

## بررسی تحلیلی نظریه‌های سرعت طولی در راستای عمقی جریان

یعقوب آزدان<sup>۱</sup>، جعفر چابک‌پور<sup>۲\*</sup>، علیرضا عمادی<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۹۷/۱۰/۱۴

تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۴/۲۶

۱-دانش آموخته دکتری سازه‌های آبی، کارشناس امور منابع آب شهرستان میاندوآب

۲-استادیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه

۳-دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

\* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: [j.chabokpour@maragheh.ac.ir](mailto:j.chabokpour@maragheh.ac.ir)

### چکیده

محاسبه سرعت طولی در راستای قائم و استخراج نظریه‌های کاربردی برای آن در طول سالیان در بین مهندسان هیدرولیک رواج داشته است. در بسیاری از تحقیقات پیشین، محققان با تقسیم عمق جریان به چندین قسمت مجزا از کف کانال تا سطح آب اقدام به استخراج روابط کاربردی برای هر قسمت نموده‌اند. به جز زیرلایه لزج که همگی بر پروفیل خطی سرعت در آن اتفاق نظر دارند، مابقی عمق جریان معمولاً با قانون لگاریتمی شبیه‌سازی می‌گردد که دقت تخمین سرعت توسط این قانون با فاصله گرفتن از کف کانال کمتر می‌شود. همچنین قانون لگاریتمی قابلیت شبیه‌سازی نقطه سرعت بیشینه که در عمقی پائین‌تر از سطح آب رخ می‌دهد را نیز ندارد. در این تحقیق با جمع‌آوری دوازده سری داده آزمایشگاهی که توسط محققان پیشین و در شرایط آزمایشگاهی مختلف برداشت شده است و همچنین با به کارگیری سه نظریه لگاریتمی، خیزآب و خیزآب اصلاح شده اقدام به شبیه‌سازی پروفیل‌های سرعت طولی در راستای قائم گردید. در نهایت مشاهده شد که پروفیل سرعت استخراج شده توسط قانون خیزآب اصلاح شده تطابق بهتری با داده‌های آزمایشگاهی دارد و قادر به پیش‌بینی نقطه سرعت بیشینه در عمقی پائین‌تر از سطح آب است. برای حل معادله مربوط به این نظریه پارامترهای ون کارمن، ضریب قدرت خیزآب و سرعت برشی مجهول فرض گردید و سپس با استفاده از روش بهینه‌سازی غیرخطی کمترین مربعات اقدام به استخراج مقادیر مربوطه گردید.

واژه‌های کلیدی: تابع خیزآب، تابع خیزآب اصلاح شده، سرعت طولی در راستای قائم، قانون لگاریتمی

## Analytical Investigation of Longitudinal Velocity Theories in Flow Vertical Direction

Y Azhdan<sup>1</sup>, J Chabokpour<sup>2\*</sup>, AR Emadi<sup>3</sup>

Received: 2019-1-4

Accepted: 2019-7-17

<sup>1</sup>Ph. D Graduate in Water Structures Engineering, Water Resources Engineer, Miandoab Township Office, Iran

<sup>2</sup>Assist. Prof., Faculty of Engineering, University of Maragheh, Iran

<sup>3</sup>Assoc. Prof., Dept. of Water Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Iran

\*Corresponding Author, Email: jafarchabokpour@yahoo.com

### Abstract

Computation of longitudinal velocity in the vertical direction and extracting the applied theories have been conventional manner from past years among the hydraulic engineers. In many previous investigations, the researchers have tried to extract some applied equations, separately, by dividing the flow depth namely from bed to water surface to various regions. As it is accepted by all of the researchers, the laminar sublayer zone has a linear velocity profile while out of this zone, the velocity simulation follows a logarithmic law which its accuracy in estimation of the velocity decreases by increasing the distance from the bottom of the channel. Also, it is not applicable for dip phenomenon which occurs bellow the free surface. In the current study, 12 experimental data series, operated under different experimental conditions, were collected from previous researches. Also, three common theories of log law, log- wake law, and modified log- wake law have been applied to simulate longitudinal velocity profile in the vertical direction. Finally, it is seen that the modified log- wake law has a better agreement with the experimental data, and also it can be operated for predicting the dip phenomenon bellow the free surface. For solving the equation of the mentioned theory, the factors of von Karman, wake strength, and shear velocity are assumed unknown. Then, the mentioned parameters have been extracted using a non-linear optimization technique of the least square curve fitting.

**Keywords:** Longitudinal velocity in vertical direction, Log law, Log- wake law, Modified log- wake law

### مقدمه

پروفیل سرعت در نواحی بیرونی از مقبولیت بیشتری برخوردار است با اصلاح قانون لگاریتمی و اضافه نمودن تابع شدت خیزآب کولز (۱۹۵۶) حاصل می‌گردد. استیرنز (۱۸۸۳) با انجام مطالعه جریان در کانال‌های روباز مشخص نمود که بر خلاف وضعیت معمولاً قابل قبول برای جریان‌های رودخانه‌ای، حداکثر سرعت در عمقی پائین‌تر از سطح آب رخ می‌دهد این فرآیند با کمتر شدن عرض کانال بهتر خود را نشان می‌دهد. یعنی هرچه عرض کانال کمتر باشد محل سرعت بیشینه، بیشتر به عمق جریان منتقل می‌شود. نیکورادزه (۱۹۳۳) با چسباندن دانه‌های زبر بر روی جداره لوله‌ها آزمایشات وسیعی را در خصوص نحوه

اندازه‌گیری پروفیل سرعت متوسط در مقطع عرضی یک آبراهه یکی از مسایل مهم و اساسی در مدل‌سازی هیدرولیکی می‌باشد و برای تعیین سرعت متوسط، سرعت بیشینه، برآورد دبی، ارزیابی تنش برشی و نیز انتقال رسوب، مطالعه آن ضروری به نظر می‌رسد. در مجاری روباز، پروفیل سرعت در نواحی داخلی یعنی مناطقی که در آن‌ها نسبت فاصله از کف (Z) به عمق کل (h)،  $\left(\frac{z}{h} \leq 0.2\right)$  باشد، توسط قانون لگاریتمی کلاسیک به خوبی توصیف می‌گردد، اما در نواحی بیرونی جریان  $\left(\frac{z}{h} > 0.2\right)$ ، قانون لگاریتمی از داده‌های آزمایشگاهی انحراف نشان می‌دهد و قانون لاگ-ویک که برای توصیف

