

مقاومت جریان و توزیع سرعت در کانال‌ها با مقاطع مثلثی شکل

میرعلی محمدی^{۱*}، حسین محمد نژاد^۲ و حمزه ابراهیم نژادیان^۳

۱-دانشیار، گروه آموزشی مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۲-کارشناسی ارشد سازه‌های هیدرولیکی، گروه آموزشی مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۳-دانشجوی دکتری سازه‌های هیدرولیکی، گروه آموزشی مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

m.mohammadi@urmia.ac.ir

چکیده: موضوع مقاومت جریان و نحوه توزیع سرعت جریان در کانال‌ها جمع‌آوری، انتقال و توزیع آب، همواره از موضوعات مورد بحث دانش پژوهان هیدرولیک بوده است. با توجه به کمبود داده‌ها و مطالعات آزمایشگاهی، انجام تحقیقات آزمایشگاهی در این زمینه می‌تواند کمک شایانی به فهم موضوعات مهم جریان در کانال‌ها داشته باشد. برای این منظور، کانال‌های مثلثی شکل کانیو با جداره‌ی شیشه‌ای در فلوم آزمایشگاهی موجود تعبیه شدند. دو نوع کانال مثلثی شکل با شیب دیواره‌ی جانبی 30° و 45° درجه ساخته شده و بر روی هر یک برای ۴ دبی و ۵ شیب مختلف آزمایشاتی معرفی گردید. همچنین در کنار مدل‌های آزمایشگاهی، نتایج مدل عددی (نرم‌افزار Flow3D) نیز مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج به دست آمده در آزمایشات برای نمودار دبی-اشل، دبی- n ضریب زبری مانینگ و پروفیل سرعت جریان در کانال استفاده شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که سطح مقطع 30° درجه نسبت به سطح مقطع 45° درجه مقاومت بیشتری در مقابل جریان عبوری آب از کانال را دارد. بررسی کنتورهای سرعت نشان می‌دهند، بیشینه سرعت جریان در مقاطع مثلثی، برای سطح مقطع 30° درجه بوده است.

واژگان کلیدی: کانال مثلثی شکل، فلوم آزمایشگاهی، مقاومت جریان، نمودار دبی-مقیاس.

Flow Resistance and Velocity Distributions in Channels with Triangular Cross-Section

M.A. Mohammadi, H. Mohammad Nejad and H. Ebrahim Nejadian

Abstract: Flow resistance and velocity distribution in collecting, transport and distribution channel of water, has always been discussed as topics between hydraulic researchers. Due to the lack of data and laboratory studies, research laboratory in this field can help greatly to the understanding of important topics in stream channels. For this purpose, triangular shapes of the canivo channels with the glass-walled were embedded in laboratory flume. Two types of triangular-shaped channel with 30° and 45° degree slope side walls were made and on each of them for 4 discharges and 5 different slope experiments were carried out. As well as in the laboratory models, numerical model (Flow3D software) results were also analyzed. The obtained results have been used in tests, for stage-discharge curve, maning roughness coefficient n - discharge and flow velocity profiles. Investigation shows that 30° degree cross section have more resistance against flowing water passing through the channel to 45° degree cross section. Investigation of velocity contours show that the maximum velocity occurred in 30° degree triangular cross-section.

Keywords: Flow3D software, triangular channel, laboratory flume, flow resistance, stage-discharge curve.

۱ - مقدمه

با توجه به رشد روزافزون ساخت‌وسازهای شهری و توسعه بزرگراه‌ها، پل‌ها، خیابان‌های ارتباطی بر اساس اصول فنی و همچنین رعایت شرایط مساعد زیست‌محیطی برای مردم شهرها، استفاده از شبکه‌ی زهکشی معابر شهری برای جمع‌آوری و زهکشی آب‌های سطحی از معابر شهری بیش‌ازپیش احساس می‌شود. اغلب از کانال‌های مثلثی در دبی‌های کم و در جمع‌آوری آب‌های سطحی در پل‌ها، جاده‌ها و معابر شهری به‌عنوان کانیو استفاده می‌گردد. به علت محدودیت استفاده از مقاطع مثلثی جهت انتقال و هدایت آب، محققان زیادی بدان نپرداخته‌اند و تحقیقات کمتری در مورد این مقاطع صورت پذیرفته است و در نتیجه اطلاعات آزمایشگاهی و میدانی زیادی نیز در این زمینه وجود ندارد. از طرفی مقاومت جریان و توزیع سرعت از مهم‌ترین پارامترها در مطالعات جریان و طراحی کانال‌های روباز می‌باشند، چراکه برای دستیابی به سرعت متوسط و ماکزیمم، برآورد دبی و ارزیابی تنش برشی در کناره‌ها موردنیاز می‌باشند. لذا پروفیل طولی سرعت جریان، درون مقطع عرضی از یک کانال سال‌ها مورد تحقیق پژوهشگران مختلف بوده است. همچنین منحنی‌های دبی-اشل همیشه برای تعیین دبی جریان در کانال‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. تابع دبی-اشل را می‌توان مهم‌ترین و تعیین‌کننده‌ترین پارامتر یک کانال روباز به شمار آورد. در صورت وجود یک رابطه یا منحنی دبی-اشل برای یک مقطع کانال، محاسباتی از قبیل مقاومت جریان، تنش برشی و سرعت متوسط جریان میسر می‌شود. رابطه تجربی یا تئوری موجود بین تراز سطح آب (رقوم آب) و دبی متناظر جریان در یک کانال روباز به‌عنوان رابطه دبی-اشل یا منحنی دبی-عمق شناخته می‌شود. منحنی دبی-اشل یک ابزار بسیار مهم در هیدرولوژی و هیدرولیک جریان آب‌های سطحی است زیرا اعتبار اطلاعات اندازه‌گیری شده دبی در محل، به‌شدت وابسته به یک رابطه دبی-اشل قابل اعتماد می‌باشد. منحنی دبی-اشل یک ابزار سودمند در هیدرولیک برای تخمین دبی در کانال‌های روباز طبیعی و یا مصنوعی می‌باشد. در اوایل قرن نوزدهم اندازه‌گیری دبی رودخانه‌ها در زمان‌هایی مناسب، رویکرد رایج در

تخمین دبی بود. همچنین عمق آب متناظر نیز اندازه‌گیری شده و سپس یک منحنی از مقادیر دبی در مقابل عمق آب به طریق همسان‌سازی این اطلاعات با یک منحنی توانی یا چندجمله‌ای ساخته می‌شود [۲۰].

