری شده

توجه شود که برای تخمین دبی با استفاده از مدل حاضر، موقعیت نقطه انتخابی در $y/H = 0.4$ انتخاب شده است و دبی جریان با استفاده از مدل برای B/H های مختلف چندین بار محاسبه شده و با روشهای تک نقطه‌ای و دو نقطه‌ای مقایسه شده است. مقایسه دبی اندازه‌گیری شده با دبی تخمین زده شده نشان می‌دهد که متوسط خطاهای این مدل از حدود ۵٪ تجاوز نمی‌کند اما متوسط خطاهای روش دو نقطه‌ای در حدود ۱۰٪ و روش یک نقطه‌ای بیش از ۱۰٪ است (شکل ۱۰). در مراجع دیگر خطای تخمین دبی برای B/H های ۱/۲۵، ۱/۶۷ و ۱ به ترتیب

با استفاده از خطوط هم سرعت بدست آمده می‌توان دبی جریان را تخمین زد. راهکار بدین صورت است که در یک نقطه دلخواه از مقطع عرضی سرعت جریان، u ، اندازه‌گیری می‌شود سپس با توجه به موقعیت نقطه اندازه‌گیری شده، مقدار عددی خطوط هم سرعت بدون بعد (\bar{u}) که برابر u/U است، استخراج می‌شود. آنگاه دبی جریان با استفاده از $Q = Au/\bar{u}$ تخمین زده می‌شود که در آن A مساحت مقطع جریان و Q دبی جریان است. در شکل (۱۰) متوسط خطا برای روش‌های تخمین دبی (روش یک نقطه‌ای، دو نقطه‌ای و مدل حاضر) ترسیم شده است.

شکل ۹- درصد خطاهای محاسبه U/U و تعداد رخداد آنهاشکل ۱۰- خطای محاسبات انجام شده جهت تخمین دبی برای چیدمان‌های شکل ۴ در B/H های مختلف

نمادها	
A	مساحت مقطع جریان
a	ضریب در قانون توانی سرعت
B	عرض کانال مستطیلی
c	ضریب تناسب
c_b, c_h, c_r	ضرائبی به ترتیب برای کف کانال، دیواره چپ و دیواره راست کانال
D	عمق جریان در معادلات توزیع سرعت Chiu & Lim
f	تابع
H	عمق جریان
k_s	ضریب زبری نیکورادزه

برای روش یک نقطه‌ای ۱۵٪، ۱۷٪ و ۱۸٪ و برای روش دو نقطه‌ای ۱۱٪، ۱۴٪ و ۱۴٪ گزارش شده است [۱۳].

۶- خلاصه و نتیجه‌گیری

روشی ساده برای تخمین خطوط هم سرعت بدون بعد در مجاری مستقیم و کانال‌های روباز ارائه شده است. این روش نه تنها در ارائه الگوی خطوط هم سرعت و ترسیم پروفیل‌های سرعت در جهت قائم و افقی، ضرائب تصحیح انرژی و مومنم اطلاعات مفیدی را تولید می‌کند بلکه در تخمین دبی نیز روشی مؤثر، کم هزینه و با خطای قابل قبول می‌باشد. با استفاده از خطوط هم سرعت بدون بعد و اندازه‌گیری سرعت نقطه‌ای دلخواه در مقطع جریان، دبی جریان با خطای کمتر از ۵٪ تخمین زده می‌شود.

همچنین مدل پروفیل‌های قائم و عرضی را با خطای نسبی ۴٪ پیش‌بینی می‌کند. سادگی مدل از خصوصیات اصلی آن است.

مدل دارای پارامترهای کم بوده و تخمین آنها بسیار ساده است. نیاز به اطلاعات هندسی از مقطع جریان و نیز شرایط مرزی مقطع به همراه خصوصیات هیدرولیکی جریان نظیر تنش‌های برشی از اطلاعات اساسی در کاربرد مدل بوده که می‌توان با برآورد تقریبی آنها به جواب‌های نسبتاً خوبی از مدل دست یافت.

علاوه بر آن مدل قادر به ارائه خطوط هم سرعت در مقاطع منظم و یا نامنظم با زیربهای مرکب می‌باشد. مقایسه نتایج تخمین دبی حاصل از مدل عددی با داده‌های آزمایشگاهی حاکی از دقت بسیار خوب مدل در مقایسه با سایر روش‌های متداول می‌باشد. بعلاوه کار میدانی مورد نیاز در این روش به مراتب کمتر از سایر روش‌های میدانی اندازه‌گیری دبی جریان می‌باشد.