ناحیه بیرونی از دقت خوبی برخوردار بوده، ولی مشخصات نقطه تلاقی ناحیه داخلی و بیرونی در تمام موارد یکسان نیست. شیونو و فنگ (۲۰۰۳) توزیع سرعت برای مقاطع مرکب را مورد بررسی قرار داد و معادله‌ای را برای آن ارائه داد که اثرات شیب تند کانال و جریان ثانویه در آن دیده شده بود و در این مقاطع مرکب سرعت بیشینه در ۰/۵ تا ۰/۷ (عمق جریان) رخ می‌داد. جعفری و همکاران (۱۳۹۵) به بررسی عددی توزیع سرعت به ازای زبری‌های مختلف نیمکره با فواصل مختلف و مقاطع متفاوت در طول کانال پرداختند. نتایج بررسی عددی آن‌ها نشان داد که در جریان روی بستر زبر، سرعت جریان در طول کانال افزایش یافته و سرعت‌های بیشینه در فاصله ۰/۳۲ تا ۰/۹۶۷ عمق جریان از کف بستر زبر تشکیل می‌شود. بنکداری (۲۰۰۷) بر اساس تجزیه و تحلیل معادلات ناویر استوکس، رابطه جدیدی را برای محاسبه پروفیل سرعت عمودی در وسط مقطع عرضی برای شرایط جریان پایدار متلاطم توسعه یافته در مجاری روباز ارائه نمود. از قابلیت‌های این رابطه می‌توان به پیش‌بینی سرعت متوسط در ناحیه بیرونی لایه مرزی متلاطم در آبراهه‌های باریک و عریض اشاره نمود. کوندو و گوشال (۲۰۱۲) بر اساس داده‌های آزمایشگاهی، توزیع سرعت در مجاری روباز را مورد بررسی مجدد قرار داده و پیشنهاد نمودند که لایه خیزآب در ناحیه بیرونی به دو قسمت تقسیم گردد. قسمت نسبتاً ضعیف ناحیه بیرونی که در آن تنش برشی دیواره بر تنش برشی موجود در سطح آزاد آب در آبراهه‌های باریک غالب است و نیز قسمت نسبتاً قوی ناحیه بیرونی که تنش برشی سطح آزاد در مجاری عریض و باریک مهمتر از تنش برشی دیواره می‌باشد. آنان با ترکیب قانون لگاریتمی برای ناحیه داخلی و قانون سهمی برای قسمت نسبتاً قوی لایه خیزآب معادله‌ای صریح برای توزیع سرعت جریان در آبراهه‌های مستقیم ارائه نمودند، همچنین

توزیع سرعت در لوله‌ها انجام نمود. ایشان رژیم‌های جریان تشکیل شده در این مجاری را نیز مورد بررسی قرار داد و رابطه‌ای را نیز برای پروفیل سرعت جریان متلاطم ارائه نمود. رابطه لگاریتمی برای توزیع سرعت نیز اولین بار توسط ایشان پیشنهاد گردید. پرستون (۱۹۵۴) یک روش غیرمستقیم برای تعیین توزیع تنش برشی بر روی پیرامون خیس شده مجاری روباز و ارتباط آن با توزیع سرعت ارائه نمود. بگنولد (۱۹۵۵) با انجام تعدادی آزمایش بر روی کانال‌هایی با بستر درشت‌دانه و کولز (۱۹۵۶) با تحقیق روی موضوع قانون خیزآب در لایه مرزی متلاطم اقدام به اصلاح روش غیرمستقیم ارائه شده توسط پرستون نمودند. ونونی (۱۹۴۶)، اینشتین و چین (۱۹۵۵)، ونونی و نومیکوس (۱۹۶۰) و الاتا و آیین (۱۹۶۱) با بررسی‌های آزمایشگاهی نشان دادند که قانون لگاریتمی سرعت در سراسر عمق جریان صادق بوده و ادعا نمودند که مقدار ثابت ون کارمن با رسوب معلق کاهش می‌یابد. بعداً کولمن (۱۹۸۶) نشان داد که مقدار ثابت ون کارمن در ناحیه نزدیک کف تحت تاثیر بار معلق قرار نمی‌گیرد و پارکر و کولمن (۱۹۸۶)، کیوفی و گالرانو (۱۹۹۱) صحت استدلال کولمن را تایید کردند. چن (۱۹۹۱) مدل توانی عمومی را برای توزیع سرعت در مجاری روباز ارائه نمود و دامنه کاربرد توان‌های مختلف را تجزیه و تحلیل کرد (نقل از کوندو و گوشال ۲۰۱۲). سارما و همکاران (۲۰۰۰) با جمع‌آوری داده‌های اندازه‌گیری شده در انستیتو علوم هندوستان برای ۴ نوع رژیم جریان متلاطم، شامل زیربحرانی صاف، زیربحرانی زبر، فوق‌بحرانی صاف و فوق‌بحرانی زبر، به مطالعه تفصیلی قانون توزیع سرعت دو تایی (رابطه لگاریتمی برای ناحیه داخلی و رابطه سهمی برای ناحیه خارجی) در مجاری روباز پرداختند. آنان نتیجه‌گیری کردند، برای توزیع سرعت در آبراهه‌های باریک، قانون لگاریتمی در ناحیه داخلی و قانون سهمی در

شکل به این نتیجه رسیدند که وجود این گرفتگی‌ها باعث ایجاد گردابه‌هایی در اطراف این گرفتگی‌ها شده و باعث ایجاد اختلال در الگوی جریان می‌شود. همچنین ایشان نتیجه‌گیری نمودند که الگوی توسعه جریان در مجاورت این گرفتگی‌ها مشابه توسعه لایه مرزی می‌باشد. قوش (۲۰۱۶)، با انجام یک پژوهش اقدام به بررسی جریان متلاطم زبر درون لوله‌های مستقیم نمود و با استفاده از حل تحلیلی معادله لگاریتمی سرعت به بررسی تغییرات ضریب ون کارمن بر روی پروفیل طولی سرعت پرداخت و در نهایت نتیجه‌گیری نمود که مقدار انتخابی برای این ضریب اثرات زیای در پروفیل‌های سرعت بازسازی شده دارد.

با نگاهی به پژوهش‌های پیشین، چنین برداشت می‌شود که هنوز یک دید کلی نسبت به دقت این سه روش و نحوه استفاده کردن از آن‌ها با لحاظ کردن داده‌های متنوع از منابع مختلف وجود ندارد. لذا در این مطالعه سعی گردید تا با استفاده از داده‌های مختلف از محققان پیشین، اولاً نحوه استفاده و سپس دقت هرکدام از این مدل‌های تحلیلی مورد آزمون قرار گیرد تا یک نتیجه‌گیری واحد در خصوص دقیق‌ترین مدل برای محاسب سرعت طولی در راستای عمق جریان انجام پذیرد.