برای همه مقاطع کانال‌ها با مقطع مثلثی شکل، داشتن نمودارهای دبی-اشل با دقت بالا برای شیب‌های طولی متفاوت می‌تواند کمک شایانی برای تعیین میزان گذردهی جریان در این کانال‌ها بنماید. همچنین به دست آوردن پروفیل سرعت جریان در این مقاطع مثلثی می‌تواند برای محاسبات تنش برشی و فرسایش جداره کانال استفاده گردد. روش‌های پیشین مورد استفاده در تخمین ظرفیت دبی عبوری و توزیع سرعت در کانال مثلثی صرفاً آزمایشگاهی بوده و برای یک سطح مقطع خاصی از مثلث انجام پذیرفته است. در این تحقیق بنا بر این است تا منحنی‌های دبی-اشل برای دو سطح مقطع متفاوت مثلثی با شیب‌های متفاوت با به‌کارگیری مدل آزمایشگاهی و همچنین مدل عددی استخراج گردد. مطالعات کمی در مورد کانیو و نحوه‌ی مقاومت جریان و توزیع سرعت این مقاطع صورت گرفته است. به‌طوری‌که مطالعات کمتر به صورت تحقیقات آزمایشگاهی بوده است. واسلی (Wasley, 1963) مقادیر مقاومت جریان آب و پروفیل‌های توزیع سرعت جریان در کانال مثلثی با دیواره‌ی قائم، برای یک سطح مقطع خاص و شیب‌های متفاوت اندازه‌گیری کرده‌اند [۳]. این محققان تحقیقات خوبی در این زمینه انجام داده‌اند. مقادیر ضریب زبری n مانینگ و ضریب اصطکاک f دارسی-ویسباخ و سایر مشخصه‌های هیدرولیکی به‌صورت جداول مدون برای یک سطح مقطع خاص آورده شده است. همچنین با اندازه‌گیری سرعت جریان در یک مقطع مشخص از جریان، پروفیل‌های سرعت جریان برای شیب‌ها و دبی‌های مختلف آورده شده است. به نقل از وطنخواه، هانتر راوس نیز در مطالعات خود بر روی این کانال‌ها برای به دست آوردن مقاومت جریان، اطلاعات اولیه مربوط به شکل مقطع، ویسکوزیته‌ی سیال و زبری جداره‌ی کانال را در محاسبات وارد کرد. اغلب معادلات انرژی و نیروی مخصوص برای کانال‌های مستطیلی به‌کاررفته است. در حال حاضر برای محاسبه مشخصه‌های جریان در کانال‌های

¹ Stage-Discharge Curve

لزجت و چگالی ثابت به صورت معادلات (۱) و (۲) بیان می شود [۱۶ و ۱۷].

$$\frac{\partial}{\partial x}(uA_x) + \frac{\partial}{\partial y}(vA_y) + \frac{\partial}{\partial z}(wA_z) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{1}{V_F}(U_i A_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j}) = \frac{1}{\rho} \frac{\partial P'}{\partial x_i} + g_i + f_i \quad (2)$$

در معادلات فوق، متغیرهای u ، v و w به ترتیب سرعت جریان در راستای x ، y و z می باشد. V_F نسبت حجم مایع در هر المان و مقادیر A_x ، A_y و A_z مساحت جزئی از وجوه هر المان است که سیال در آن حضور دارد. ρ چگالی سیال، P' فشار، g_i نیروی گرانش در راستای i و f_i تنش رینولدز در مدل های آشفتگی است. در المان هایی که از مایع پر باشند مقادیر V_F و A مساوی ۱ بوده و معادلات به معادلات پایه RANS برای جریان های تراکم ناپذیر تبدیل می گردد [۱۳ و ۱۸]. در تعیین سطح آزاد به روش حجم سیال از یک تابع به نام جزء حجم سیال F استفاده می شود. شکل دیفرانسیلی تابع F در حالت سه بعدی توسط رابطه ۳ بیان می شود [۱۶ و ۱۹].

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u \frac{\partial F}{\partial x} + v \frac{\partial F}{\partial y} + w \frac{\partial F}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

۲-۲- مدل سازی مقاطع مثلثی

به منظور مدل سازی آزمایشات انجام شده در نرم افزار، طراحی هندسه سازه های مورد نظر با ابعاد واقعی در محیط نرم افزار AutoCad2011 انجام گرفت. برای این کار در هر آزمایش سازه ی کانال با مشخصات آن آزمایش طراحی گردیده است. برای مقطع مثلثی 30° درجه برای شیب های 0.1% ، 0.2% و 0.4% به دلیل استفاده از دریچه تحتانی در آزمایشات، در طراحی مدل نرم افزاری دریچه تحتانی نیز منظور گردیده و برای شیب های 0.8% ، 1.6% همانند خود آزمایشات بدون دریچه در نظر گرفته شده است. همچنین برای مقطع مثلثی 45° درجه برای شیب های 0.1% ، 0.2% ، 0.4% و 0.8% با دریچه تحتانی و برای شیب های 0.1% ، 0.2% ، 0.4% و 0.8% بدون دریچه در نظر گرفته شده است.

۳. مدل آزمایشگاهی

۳-۱- نحوه ایجاد جریان یکنواخت در کانال

آزمایشگاهی

مثلثی به عنوان عمق بحرانی و عمق نرمال از نمودارهای مرسوم استفاده می شود [۴].

روش رایج در تعریف و کاربرد منحنی های دبی-اشل را می توان در اوایل قرن بیستم ردیابی کرد. در آغاز قرن گذشته، برای مثال، جانز (Jones, 1916) یک روش برای اصلاح روابط دبی-اشل پیشنهاد کرد که شیب سطح آب را محاسبه می کرد [۵]. در دوره مشابه ("Ufficio Idrografico alle Acque di Venezia", 1914) دستورالعمل هایی برای تعریف روابط دبی-اشل برای جریان آب ارائه کرد [۶]. یک رابطه دبی-اشل می تواند در شکل های مختلف گرافیکی، جدول و شکل معادله ای نمایش داده شود. رایج ترین منحنی های دبی-اشل، دبی را به عنوان یک تابع واحد از عمق جریان معرفی می کنند. این منحنی ها از یک تابع توانی به فرم $Q = C(h-a)^\alpha$ پیروی می کنند؛ که در آن: Q دبی، h عمق، C ، a ضرایب استاندارد سازی می باشند. ضریب C معادل دبی جریان Q می باشد وقتی که عمق مؤثر جریان $(h-a)$ مساوی ۱ باشد، a در آن ارتفاع عمق سنج در شرایط جریان صفر است؛ α شیب منحنی دبی-اشل (در حالت لگاریتمی) می باشد؛ $(h-a)$ عمق مؤثر آب روی قسمت کنترل می باشد. در این مقاله مقاومت جریان آب در کانال و همچنین نحوه ی توزیع سرعت آب در کانال ها با مقطع مثلثی، با استفاده از فلوم آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. آزمایشات برای شیب های متفاوت کانال، دبی های مختلف و همچنین برای زوایای متفاوت جانبی کانال مثلثی انجام می پذیرد. نتایج به دست آمده با نتایج حاصل از نرم افزار Flow3D مقایسه و مورد تجزیه و تحلیل قرار می گیرد؛ بنابراین رفتار و عملکرد هیدرولیکی جریان در این نوع کانال ها با تفاسیر و ارزیابی های جدید تشریح شده و ضمن درک صحیح تر موضوع، می توان نتایج حاصله از این تحقیق را در طراحی کانال های انتقال آب با انواع شرایط جریان به کاربرد.