بر اساس نتایج ارائه شده، مدل ماکزیمم سرعت را برای نسبت‌های $B/H < 2$ در زیر سطح آزاد جریان پیش‌بینی می‌کند. نتایج حاصل از مدل نشان می‌دهد که با افزایش زبری سطح، ماکزیمم سرعت به فاصله‌های دورتر از سطح زیر رانده می‌شود.

- agricultural hydrology. Agriculture Handbook 224, USDA, Washington, Dc.
- [3] Chaudhry, M. H. (1993). Open channel flow. Prentice-Hall, Inc., A Simon & Schuster Company Englewood Cliffs, New Jersey.
- [4] Chen, C. L. (1991). "Unified theory on power laws for flow resistance." *J. Hydraulic Eng.*, 117(3), 371-389.
- [5] Chiu, C. L. (1989). "Velocity distribution in open channel flow." *J. Hydraulic Eng.*, 115(5), 576-594.
- [6] Chiu, C. L., and Lin G. F., (1983). "Computation of 3-D flow and shear in open channels", *J. Hydraulic Eng.*, 109(11), 1424-1440.
- [7] Chow, V. T. (1959). Open channel hydraulics. McGraw-Hill, New York, USA.
- [8] Goudie, A. (1981). Geomorphological techniques. George Allen & Unwin, London, edited for the British Geomorphological Research Group.
- [9] Guo, J. and Julien, P. Y. (2005). "Shear stress in smooth rectangular open-channel flows." *J. Hydraulic Eng.* 131(1), 30-36.
- [10] Guo, J. and Julien, P. Y. (2002). "Modified log-wake law in smooth rectangular open-channels." Proc. of the 13th APD-IAHR Congress, Singapore, August 6-8, 87-99.
- [11] Kinori, B. Z. and Mevorach, J. (1984). "Manual of surface drainage engineering." Volume II stream flow engineering and flood protection, Elsevier, New York.
- [12] Knight, D. W., Demetriou, J. D. and Hamed, M. E. (1984). "Boundary shear in smooth rectangular channels." *J. of Hydraulic Eng.* 110(4), 405-422.
- [13] Maghrebi, M. F. (2003). "Discharge Estimation in flumes using a new technique for the production of isovel contours." Proc. of Inter. Conf. on Civil and Envi. Eng., ICCEE, Hiroshima, Japan, 147-156.
- [14] Maghrebi, M. F. (2006). "Application of the single point measurement in discharge estimation." *Advances in Water Resources* 29(10), 1504-1514.
- [15] Maghrebi, M. F. and Ball J. E. (2006). "New method for estimation of discharge." *J. Hydraulic Eng.* 132(10), 1044-1051.
- [16] Maghrebi, M. F. and Rahimpour M., (2005). "A simple model for estimation of dimensionless isovel contours in open-channels." *Flow Measurement and Instrumentation* 16(6) 347-352.
- ثابت m
- تعداد نقاط در مقطع جریان N
- فاصله نقطه مورد نظر تا امان مرزی r
- فاصله نقطه مورد نظر تا امان مرزی به ترتیب برای کف کانال، دیواره چپ و دیواره راست کانال r_b, r_s, r_r
- سرعت متوسط جریان U
- متوسط اثرات کل مرزها در مقطع جریان U_o
- سرعت محلی متوسط زمانی u
- $u/U (= \tilde{u})$ سرعت بی بعد
- اثر مرزها بر روی سرعت نقطه دلخواه i ام u_i
- سرعت برشی جداره u_*
- جهت جریان x
- جهت قائم y
- طول مشخصه ای است که بستگی به شرایط هیدرولیکی جریان دارد Y_n
- مختصات امان مرزی (z, y)
- مختصات نقطه دلخواه در مقطع جریان (z_{in}, y_{in})
- ضرائب مشخصات توزیع سرعت $\beta, \xi_0, \delta_1, \delta_2$ Chiu & Lin δ_3, ϵ
- ثابت ون کارمن K
- لزجت سینماتیکی ν
- دانسیته سیال ρ
- تنش برشی جداره τ_0
- زاویه بین بردار موقعیت و بردار عمود بر امان مرزی θ
- زاویه بین بردار موقعیت و بردار عمود بر امان مرزی به ترتیب برای کف کانال، دیواره چپ و دیواره راست کانال $\theta_1, \theta_2, \theta_3$
- مراجع
- [1] Balachandar, R., Hagel, K. and Blakely, D. (2002). "Velocity distribution in decelerating flow over rough surfaces." *Canadian J. of Civil Eng.*, 29, 211-221.
- [2] Brakensied, D. L., Osborn, H. B. and Rawls, W. J. (1979). Field manual for research in