### مواد و روش‌ها

#### مبانی نظری تحقیق - معادلات پروفیل سرعت

در بیشتر موارد، جریان در کانال‌های روباز متلاطم است. در جریان متلاطم سرعت لحظه‌ای، در یک نقطه مشخص در یک لحظه معین تغییر می‌کند. به بیان دیگر در یک نقطه مشخص، سرعت از لحظه‌ای به لحظه دیگر در

دریافتند که غلظت رسوب تاثیر مهمی در توزیع سرعت قسمت نسبتاً ضعیف لایه خیزآب دارد. بنکداری و احدی (۲۰۱۳) به ارزیابی و مقایسه ۴ مدل مختلف شامل مدل‌های چيو (۱۹۸۷)، سارما و همکاران (۲۰۰۰)، یانگ و همکاران (۲۰۰۴)، بنکداری (۲۰۰۷) برای محاسبه پروفیل سرعت طولی در راستای عمودی در آبراهه‌های باریک پرداختند. ایشان برای مقایسه از نتایج داده‌های آزمایشگاهی که از اندازه‌گیری واقعی در یک مجرای فاضلاب باریک صورت گرفته بود استفاده نمودند. آنان محدوده گسترده‌ای از پروفیل‌های سرعت در آبراهه‌های باریک را جهت اعتبارسنجی و مقایسه مدل‌ها به کار برده و نتیجه‌گیری کردند که همه مدل‌ها نتایج قابل قبولی در ناحیه مرکزی آبراهه ارائه می‌نمایند، همچنین مشخص نمودند که مدل یانگ برای پیش‌بینی سرعت در نزدیک دیواره‌ها از دقت خوبی برخوردار است. بینش و بنکداری (۲۰۱۴) با انتخاب ۴ مدل توزیع سرعت شامل، مدل یانگ و همکاران (۲۰۰۴)، مدل بنکداری (۲۰۰۷)، مدل ابسی (۲۰۱۱) و مدل کوندو و قوشال (۲۰۱۲) به بررسی کارایی آنها در پیش‌بینی سرعت طولی در مقطع عرضی آبراهه‌های باریک پرداختند. آنان برای ارزیابی دقت مدل‌ها در محاسبه پروفیل سرعت، نتایج مدل‌ها را با داده‌های آزمایشگاهی که از اندازه‌گیری واقعی در یک کانال فاضلاب باریک بدست آمده بود، مورد مقایسه قرار دادند. نتیجه تحقیق آنها حاکی از تطابق خوب همه مدل‌ها با نتایج آزمایشگاهی بود، اگر چه مدل ابسی و مدل کوندو و قوشال در پیش‌بینی موقعیت سرعت بیشینه بسیار موفق بوده و از کمترین RMSE در بیشتر موارد برخوردار می‌باشند.

مفتاح و موسی (۲۰۱۵)، با استفاده از یک مدل لگاریتمی اصلاح شده اقدام به بررسی ساختار جریان درون مجاری نیمه‌گرفته پرداختند و با برداشت داده‌های آزمایشگاهی با استفاده از گرفتگی‌های صلب استوانه‌ای

انحراف ضروری می‌نماید. به نظر می‌رسد علت این عدم تبعیت در دو موضوع مستتر باشد الف) فرض تنش ثابت در کل جریان و برابر با تنش کل در بستر ب) فرض طول اختلاط از روی نظریه گازها و برابر با  $l_m = \kappa z$ . به همین دلیل سعی در ارائه مدل‌های جدیدتری گردید تا قادر به پوشش کامل داده‌های سرعت طولی در راستای عمقی باشد. اولین تلاش در این خصوص توسط کولز (۱۹۵۶) انجام شد. کولز (۱۹۵۶) توصیف کاملی از توزیع سرعت را با اعمال مدل خیزآب برای جریان متلاطم پایدار در مجاری روباز به صورت رابطه [۲] ارائه نمود.

$$\frac{v_x}{u_*} = \left[ \frac{2.3}{\kappa} \log \left( \frac{zu_*}{v_m} \right) + 5.5 \right] - \frac{\Delta v_x}{u_*} \quad [2]$$

$$+ \frac{2\Pi_w}{\kappa} \sin^2 \left( \frac{\pi z}{2h} \right)$$

که در آن:  $v_x$  سرعت طولی در راستای عمقی جریان،  $u_*$  سرعت برشی،  $\kappa$  ضریب ون کارمن،  $z$  فاصله از کف آبراهه،  $v_m$  ویسکوزیته سینماتیکی سیال،  $\Delta v_x$  مقدار کاهش سرعت در نتیجه زبری بستر،  $\Pi_w$  ضریب شدت خیزاب و  $h$  عمق جریان است.

#### مدل خیزآب اصلاح شده - Modified Log- Wake Law

به دلیل اینکه در بسیاری از موارد داده‌های صحرائی و آزمایشگاهی برداشت شده نشان‌دهنده سرعت بیشینه در نقطه‌ای پائین‌تر از سطح جریان هستند لذا اصلاحاتی بر روی مدل خیزآب انجام گردید. تا بتواند این نقطه ضعف مدل خیزآب را مرتفع نماید. جو و جولین (۲۰۰۳) اصلاحیه‌ای را برای مدل خیزآب با اضافه نمودن یک ترم به معادله آن ارائه نمودند و در نهایت پس از ساده‌سازی رابطه [۳] را برای پیش‌بینی پروفیل سرعت جریان پیشنهاد نمودند. قابل ذکر است که مدل خیزآب اصلاح شده یک پارامتر بیشتر از مدل خیزآب درون خود دارد که ممکن است در بعضی از موارد کاربرد آن را با دشواری‌هایی همراه سازد.

طول زمان حول یک مقدار میانگین افزایش و کاهش می‌یابد. معمول آن است که در جریان متلاطم، سرعت لحظه‌ای را به دو مولفه سرعت متوسط و سرعت نوسانی تفکیک می‌کنند. در این تحقیق با توجه به بررسی‌های انجام شده سه مدل کاربردی شامل قانون لگاریتمی، مدل خیزآب و مدل خیزآب اصلاح شده برای مدل‌سازی توزیع سرعت طولی در راستای عمقی جریان انتخاب گردیده است.

#### مدل لگاریتمی - Log Law

در جریان متلاطم علاوه بر نیروهای لزجت، به علت اختلاط ذرات سیال و گرداب‌های ریز، تنش‌های برشی دیگری به نام تنش‌های برشی ظاهری یا تنش‌های رینولدز بوجود می‌آیند. با صرف نظر کردن از تنش لزجت و در نظر گرفتن تنش رینولدز و اعمال نظریه طول اختلاط پارانتدل به واسطه برقراری تشابه با تئوری طول اختلاط گازها و در نهایت اعمال انتگرال‌گیری رابطه [۱] برای توزیع سرعت لگاریتمی حاصل می‌گردد.

$$\frac{v_x}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0} \quad [1]$$

که در آن:  $v_x$  سرعت طولی در راستای عمقی جریان،  $u_*$  سرعت برشی،  $\kappa$  ثابت ون کارمن،  $z$  فاصله از کف آبراهه،  $z_0$  فاصله از کف آبراهه که سرعت در آن نقطه برابرصفر است.