۲- مدل عددی

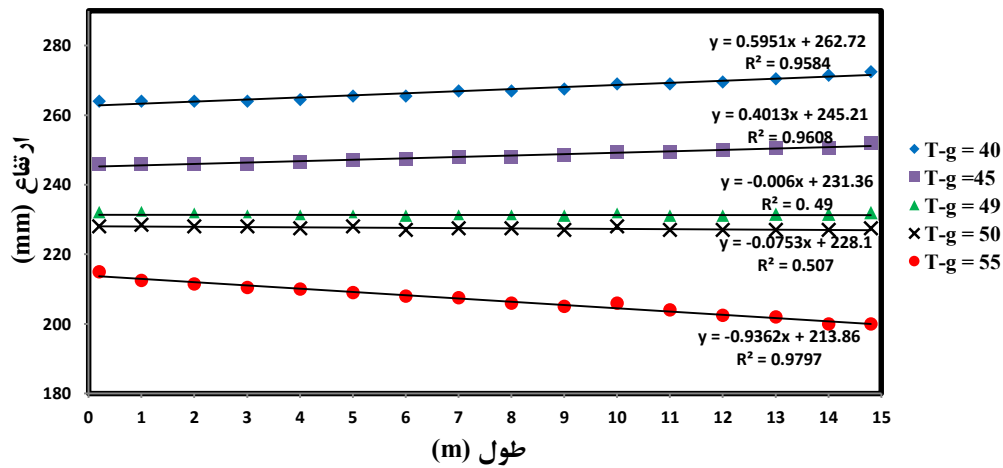
۲-۱- روابط حاکم بر میدان جریان

معادلات حاکم بر حرکت سیال عبارتند از معادله پیوستگی و معادله مومنتم که برای جریان آشفتگی تراکم ناپذیر با

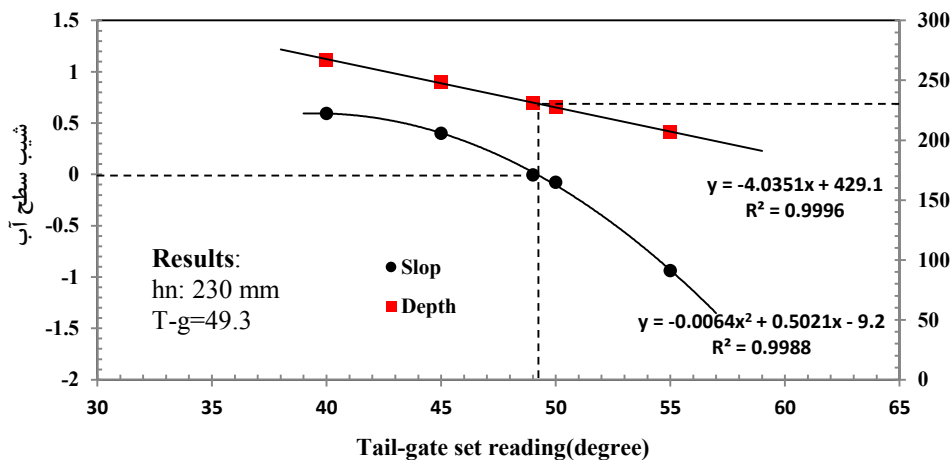
"زاویه‌ی دریچه - شیب‌های خط برازش"، معادله خط برازش بر این منحنی را پیدا کرده و بر اساس آن معادله زاویه‌ای که در آن شیب خط پروفیل جریان صفر است محاسبه می‌گردد. بر روی همین نمودار منحنی "زاویه‌ی دریچه - عمق جریان" رسم گردیده و از آنجا می‌توان عمق جریان را در حالتی که شیب تغییرات عمق جریان صفر است به دست آورد. برای این منظور کافی است در معادله-ی نمودار "زاویه‌ی دریچه - عمق جریان"، زاویه‌ی حالت شیب صفر را وارد کرده و عمق جریان را در حالت یکنواخت پیدا کرد. لازم به ذکر است که زاویه دریچه همان زاویه قرارگیری دریچه خروجی جریان از کانال نسبت به محور قائم می‌باشد. [۱۰ و ۱۱ و ۱۴ و ۱۵] (شکل‌های ۱ و ۲).

با توجه به اینکه نوع جریان مورد بررسی در این تحقیق، جریان یکنواخت می‌باشد، لذا برای این کار باید در کلیه حالات آزمایش جریان یکنواخت برقرار گردد. با فرض طول بینهایت برای کانال واقعی، برای جریان‌های زیر بحرانی در فلوم باید اثرات ارتفاع پایین دست را در انتهای فلوم اعمال می‌شد.

برای این منظور، از دریچه‌ی قطاعی در انتهای فلوم استفاده گردیده است؛ اما در این میان مشکلی که وجود دارد یافتن اندازه‌ی واقعی ایجاد این ارتفاع می‌باشد. آنگاه دریچه را در حالات مختلف گذاشته و پروفیل عمق آب آن‌ها رسم می‌گردد به طوری که شیب نمودارهای طول - عمق جریان هم منفی و هم مثبت را شامل گردد. سپس با رسم منحنی



شکل ۱: نمودار تراز سطح آزاد آب ($Q=5.65$ LPS, $S_0=0.1\%$, $\theta = 30^\circ$)



شکل ۲: تنظیمات دریچه با عمق نرمال ($Q=5.65$ LPS, $S_0=0.1\%$, $\theta = 30^\circ$)

طویل بودن کانال آزمایشگاهی امکان توسعه یافتگی کامل جریان (Fully developed flow) به صورت یکنواخت میسر بوده، لذا آزمایشات انجام شده در این کانال واقعیت رفتار جریان در این نوع کانالها را نشان می‌دهند (شکل ۳).

۲-۳-۲- دبی سنج

دستگاه جریان سنج از نوع اولتراسونوتیک UF5000 می‌باشد و توسط دو سنسور که بر روی لوله‌ی ورودی به کانال ورودی نصب شده است، دبی ورودی به کانال اندازه‌گیری می‌شود. خطای این دستگاه در ماکزیمم حالت ۰.۴٪ می‌باشد که با استفاده از یک جریان سنج دیگر و همچنین یک سرریز مثلثی کالیبره شده است (شکل ۴).



شکل ۴: دبی سنج و سنسورهای اولتراسونوتیک

دارای دو حالت اتوماتیک و دستی برای اندازه‌گیری سرعت سیال می‌باشد.