#### مدل خیزآب - Log-Wake Law

با افزایش فاصله از کف کانال، انحراف از پروفیل سرعت لگاریتمی قابل مشاهده است. در حال کلی دو نوع انحراف از قانون لگاریتمی سرعت قابل مشاهده است یکی مربوط به عدم تبعیت از قانون لگاریتمی سرعت در ارتفاع‌های بالاتر از کف (نواحی بیرونی) و دیگری مربوط به اصلاح اثر جداره می‌باشد. با توجه به موضوع این تحقیق و با لحاظ کردن مورد اول لزوم کنکاش درباره علت این

اعمال داده‌های آزمایشگاهی و یا صحرایی به آن، مقادیر مربوطه در محدوده‌های تعیین شده توسط کد نویسی جستجو گردید. قابل ذکر است که ممکن است بعضاً جواب-هائی بدست بیاید که از لحاظ ریاضی درست باشند ولی از لحاظ فیزیکی صحت نداشته باشند لذا تعیین محدوده‌های مجاز برای هر پارامتر و جستجو درون آن دامنه‌ها از موارد مهم در این خصوص است. برای بدست آوردن پروفیل سرعت لگاریتمی، ابتدا با ثابت فرض نمودن مقدار  $0.41$  برای ثابت ون کارمن و استفاده از سرعت برشی مربوط به شرایط آزمایشگاهی اقدام به برقراری برآزش خطی مابین مقادیر  $\log(z)$  و سرعت طولی گردید تا مقدار  $z_0$  محاسبه گردد. مقدار این پارامتر عرض از مبدا معادله برآزش خطی مابین پارامترهای مذکور می‌باشد. سپس داده‌های مربوط به سرعت محاسبه شده از معادله لگاریتمی و برای هر دوازده سری آزمایشگاهی در شکل-های ۱ تا ۴ و با نماد (LL) ارائه گردید. با دقت در این اشکال می‌توان فهمید که مقادیر سرعت محاسبه شده توسط این معادله در بیشتر سری داده‌ها بیشتر از مقادیر آزمایشگاهی بوده و یا اصطلاحاً می‌توان گفت که این معادله تخمین بیش از واقعیت انجام می‌دهد. همچنین این معادله قادر به پیش‌بینی سرعت بیشینه در عمقی پائین‌تر از سطح آب نمی‌باشد و مقدار سرعت بیشینه را برای سطح جریان ارائه می‌نماید. در فرآیند استخراج معادله لگاریتمی سرعت دو فرض اساسی انجام شده که با ماهیت جریان سازگاری کامل ندارد؛ اولین فرض در تخمین طول اختلاط با استفاده از روش پارانتدل انجام شده است که مقدار آن را تابع خطی از عمق جریان فرض کرده و مقدار عددی  $0.41$  را برای ثابت ون کارمن از داده‌های آزمایشگاهی استخراج گردید.

$$\frac{v_x}{u_*} = \left[ \left( \frac{1}{k} \ln \frac{zu_*}{v_m} + B \right) + \frac{2\Pi W}{k} \sin^2 \frac{\pi\xi}{2} \right] - \frac{\xi^3}{3k} \quad [۳]$$

در رابطه فوق، B عدد ثابت مربوط به زبری دیواره،  $\xi = \frac{z}{z_m}$  فاصله بدون نسبت به موقعیت نقطه دیپ،  $z_m$  فاصله از کف آبراهه که سرعت در آن نقطه بیشینه است (نقطه دیپ). سایر پارامترها در مدل خیزاب معرفی شده است.

### داده‌های آزمایشگاهی مورد استفاده

در این تحقیق ۱۲ سری داده اندازه‌گیری پروفیل سرعت طولی که توسط محققان مختلف در سال‌های متفاوت و با شرایط آزمایشگاهی مختلفی برداشت شده‌اند، جمع‌آوری گردید (جدول ۱). به دلیل در دسترس نبودن جداول داده، از نرم افزار Plot Digitizer به منظور استخراج مقدار عددی داده‌ها استفاده گردید (داده‌ها از پروفیل‌های سرعت منتشر شده در مقاله جو (۲۰۱۳) مربوط به کولمن (۱۹۸۶)، لین (۱۹۸۸)، موسته و پاتل (۱۹۹۷) و نیز مقاله گونزالس و همکاران (۱۹۹۶) استخراج شده است). بعد از استخراج داده‌های سرعت اندازه‌گیری شده و بکارگیری نظریه‌های لگاریتمی، مدل خیزاب و مدل خیزاب اصلاح شده دقت این روش‌ها در پیش‌بینی پروفیل سرعت در مجاری روباز دارای داده اندازه‌گیری شده مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرد.

### نتایج و بحث

در کد نویسی متلب سعی گردید تا از روش Least Square Curve Fitting (روش برآزش کمترین مربعات) که یکی از روش‌های بهینه‌سازی متداول در متلب می‌باشد استفاده گردد. در این روش ابتدا تعداد پارامترهای مجهول با اندیس نمایه‌دار در داخل فرم‌های مورد نظر مدل تحلیلی و با توجه به نوع رابطه تحلیلی انتخاب شده تعیین شد و سپس با

جدول ۱- شرایط آزمایشگاهی داده‌های اندازه‌گیری شده و پارامترهای هیدرولیکی

نام محقق و سال تحقیق شرایط آزمایشگاهی	کولمن (۱۹۸۶)			لین (۱۹۸۸)				موسسه و پاتل (۱۹۹۷)			گونزالز و همکاران (۱۹۹۴) با دستگاه ADCP	گونزالز و همکاران (۱۹۹۵) با دستگاه ADCP
	RUN1	RUN2	RUN3	C1	C2	C3	C4	CW1	CW2	CW3		
شیب طولی (هزارم)	۲	۲	۲	۲/۰۶	۲/۷	۲/۹۶	۴/۰۱	۰/۷۴۱	۰/۷۶۸	۰/۸۱۳	۰/۰۲۸۹	۰/۰۰۴۸۳
دما (سانتیگراد)	۲۱/۱	۲۳/۸	۲۱/۷	۱۸/۷	۳۰/۲۱	۲۱	۲۱/۳	۱۸/۴	۱۷/۲	۱۷/۴	-	-
ویسکوزیته سینماتیکی (متر مربع $10^{-6}$ بر ثانیه)	۱/۰۰۵۸	۰/۹۱۹۴	۰/۹۶۵۶	۱/۰۳۸۴	۰/۹۷۴۴	۰/۹۸۱	۰/۹۷۴۴	۰/۹۲۱۴	۱/۰۷۹۵	۱/۰۷۳۷۲	-	-
عمق جریان (سانتیمتر)	۱۷/۲	۱۶/۹	۱۷/۳	۶/۵۴	۶/۵۲	۵/۷۵	۵/۶۹	۱۳	۱۲/۸	۱۲/۷	۷۴۵	۸۲۳
نسبت عرض به عمق	۲/۰۷	۲/۱۱	۲/۰۶	۴/۰۸	۴/۰۹	۴/۶۴	۴/۶۹	۷	۷/۱۱	۷/۱۶	۶/۵۷	۵/۹۵
سرعت برشی (سانتیمتر بر ثانیه)	۴/۱۴	۴/۱۳	۴/۱۵	۳/۰۵	۳/۴۹	۳/۵	۴/۰۶	۲/۷۸	۲/۸۲	۲/۸۹	۴/۶	۲
سرعت متوسط (متر بر ثانیه)	۰/۸۸۶	۱/۰۸۴	۱/۲۱۱	۰/۶۳۳	۰/۹۲۴	۱/۰۵۱	۱/۳۳۲	۰/۴۷۵	۰/۶۲۰	۰/۷۷۷	۰/۶۸	۰/۲۹
عدد رینولدز	۶۰۵۹۸۸	۷۹۶۹۹۵	۸۶۸۰۹۰	۱۵۹۴۰۸	۲۴۷۶۶۶	۲۴۶۵۰۳	۳۱۱۰۶۶	۲۶۷۸۱۳	۲۹۴۱۶۷	۳۶۷۴۱۵	۵۶۰۰۰۰	۳۶۰۰۰۰
عدد فرود	۰/۶۸	۰/۸۴	۰/۹۳	۰/۷۹	۱/۱۵	۱/۴۰	۱/۷۸	۰/۴۲	۰/۵۵	۰/۷۰	۰/۰۸	۰/۰۳