که در حالت اتوماتیک بازه زمانی ۱۰ ثانیه اندازه‌گیری می‌شود درحالی‌که در حالت دستی محدودیت زمانی برای اندازه‌گیری نداریم. همچنین خروجی‌های دستگاه به صورت آنالوگ و دیجیتال می‌توان ثبت نمود. این سرعت سنج طبق دستورالعمل شرکت سازنده بین ۲۵ تا ۱۵۰۰ میلی‌متر بر ثانیه بهترین کارکرد را داراست (شکل ۵).



شکل ۵: سرعت سنج H32-1-A

۲-۳-۲- معرفی دستگاه‌های تست

۳-۲-۱- فلوم آزمایشگاهی تحقیقاتی

طول فلوم آزمایشگاهی ۱۸ متر و کانال تحقیق حاضر ۱۵ متر طول به عرض ۳۰ سانتی‌متر و عمق ۵۰ سانتی‌متر با دبی حداکثر پمپاژ، ۲۴ لیتر در ثانیه (در دور ۱۴۵۰ می-باشد). همچنین این فلوم دارای قابلیت افزایش دبی توسط اینورتر می‌باشد. برای کنترل این فلوم یک دستگاه بسته الکترونیکی تعبیه شده است که با آن شیب و دبی جریان را می‌توان تنظیم نمود. دبی ورودی به کانال می‌تواند تا ۲۴ لیتر بر ثانیه افزایش یابد و تمامی کنترل‌های شیب و دبی ورودی به کانال به صورت الکترونیکی بوده و با استفاده از مرکز کنترل دستگاه و به صورت صفحه لمسی می‌باشد. همچنین این مرکز کنترل قابل برنامه‌نویسی بوده و برای استفاده‌های مختلف قابل برنامه‌ریزی می‌باشد. با توجه به



شکل ۳: فلوم آزمایشگاهی

۳-۲-۲- سرعت سنج

این سرعت سنج از نوع سرعت سنج پره‌ای که سرعت سیال را برحسب مسافت طی شده برحسب سانتی‌متر و مدت زمان اندازه‌گیری برحسب ثانیه نمایش می‌دهد؛ که می‌توان سرعت سیال را در هر نقطه با تقسیم مسافت طی شده بر زمان به دست آورد. سرعت سنج از نوع پره‌ای مدل H32-1-A ساخت شرکت Armfield می‌باشد. این دستگاه

مقطع مثلثی با زوایای دقیق 30° و 45° استفاده گردیده است. حداکثر ارتفاع ممکن آب برای مقطع 30° حدود 45 cm و برای مقطع 45° کمتر از 30 cm می‌باشد. هر دو مقطع آزمایشگاهی در اشکال 6 و 7 آورده شده است.



شکل 7: مقطع 30° ساخته شده در آزمایشگاه.

3-3- نمونه‌های ساخته شده در کانال

نمونه‌های ساخته شده دو کانال با مقطع مثلثی با زاویه رأس 30° و 45° درجه می‌باشد که هر کدام طول خالص 15 متر را داراست. برای تنظیم زاویه‌ی موردنظر مقطع از دو

شکل 6: مقطع 45° ساخته شده در آزمایشگاه.

رسیدن عمق جریان به یک حالت پایدار، میانگین عمق‌های یکنواخت را به عنوان عمق جریان در نمودارها لحاظ شده است که این مهم معمولاً برای این نوع جریان‌ها، در طول‌های 7 و 8 متر به بعد کانال به دست می‌آید. در نمودارهای عمق جریان برای شیب‌های تند نوسانات بیشتری مشاهده می‌گردد، علت این امر تشکیل موج‌های سطحی در طول کانال می‌باشد. چراکه به علت سرعت زیاد سیال، موج‌های سطحی بزرگ‌تر و در صورت کوچک‌ترین ناهمواری در طول کانال این موج‌ها تشدید می‌گردند.

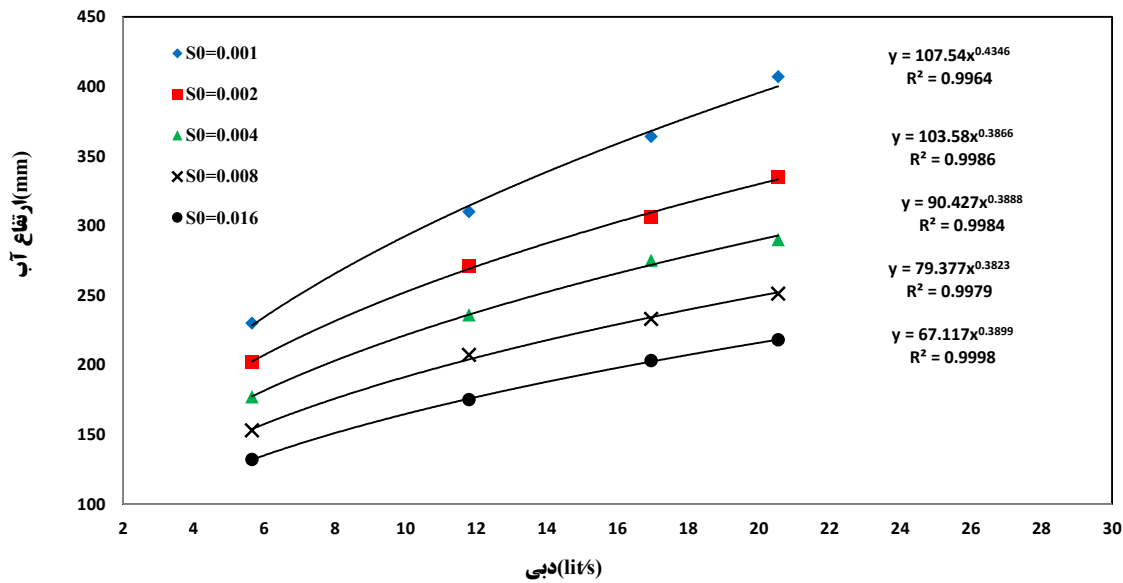
4. تجزیه و تحلیل داده‌های آزمایشگاهی و عددی