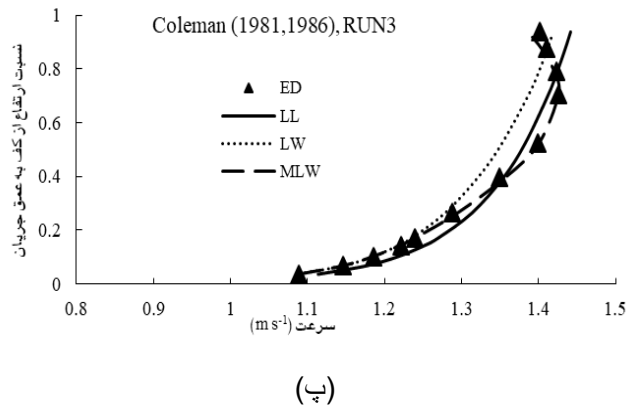
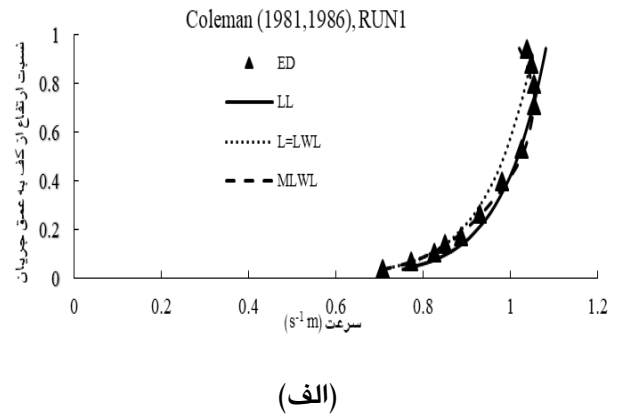
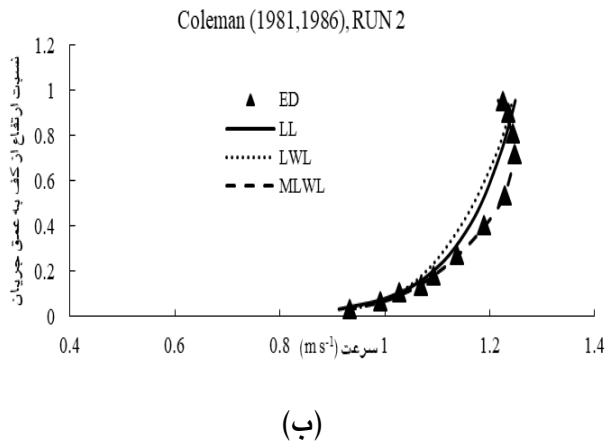
برداشت شده هستند و این معادله نیز همانند معادله لگاریتمی سرعت، مقدار سرعت بیشینه را در سطح آب پیش‌بینی می‌نماید. لکن می‌توان گفت که دقت تخمین آن نسبت به معادله لگاریتمی سرعت بهبود یافته است.

تابع خیزآب اصلاح شده هم دارای مولفه‌های تلاطمی جریان است و هم قابلیت شبیه‌سازی نقطه دیپ را دارا است لکن برای رسم منحنی نظری مربوطه ابتدا اقدام به استخراج پارامترهای جریان اعم از ضریب ون کارمن ( $K$ )، ضریب شدت خیزآب ( $\Pi_w$ ) و همچنین سرعت برشی ( $u_*$ ) با استفاده از تکنیک بهینه‌سازی غیر خطی کمترین مربعات گردید و سپس پروفیل سرعت با استفاده از تابع خیزآب اصلاح شده ترسیم گردید و مشاهده شد که از میان سه معادله به کار رفته بهترین تطابق با داده‌های آزمایشگاهی مربوط به این معادله می‌باشد.

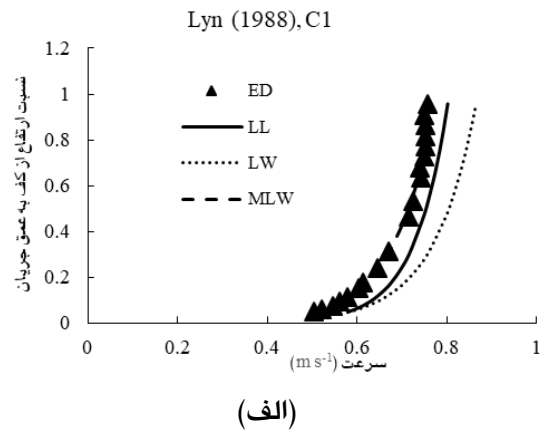
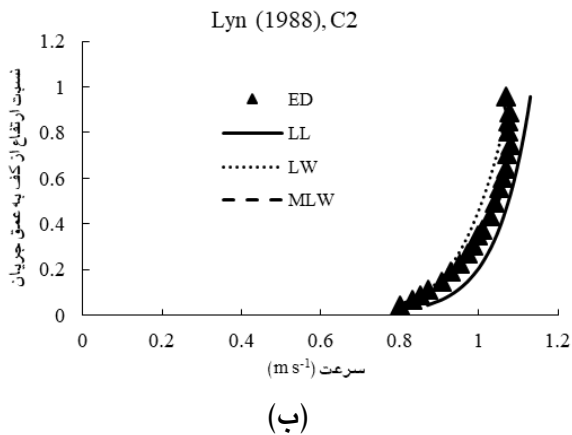
قابل ذکر است که ثابت ون کارمن از بحث‌های مهم در روابط پروفیل سرعت است عده‌ای از محققان اعتقاد به ثابت بودن آن دارند و عده دیگری از آن‌ها اعتقاد به متغییر بودن آن دارند. در میان این دو گروه داده‌های آزمایشگاهی و صحرایی برداشت شده و روند انجام تحقیق حاضر مشخص می‌نمایند که این ضریب ثابت نبوده و می‌تواند در محدوده (۰/۲۵-۰/۴۱) تغییر نماید. حتی با استفاده از پروفیل لگاریتمی سرعت و با اندازه‌گیری سرعت برشی، سرعت طولی و ارتفاع از کف کانال مقادیر ثابت ۰/۴۱ برای این ضریب گاه‌ب‌گاه بدست نیامد و تغییرات آن در محدوده فوق‌الذکر مشهود می‌باشد. در مدل‌های خیزآب با اعمال نقاط نزدیک به کف کانال و خیزآب اصلاح شده نیز با اعمال روش LSCF می‌توان این تغییرات را به وضوح مشاهده نمود.

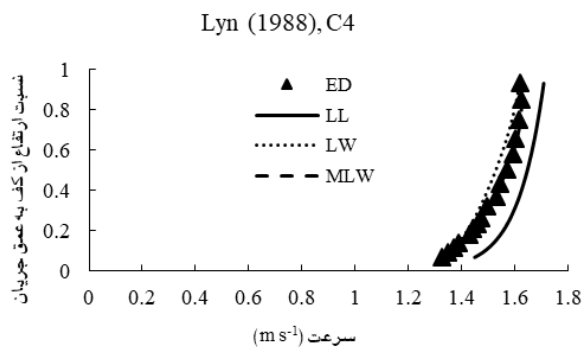
دومین فرض نیز مربوط به برابر دانستن تنش کل جریان با تنش کف کانال است که این موضوع نیز با ماهیت جریان‌های متلاطم و نحوه تبادل مومنتم بین لایه‌های مختلف سیال ناسازگار است به همین جهت و در راستای برطرف نمودن دو نقیصه معادله لگاریتمی، قانون خیزآب ارائه شده که در مورد پارامترهای آن قبلاً بحث گردیده است. به منظور ترسیم پروفیل سرعت با استفاده از قانون مذکور ابتدا لازم بود تا ضریب ون کارمن ( $K$ ) و ضریب شدت خیزآب ( $\Pi_w$ ) محاسبه شده و سپس اقدام به ترسیم منحنی مذکور گردد. از میان روش‌های حل ارائه شده در این خصوص متداول‌ترین روش استفاده از داده‌های ۱۵ درصد پائینی عمق جریان است. به دلیل اینکه عملاً با نزدیک شدن به کف کانال ضریب شدت خیزآب به صفر میل می‌نماید، به همین جهت با استفاده از ایجاد تابع نقصان سرعت مابین هر نقطه و سطح جریان که دارای سرعت بیشینه است و ایجاد رابطه خطی مابین پارامترهای  $\left(\frac{v_{max}-v}{u_*}\right)$  و  $\log\left(\frac{z}{h}\right)$  در ۱۵ درصد پائینی عمق جریان رابطه خطی برقرار می‌نمائیم و سپس ضریب ون کارمن را از شیب خط برقرار شده محاسبه نموده و با ادامه دادن خط برازشی تا سطح جریان یا نقطه  $\left(\frac{z}{h}\right)$  برابر با ۱ مقدار ضریب شدت خیزآب محاسبه می‌گردد. قابل ذکر است که ایجاد خط برازشی مابین ۱۵ درصد پائینی عمق از موارد بسیار مهم در این خصوص است چون که عملاً در این نقاط عبارت‌های مربوط به پارامترهای خیزآب برابر با صفر هستند. نمودارهای نظری مورد ذکر برای هر دوازده سری داده آزمایشگاهی در شکل‌های ۱ تا ۴ و با نماد (LW) آورده شده‌اند. با دقت در این نمودارها می‌توان فهمید که مقادیر محاسباتی توسط این معادله کمتر از مقادیر آزمایشگاهی



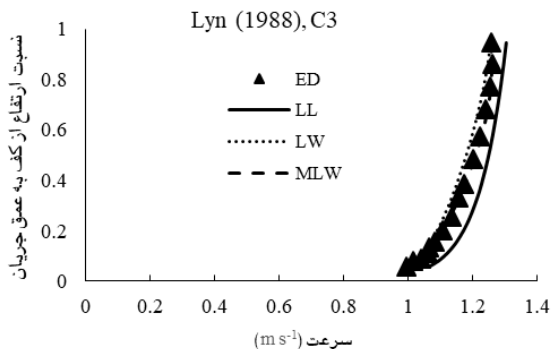


شکل ۱- داده‌های مشاهداتی و پروفیل‌های جریان برای نظریه‌های لگاریتمی، خیزآب و خیزآب اصلاح شده برای داده‌های آزمایشگاهی کولمن به ترتیب برای الف) سری اول ب) سری دوم و پ) سری سوم آزمایش‌ها



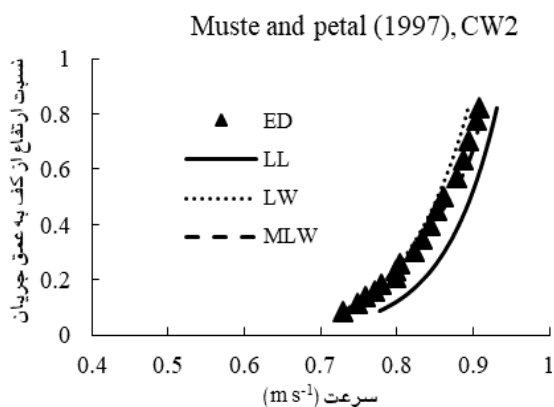


(ت)

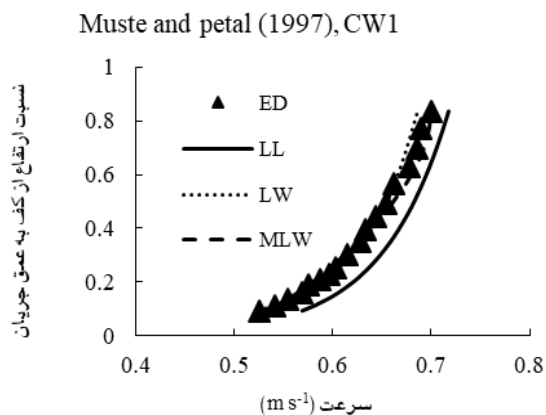


(پ)

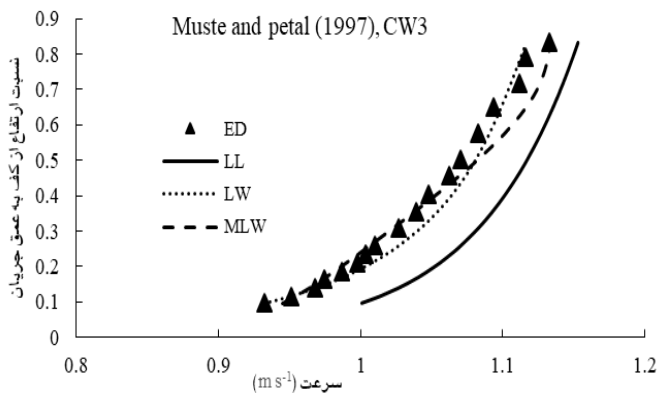
شکل ۲- داده‌های مشاهداتی و پروفیل‌های جریان برای نظریه‌های لگاریتمی، خیزآب و خیزآب اصلاح شده برای داده‌های آزمایشگاهی لین به ترتیب برای الف) سری اول ب) سری دوم پ) سری سوم ت) سری چهارم آزمایش‌ها



(ب)