4-1- بررسی اجمالی رژیم جریان

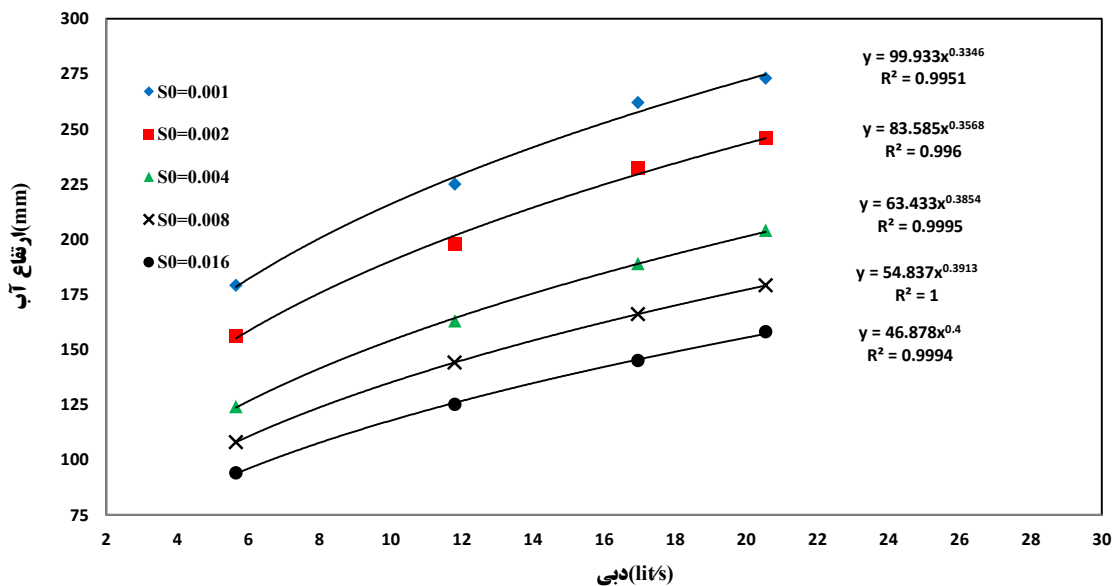
با توجه به نتایج آزمایشگاهی به دست آمده، برای مقطع مثلثی 30° ، در شیب‌های $0/001$ ، $0/002$ و $0/004$ جریان زیربحرانی، برای شیب‌های $0/008$ و $0/016$ جریان فوق بحرانی می‌باشد. این در حالی است که برای جریان در مقطع مثلثی 45° ، در شیب‌های $0/001$ و $0/002$ زیربحرانی و برای شیب‌های $0/004$ ، $0/008$ و $0/016$ فوق بحرانی می‌باشد. از نتایج داده‌های آزمایشگاهی چنین برمی‌آید که جریان در مقطع 30° برای این حدفاصل دبی $5/65$ تا $20/55$ مقاومت بیشتری نسبت به حالت 45° داشته چراکه در شیب $0/004$ جریان برای مقطع 30° ، زیربحرانی ولی برای مقطع 45° فوق بحرانی می‌باشد علت این امر این است که با کاهش زاویه برای یک دبی با شیب ثابت، عمق جریان افزایش می‌یابد و به تبع آن تنش برشی و مقاومت جریان نیز افزایش پیدا می‌کند. در شرایط دبی جریان مساوی، در مقطع مثلثی با زاویه رأس 30° درجه نسبت به 45° درجه، عمق جریان افزایش پیدا می‌کند و به تبع آن با افزایش عمق جریان طول محیط مرطوب و سطح مقطع جریان افزایش پیدا می‌کند و در خصوص شعاع هیدرولیکی نمی‌توان به صراحت اظهار نظر کرد. برای جریان‌های فوق بحرانی نیز برای پیدا کردن عمق یکنواخت جریان، بعد از

4-2- نمودار دبی، مقیاس داده‌های آزمایشگاهی

در شکل‌های 8 و 9 منحنی‌های دبی - اشل برای مقاطع 30° و 45° آورده شده است. نمودار دبی اشل شیب‌های $0/001$ و $0/002$ و $0/004$ و $0/008$ و $0/016$ به صورت یکجا در هر یک از این نمودارها آورده شده است. برای پیدا کردن رابطه‌ی بین داده‌های هر شیب از برآزش $Q(h) = C(h)^b$ استفاده گردیده است. هر چند برای پیدا کردن و نوشتن رابطه‌ی دبی - اشل بایستی حداقل 7 تا 8 برداشت از دبی‌های متفاوت داشت ولی در این تحقیق به علت گستردگی کار، 4 برداشت برای هر یک انجام شده است. رابطه‌ی $Q(h) = C(h)^b$ که از طریق رابطه‌ی $Q(h) = C(h)^b$ به دست می‌آید را می‌توان با اطمینان بیشتری بکار برد.



شکل ۸: نمودار دبی - اشل برای مقطع مثلثی ۳۰° (برازش منحنی $Q(h) = C(h)^b$)



شکل ۹: نمودار دبی - مقیاس برای مقطع مثلثی ۴۵° (برازش منحنی $Q(h) = C(h)^b$)

درواقع با افزایش شیب بستر کانال منحنی دبی - مقیاس خوابیده تر شده است. برای مقطع ۳۰° با افزایش شیب بستر کانال ضریب b نسبتاً ثابت می باشد و این یعنی انحنای منحنی برای هر ۵ شیب این مقطع تقریباً یکسان می باشد. برای مقطع ۴۵° با افزایش شیب بستر کانال ضریب b افزایش می یابد که درواقع انحنای خمیدگی نمودار با افزایش شیب بستر کانال کاهش می یابد.

همان طور که در شکل های ۸ و ۹ مشاهده می گردد، هر چه شیب تندتر گردد منحنی دبی - اشل نیز دارای شیب کمتری می گردد، چراکه به علت شیب زیاد، آهنگ تغییرات سرعت با افزایش دبی بیشتر گردیده و این خود باعث روند ملایم تر شیب منحنی دبی - مقیاس می گردد. در جدول ۱ مقادیر C و b برای معادله $Q(h) = C(h)^b$ آورده شده است. همان طور که در جدول مشاهده می گردد با افزایش شیب کف کانال ضریب C کاهش پیدا می کند و

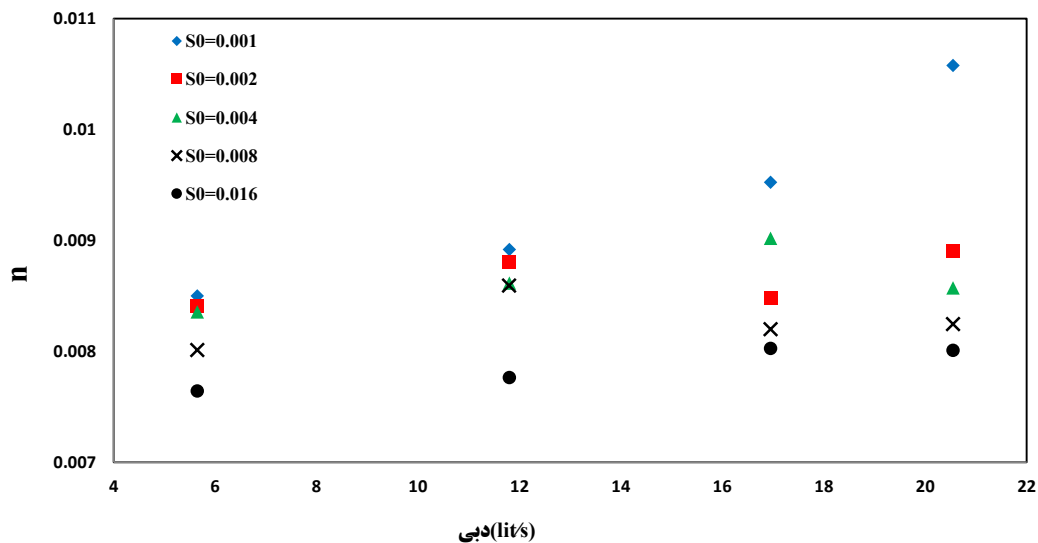
جدول ۱: ضرایب C و b برای معادله $Q(h) = C(h)^b$

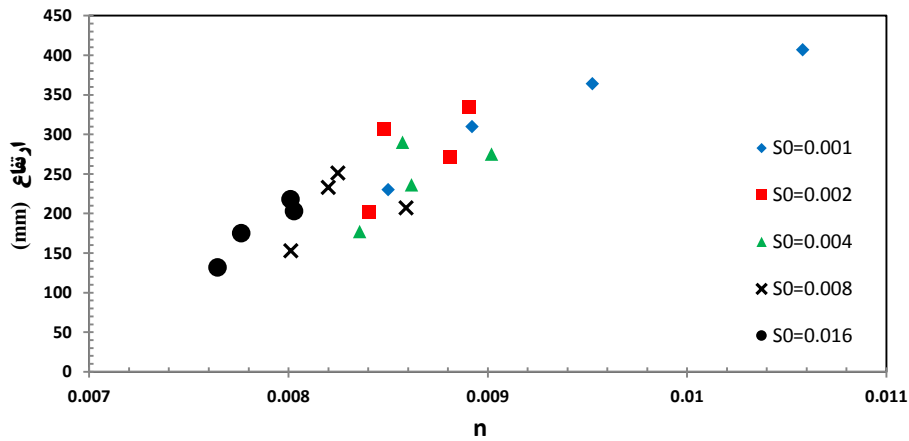
θ	Slop	C	b
30°	0.001	107.54	0.435
	0.002	103.58	0.386
	0.004	90.43	0.388
	0.008	79.38	0.382
	0.016	67.12	0.389
45°	0.001	99.93	0.334
	0.002	83.59	0.357
	0.004	63.43	0.385
	0.008	54.84	0.391
	0.016	46.88	0.4

های تند که جریان فوق بحرانی است، مقادیر ضریب زبری n با افزایش دبی و عمق، افزایش یافته است. n های به دست آمده نزدیک به هم بوده ولی برای شیب‌هایی که جریان زیر بحرانی می‌باشد فاصله n ها گستردگی بیشتری از هم را دارا می‌باشند. با توجه به اینکه مقادیر n های به دست آمده فاصله خیلی کمی نسبت به هم دارند می‌توان گفت که برای کانال مثلثی 30° و 45° با مقطع شیشه‌ای، ضریب زبری n مانینگ بین 0.0075 تا 0.011 به دست می‌آید که برای شیب‌های تند این عدد برای مقطع 30° ، حدوداً 0.008 و برای مقطع 45° ، 0.0075 به دست می‌آید.

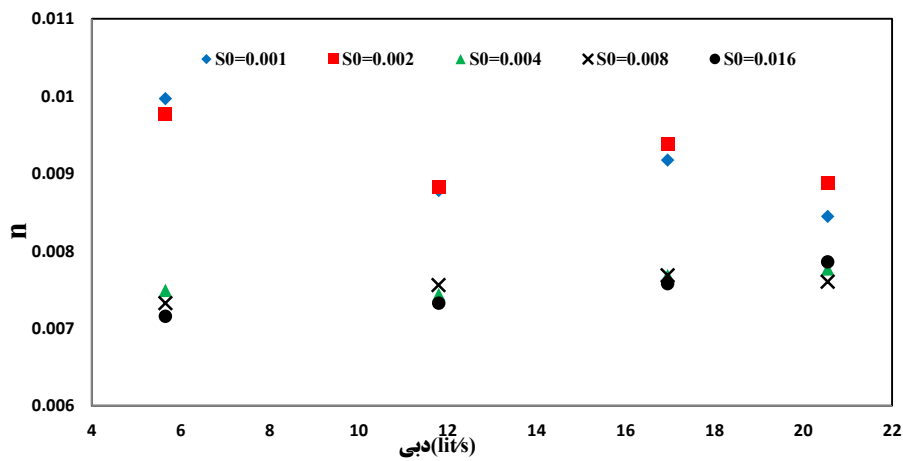
۴-۳- نمودار ضریب زبری n مانینگ - عمق جریان

در شکل‌های ۱۰ تا ۱۳ نمودارهای مقاطع مثلث با زاویه رأس 30° و 45° مربوط به ضریب زبری مانینگ آورده شده است. همان‌طور که از مقایسه نمودارهای ضریب زبری مانینگ مقاطع می‌توان ملاحظه کرد، ضریب زبری‌های به دست آمده برای مقطع 45° کمتر از مقطع 30° بوده و لذا این نتیجه مؤید این است که مقطع 45° نسبت به مقطع 30° مقاومت کمتری نسبت به جریان‌های مشابه از خود را داراست. لازم به ذکر است با توجه به این که عمق جریان در مقطع مثلثی با کاهش زاویه رأس از 45° به 30° کاهش می‌یابد، به تبع آن شعاع هیدرولیکی نیز کاهش پیدا می‌کند. شکل‌های ۱۰ تا ۱۳ نشان می‌دهند که در شیب

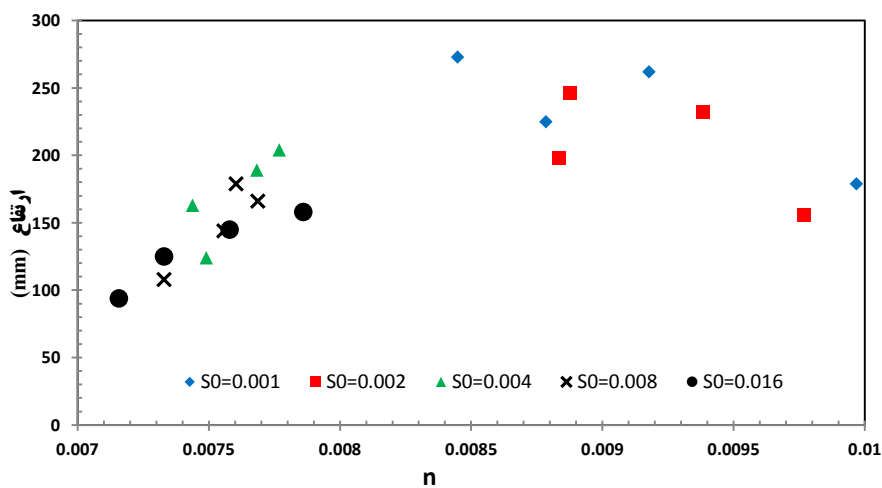
شکل ۱۰: نمودار دبی - مانینگ شیب‌های مختلف برای مقطع مثلثی 30°