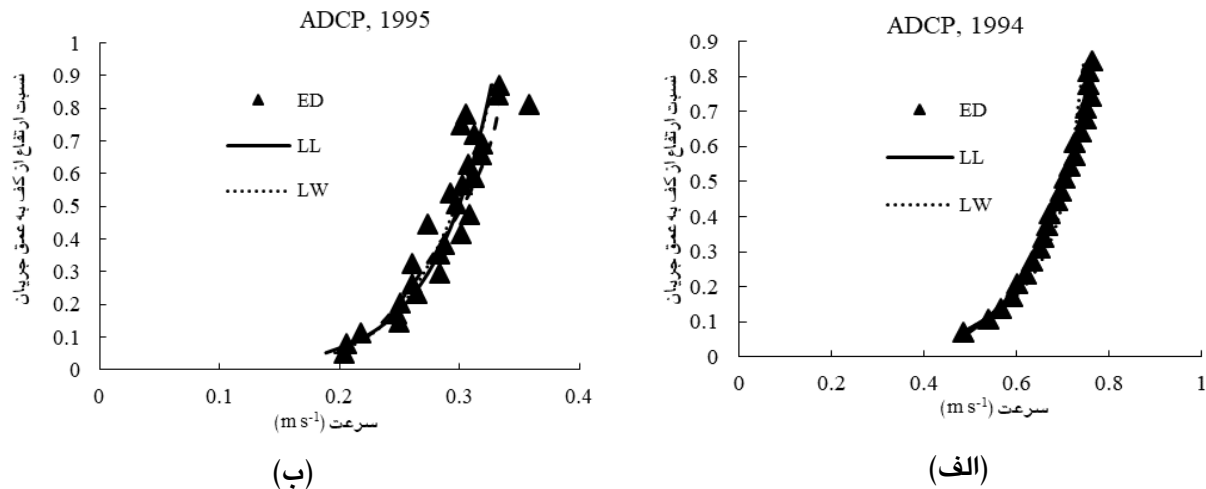


(الف)



(ج)

شکل ۳- داده‌های مشاهداتی و پروفیل‌های جریان برای نظریه‌های لگاریتمی، خیزآب و خیزآب اصلاح شده برای داده‌های آزمایشگاهی موسسه و پیتل به ترتیب برای الف) سری اول ب) سری دوم و پ) سری سوم آزمایش‌ها

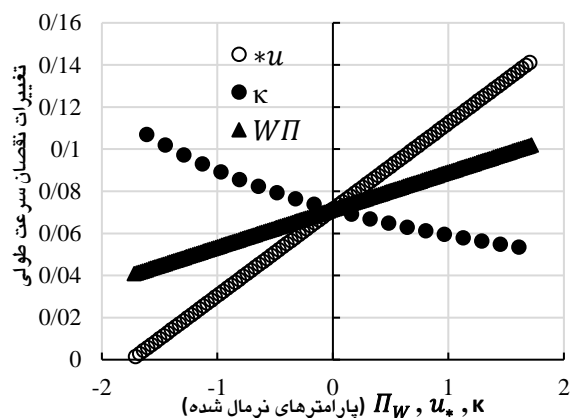


شکل ۴- داده‌های مشاهداتی و پروفیل‌های جریان برای نظریه‌های لگاریتمی، خیزآب و خیزآب اصلاح شده برای داده‌های آزمایشگاهی برداشته شده توسط دستگاه سرعت سنج صوتی (ADCP) ترتیب برای الف) سری اول ب) سری دوم آزمایش‌ها

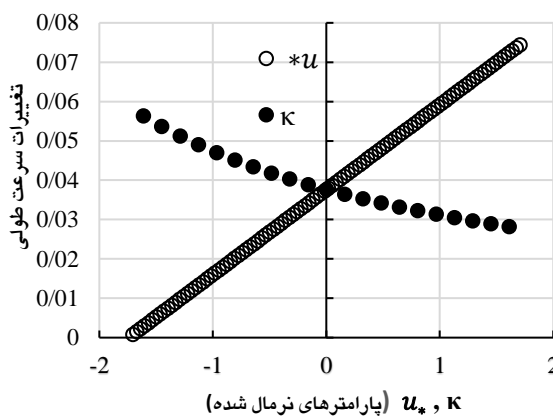
انحراف معیار هرکدام انجام شده و تمامی پارمترها در محدوده (۲- تا ۲) نمایش داده شدند. نتایج موید این نکته بود که در مدل لگاریتمی تغییر سرعت برشی و ضریب ون کارمن به ترتیب اثر افزایشی و کاهششی به صورت خطی بر سرعت طولی جریان در یک عمق ثابت دارد (شکل ۵ الف). در مدل خیزآب اصلاح شده ضریب ون کارمن اثر خطی کاهششی داشته ولی سرعت برشی و شدت خیزآب اثر خطی افزایششی در میزان سرعت طولی دارند ولی می‌توان گفت که شیب تغییرات سرعت برشی نسبت به پارامتر شدت خیزآب بیشتر بوده و می‌توان نتیجه‌گیری نمود که پارامتر سرعت برشی در این مدل اثرات بیشتری نسبت به بقیه پارامترها دارد (شکل ۵ ب). همچنین در مدل خیزآب اصلاح شده روند ذکر شده برای مدل خیزآب صادق بوده تنها با این تفاوت که پارامتر  $\xi$  اثر دوگانه از خود نشان

با توجه به اینکه تحلیل حساسیت هر سه مدل تحلیلی استفاده شده در این تحقیق ضروری به نظر می‌رسد لذا مجدداً با استفاده از کد نویسی در متلب، سعی گردید تا حساسیت مدل لگاریتمی نسبت به دو پارامتر  $(K, u_*)$ ، مدل خیزآب نسبت به سه پارامتر  $(K, u_*, \Pi_w)$  و مدل خیزآب اصلاح شده نسبت به چهار پارامتر  $(K, u_*, \Pi_w, \xi)$  انجام گردد. در انجام آنالیز حساسیت با ثابت فرض نمودن همه پارامترها به جز پارامتری که بررسی اثر تغییرات آن مورد نظر است، سعی گردید تا با تغییر آن در محدوده‌های استخراج شده از طریق داده‌های آزمایشگاهی و صحرایی این پژوهش، اثر آن در هر مدل تحلیلی مورد آزمون قرار گیرد. همچنین به منظور اینکه تمامی متغیرهای محور طولی در یک محدوده نمایش داده شوند، فرآیند نرمال-سازی پارامترها بر روی آن‌ها از طریق میانگین و

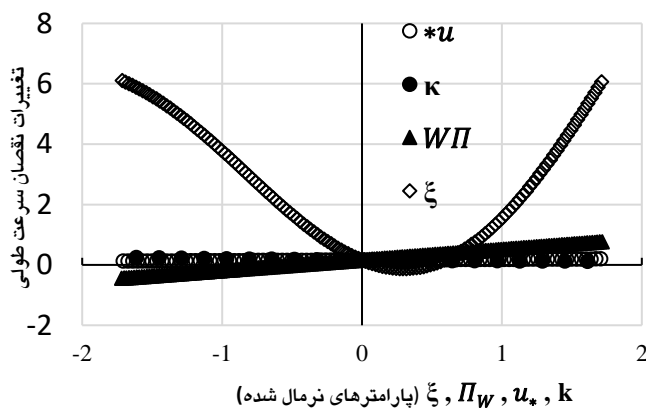
داده و هم اثر کاهشی و هم اثر افزایشی دارد (شکل ۵ پ).  
 قدر مسلم آن است که با دقت در نمودار مربوطه این نکته  
 نتیجه‌گیری می‌شود که در این مدل پارامتر  $\xi$  مهمترین  
 پارامتر در تعیین سرعت می‌باشد.