شکل ۱۱: نمودار مانینگ - عمق شیب‌های مختلف برای مقطع مثلثی 30°



شکل ۱۲: نمودار دبی - مانینگ شیب‌های مختلف برای مقطع مثلثی 45°

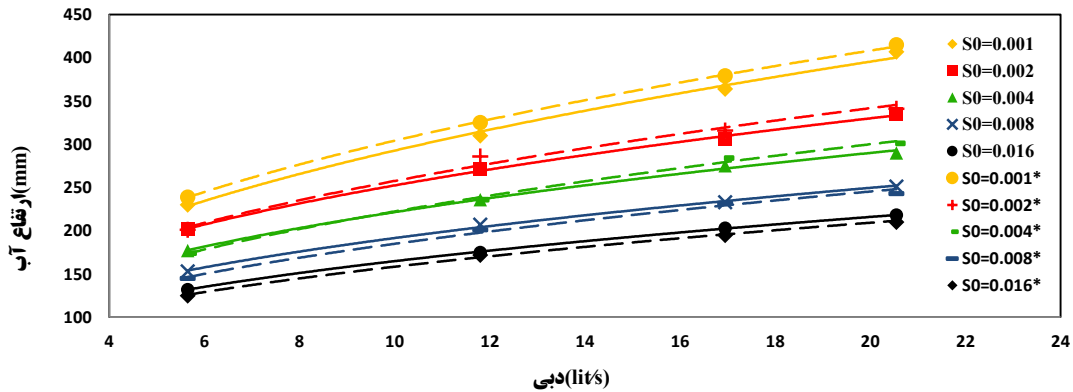


شکل ۱۳: نمودار n مانینگ - عمق شیب‌های مختلف برای مقطع مثلثی 45°

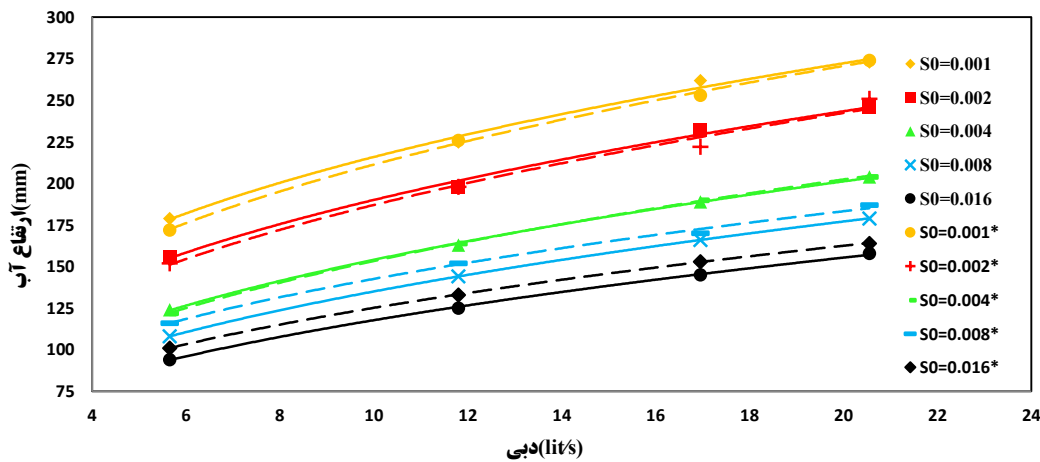
می‌شود که هر چه قدر شیب کف بستر کانال تندتر گردد منحنی دبی اشل نیز دارای شیب کمتری می‌گردد، چراکه به علت شیب زیاد، آهنگ تغییرات سرعت با افزایش دبی بیشتر گردیده و این خود باعث روند ملایم‌تر شیب منحنی دبی - اشل می‌گردد. همچنین در حالت کلی شیب نمودار-های دبی اشل مقطع 30° بیشتر از مقطع 45° می‌باشد.

۴-۴- مقایسه منحنی دبی-مقیاس آزمایشگاهی با عددی

برای یافتن رابطه‌ای بین داده‌های هر شیب، از برازش منحنی $Q(h) = C(h)^b$ استفاده گردیده است. در نمودار-های شکل‌های ۱۴ و ۱۵ نمودارهای دبی-اشل عددی با آزمایشگاهی مقایسه گردیده است. از بررسی نمودارهای دبی-اشل مدل عددی، بمانند نتایج آزمایشگاهی نتیجه



شکل ۱۴: نمودار مقایسه دبی - مقیاس آزمایشگاهی با عددی برای مقطع مثلثی 30° (علامت * و خطچین بیانگر مدل عددی)



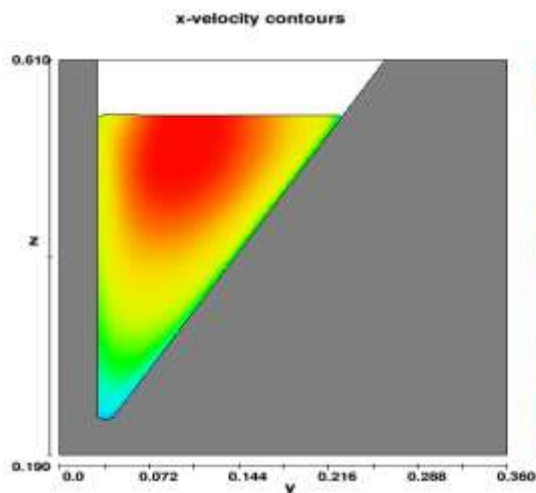
شکل ۱۵: نمودار مقایسه دبی - مقیاس آزمایشگاهی با عددی برای مقطع مثلثی 45° (علامت * و خطچین بیانگر مدل عددی)

برای مقطع 45° در فواصل عمودی و افقی 1×1 سانتی متری این کار انجام یافته است در شکل ۱۶ نمونه‌ای از پروفیل سرعت را در مقطع 45° مشاهده می‌نمایید برای رسم این نمودار از نرم‌افزار SigmaPlot استفاده گردیده است که نقاط هم‌اندازه را به هم وصل کرده و مانند شکل، پروفیل عرضی سرعت را در مقطع نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌گردد کمینه سرعت در جدارها می‌باشد که تقریباً برابر صفر و بیشتر سرعت در

۴-۵- توزیع سرعت

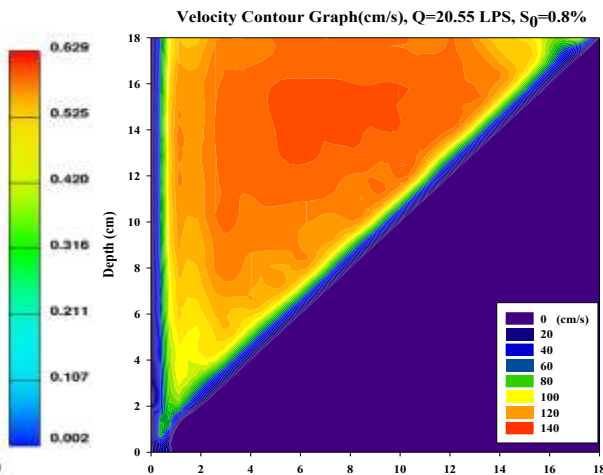
برداشت پروفیل سرعت برای هر آزمایش به صورت نقطه‌به‌نقطه در یک طول ثابت از کانال برای تمامی حالت‌ها انجام گردید. برای حالت 30° در طول ۱۱ متری کانال و برای مقطع 45° در طول ۱۲ متری انجام گردید. علت این امر، کم بودن نوسانات سطح آزاد آب در این نقاط نسبت به سایر نقاط بوده است. برای مقطع 30° در فواصل عمودی و افقی 2×1 سانتی متری اندازه‌گیری سرعت انجام یافته و

چندجمله‌ای بهترین کارکرد را دارا بود. در شکل ۱۷ نمونه-۵ از پروفیل سرعت را در مقطع 30° درجه مشاهده می-نمایید که با استفاده از داده‌های عددی در نرم‌افزار Flow-3D به دست آمده است.



شکل ۱۷: نمونه‌ای از نمودار توزیع سرعت با آنالیز عددی در مقطع عرضی مثلثی 30° درجه ($Q=16.95, S=0.002$)

مرکز مقطع مثلثی و کمی بالاتر از مرکز سطح مثلث قرار دارد. برای خود جداره‌ها در نرم‌افزار، با سرعت صفر داده سازی شده تا مرزهای جامد به صورت شکل زیر همانند مقطع آزمایش مشخص گردند. در نرم‌افزار SigmaPlot قابلیت برای پیدا کردن نقاطی غیر از داده‌های داده شده به نرم‌افزار وجود دارد که در اینجا حالت میان‌یابی و برازش



شکل ۱۶: نمونه‌ای از نمودار توزیع سرعت در مقطع عرضی مثلثی 45° درجه (داده‌های آزمایشگاهی)

۵- نواحی بیشتری در سطح مقطع مثلثی 45° نسبت به سطح مقطع 30° ، دارای سرعت جریانی نزدیک به سرعت بیشینه آب در همان شرایط آزمایش می‌باشد.
۶- نظر به نیاز محققان استفاده کننده از روش‌های عددی، داده‌های آزمایشگاهی به دست آمده از این تحقیق بسیار سودمند می‌باشد.

۶. مراجع

[1] Chow, V-T., Open Channel Hydraulics, McGraw-Hill Book Company, New York, 1988.
[2] Mohammadnezhad, H., Resistance to Flow and Velocity Distribution in a Triangular Channel, MSc Thesis, Submitted to the Dept. of Civil Eng., Faculty of Eng., University of Urmia, Urmia, Iran, 2012 (Farsi).
[3] Richard J., Wasley, A., "Uniform Flow in a Shallow Triangular Open Channel", J. of Hydraulics Division, ASCE, Hy5, pp. 149-170, 1961.
[4] Vatankhah A. R., "Analytical Solution of Specific Energy and Specific Force Equations:

۵. نتیجه گیری

بر اساس آنچه در این پژوهش مورد تحلیل و بحث قرار گرفت، نتایج حاصل از آن به شرح زیر خلاصه می‌شود:
۱- نتایج حاصل از نمودارهای ضریب زبری n مانینگ حاکی از آن است که با افزایش شیب کف کانال با مقطع مثلثی شکل، مقدار این ضریب کاهش می‌یابد.
۲- جریان آب در مقطع مثلثی 45° نسبت به مقطع 30° ، مقاومت کمتری از خود نشان می‌دهد و آن به دلیل تأثیر بیشتر دیواره‌های جانبی در مقطع 30° می‌باشد.
۳- بررسی کنتورهای سرعت (اشکال ۱۶ و ۱۷) نشان می‌دهند که بیشینه سرعت جریان برای سطح مقطع 30° ، در فاصله‌ی قائم مابین $0/15$ تا $0/25$ نسبت به سطح جریان و فاصله افقی مابین $0/4$ تا $0/45$ از دیواره‌ی قائم نسبت به عرض جریان به دست آمده است.
۴- برای سطح مقطع 45° ، نسبت فاصله‌ی قائم نقطه‌ی بیشینه سرعت تا سطح جریان مابین $0/15$ تا $0/20$ و نسبت فاصله افقی نقطه بیشینه سرعت از دیواره‌ی قائم به عرض جریان مابین $0/4$ تا $0/50$ محاسبه شده است.

- (IJE), Volume 17 –No. 4, Transactions B: Applications, December, pp. 341-350, **2004**.
- [12] Keulegan, G.H., "Laws of Turbulent Flow in Open Channels", Journal National Bureau of Standards, Research Paper 1151, 21, pp. 707-741, Washington D.C., USA, **1938**.
- [13] Mohammadi, M. Boundary Shear Stress and Velocity Distributions in Open Channels, a Research Report Submitted to the Department of Research & Technology, Urmia University, November, Urmia, Iran, **2002**.
- [14] Mohammadi, M., "On the Distribution of Velocity in a V-shaped bottom Channel", Proceedings International Journal of Scientia Iranica, Sharif University of Technology, No. 1, Vol. 16, pp. 78-86, January, Tehran, Iran. (ISC Journal), **2009**.
- [15] Mohammadi, M., "Velocity Distribution in a V-shaped Channel", Proceeding 2nd International Conference on Fluvial Hydraulics (Riverflow2004), Naples, 23-25 June, Italy. <http://www.riverflow2004.unina.it/>, **2004c**.
- [16] Mohammadi, M., "An Experimental Investigation on Flow Resistance and Velocity Distribution in Triangular Open Channels", Proceedings 7th Iranian Congress on Civil Eng. (7nce), The University of Sistan-Baluchestan, 7-8 May, Zahedan, Iran, **2013** (Farsi).
- Trapezoidal and Triangular Channel", J. of Advances in Water Resources, Vol. 33, No 2, pp. 184-189, **2010**.
- [5] Jones, B.E., A Method of Correcting River Discharge for a Changing Stage, Water Supply Paper 375, U.S. Geological Survey, pp. 117-130, **1916**.
- [6] Braca, G., Stage-Discharge Relationships in Open Channels: Practices and Problems, FORALPS Technical Reports, No. 11, University of Trento, Italy, **2008**.
- [7] Flow Science, Inc. FLOW-3D User Manual, **2000**.
- [8] Ferziger J. and Peric. M., "Computational Methods for Fluid Dynamics", Springer-Verlag, **1996**.
- [9] Hirt. C. and Nichols B., "Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries", Journal of Computational Physics. (39): pp. 201-225, **1981**.
- [10] Mohammadi, M., Resistance to Flow and the Influence of Boundary Shear Stress on Sediment Transport in Smooth Rigid Boundary Channels, *PhD* Thesis, Dept. of Civil Engineering, University of Birmingham, England, **1998**.
- [11] Mohammadi, M., Resistance to Flow in a V-Shaped bottom Channel, International J. of Eng.