(ب)



(الف)



(پ)

شکل ۵- تحلیل حساسیت مدل‌های الف) لگاریتمی، ب) خیزآب، پ) خیزآب اصلاح شده نسبت به متغیرهای آن‌ها.

## نتیجه‌گیری کلی

بوده لکن برای حل مولفه‌های مجهول آن نیاز به تکنیک‌های بهینه‌سازی غیرخطی می‌باشد لذا در این تحقیق با استفاده از کدنویسی در MATLAB اقدام به استخراج همزمان پارامترهای مجهول این نظریه اعم از  $(k, u_*, \Pi_w)$  با استفاده از روش کمترین مربعات گردیده و مشاهده شد که منحنی ترسیمی با این روش بسیار بهتر از نظریه‌های لگاریتمی و خیزآب قادر به پیش‌بینی پروفیل سرعت عمقی می‌باشد لکن برای تخمین سرعت با مقداری خطا می‌توان قانون لگاریتمی را که دارای روش حل ساده‌تری نسبت به دو روش دیگر می‌باشد، به تمامی عمق جریان (به جز زیرلایه لزج) توسعه داد.

محاسبه سرعت طولی در راستای عمقی جریان در طول سالیان از مسائل مورد علاقه مهندسان هیدرولیک بوده است و نظریه‌های بسیار متنوعی درباره آن‌ها ارائه شده است. ولی با وجود پیشرفت روابط ارائه شده و پوشش بهتر داده‌های آزمایشگاهی، تکنیک‌های حل آن‌ها نیز رفته رفته پیچیده‌تر شده است. در این تحقیق با جمع آوری دوازده سری داده آزمایشگاهی که از منابع مختلف به دست آمده بود و همچنین به‌کارگیری سه نظریه متداول مورد استفاده برای سرعت طولی جریان در راستای عمقی، نتیجه‌گیری گردید که نظریه خیزآب اصلاح شده قادر به پوشش بهتر داده‌های آزمایشگاهی و نقطه سرعت بیشینه

## منابع مورد استفاده

- Absi R, 2011. An ordinary differential equation for velocity distribution and dip- phenomenon in open channel flows. *Journal of Hydraulic Research* 49(1):82-89.
- Bagnold BRA, 1955. Some flume experiments on large grains but little denser than the transporting fluid and their implications. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers* 4(2):174-205.
- Binesh N and Bonakdari H, 2014. Longitudinal velocity distribution in compound open channels: comparison of different mathematical models. *International Research Journal of Applied and Basic Sciences* :8(9):1149-1157.
- Bonakdari H, 2007. Velocity profile in turbulent boundary layers. Pp. 1-6, 32<sup>nd</sup> Congress of the International Association of Hydraulic Engineering & Research, July, Venice, Italy.
- Bonakdari H and Ahadi MS, 2013. Comparison of different models for evaluating the velocity profiles in narrow sewers. *Journal of Basic and Applied Scientific Research* 3(12):273-288.
- Chiu CL, 1987. Entropy and probability concept in hydraulics. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE* 113(5):583-600.
- Cioffi F and Gallerano F, 1991. Velocity and concentration profiles of solid particles in a channel with movable and erodible bed. *Journal of Hydraulic Research* 29(3):387-401.
- Coles D, 1956. The law of the wake in the turbulent boundary layer. *Journal of Fluid Mechanics* 1(2):191-226.
- Coleman NL, 1986. Effects of suspended sediment on the open- channel velocity distribution. *Water Resources Research* 22(10):1377-1384.
- Einstein HA and Chein N, 1955. Effects of heavy sediment concentration near the bed on velocity and sediment distribution. U. S. Army Corps of Engineers, Missouri River Division Rep. No 8.
- Elata C and Ippen AT, 1961. The dynamics of open channel flow with suspensions of neutrally buoyant particles. Technical Report No.45, Hydrodynamics lab MIT.
- Gonzalez JA, Melching CS and Oberg KA, 1986. Analysis of open- channel velocity measurements collected with an acoustic Doppler current profiler. Pp.1-8, Reprint from RIVERTECH 96 Proceedings from the 1st

- International Conference on New/Emerging Concepts for Rivers Organized by the International Water Resources Association Held September 22-26, 1996, Chicago, Illinois, USA.
- Gosh TK, 2016. Logarithmic velocity profile for turbulent flow in straight rough pipe and evaluation of Karman constant with boundary layer Reynolds number- A complete solution. *International Journal of Scientific & Engineering Research* 7(2):157-162.
- Guo J, 2013. Modified log-wake-law for smooth rectangular open channel flow. *Journal of Hydraulic Research* 52(1):121-128.
- Guo J and Julien PY, 2003. Modified log-wake law for turbulent flow in smooth pipes. *Journal of Hydraulic Research* 41(5):493-501.
- Jafari F, Abbaspour A and Hosseinzadeh Dalir A, 2016. Numerical investigation of velocity profiles in open channels with rough bed. *Water and Soil Science-University of Tabriz* 26(3.1):81-93. (In Farsi)
- Kundu S and Ghoshal K, 2012. Velocity distribution in open channels: combination of log-law and parabolic-law. *World Academy of Science, Engineering and Technology* 6:2145-2152.
- Meftah M and Moussa M, 2015. A modified log-law of flow velocity distribution in partly obstructed open channels. *Environmental Fluid Mechanic* 16(2):453-479.
- Nikuradse J, 1933. *Laws of Turbulent Flow in Rough Pipes*, Translation by National Advisory Committee for Aeronautics, Technical Memorandum 1292, NACA, Washington.
- Parker G and Coleman NL, 1986. Simple model of sediment-laden flows. *Journal of Hydraulic Engineering* 112:356-375.
- Preston JH, 1954. The determination of turbulent skin friction by means of pitot tubes. *Journal of Royal Aeronautical Society* 58(518):109-121.
- Sarma KVN, Prasad BVR and Sarma AK, 2000. Detailed study of binary law for open channels. *Journal of Hydraulic Engineering* 126:210-214.
- Shiono K and Feng T, 2003. Turbulence measurements of dye concentration and effects of secondary flow on distribution in open channel flows. *Journal of Hydraulic Engineering* 129(5):373-384.
- Stearns EP, 1883. A reason why the maximum velocity of water flowing in open channel is below the surface. *Transactions of the Journal of American Society of Civil Engineers* 7(1883):331-338.
- Vanoni VA, 1946. Transportation of suspended sediment by water. *Transactions of the American Society of Civil Engineers* 111:67-133.
- Vanoni VA and Nomicos GN, 1960. Resistance properties in sediment- laden streams. *Transactions of the American Society of Civil Engineers* 125:1140-1167.
- Yang SQ, Tan SK and Lim SY, 2004. Velocity distribution and Dip phenomena in smooth uniform open channel flow. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE* 130(12):1179-1186.