

بررسی آزمایشگاهی پارامترهای هیدرولیکی آبگیرهای با کف مشبک

مهدی رزاز کارشناس ارشد سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد
 محمود فغفور مغربی دانشیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

چکیده

در مقاله حاضر، پارامترهای هیدرولیکی سازه‌های آبگیری از کف تحت اثر جریان آب زلال به صورت آزمایشگاهی، با استفاده از کانالی دو طبقه بررسی شده است. با انجام آزمایشات مختلف و با عبور دادن دی‌های گوناگون و اندازه‌گیری دی‌های منحرف شده و باقیمانده در کانال، به بررسی نقش پارامترهای مؤثری چون طول آبگیر، نسبت فضای باز به کل سطح آبگیر و قطر میله‌ها در انحراف دی کل پرداخته شده است. با انجام مطالعات آماری بر روی ضرایب تخلیه بدست آمده از آزمایشات، رابطه‌ای غیرخطی برای محاسبه ضریب تخلیه یک کف مشبک براساس نوع چیدمان میله‌ها و پارامترهای مؤثری چون نسبت قطر به فضای خالی بین میله‌ها و عدد رینولدز کف مشبک ارائه گردید. در نهایت رابطه‌ای کلی برای تخمین پارامترهای مؤثر در طراحی یک کف مشبک ارائه شده است.

کلمات کلیدی: جریان متغیر مکانی، جریان در کانال‌های روباز، آبگیرها، کف مشبک.

Experimental Investigations on Hydraulic Parameters of Bottom Rack Intakes

M. Razaz and M.F. Maghrebi
 Civil Engineering. Dept., Ferdowsi University of Mashhad

Abstract

In the present paper, hydraulic parameters of bottom rack structures are investigated experimentally in clear water. A double storey channel was designed to measure the remained and diverted discharges Q_r and Q_d , respectively, when the flow passed over a bottom rack. The effects of various parameters on the discharge coefficient C_d such as intake length L , ratio of clear open spaces to the total intake surface ε , and bar diameter ϕ were explored by performing several sets of experiments with different discharges. Additionally, statistical investigations on experimental discharge coefficients led to a non-linear relationship among bar arrangements, ratio of bar diameter to the clear space between bars, and bottom rack's Reynolds number. Finally, a simple guideline is suggested for a successful rack design.

Key words: Spatially varied flow, Open channel flow, Intakes, Bottom racks.

۱- مقدمه

کف‌های مشبک، سازه‌های استاندارد هستند که کاربردهای وسیعی در انحراف آب به سمت توربین‌ها، ته‌نشین کردن رسوبات و مواد جامد معلق در آب که از فاصله بین میله‌ها بزرگتر باشند و آبیگری از رودخانه‌ها دارند. آبیگر با کف مشبک سازه‌ای است که از تعدادی میله، معمولاً از جنس فولاد تشکیل شده و در تراز بستر رودخانه قرار می‌گیرد. شیبدار بودن این میله‌ها موجب تسهیل رانده شدن رسوبات حمل شده توسط رودخانه می‌گردد. جهت انتقال آب منحرف شده، از کانالی عمود بر جریان استفاده می‌شود.

در مدلسازی جریان بر روی یک آبیگر با کف مشبک، مهمترین هدف، تعیین مقدار دبی منحرف شده در شرایط مختلف جریان در کانال اصلی است. در این ارتباط نکاتی در رابطه با محاسبه پارامترهای هیدرولیکی و هندسی وجود دارد که از آن جمله می‌توان به تعیین ضریب تخلیه اشاره کرد. با تعیین دبی منحرف شده توسط یک دستگاه اندازه‌گیری جریان و با داشتن دبی در بالادست آبیگر می‌توان ضریب تخلیه نوع خاصی از چیدمان میله‌ها را بدست آورد. ضریب تخلیه C_d به پارامترهای گوناگونی بستگی دارد:

$$C_d = f(d, g, y, S_L, V, \phi, \psi) \quad (1)$$

در رابطه فوق d فاصله بین میله‌ها، g شتاب جاذبه، y عمق جریان، S_L شیب طولی میله‌ها در جهت جریان، V سرعت جریان بر روی میله‌ها، ϕ ابعاد میله‌ها و ψ تابع شکل سطح مقطع میله‌ها می‌باشد.

با وجود مناطق بسیار زیاد در کشور که می‌توان از این روش برای آبیگری از رودخانه استفاده کرد به دلیل در دسترس نبودن اطلاعات کافی جهت طراحی و ساخت آبیگر کفی متناسب با اقلیم کشور تاکنون استفاده بسیار کمی از این نوع آبیگر شده و انجام تحقیقات کاربردی در این زمینه امری ضروری به نظر می‌رسد.

براساس تحقیقاتی که در سال‌های گذشته توسط محققین مختلف و با آب زلال انجام شده، توصیه می‌شود برای طول میله‌ها در عمل از دو برابر طولی که از محاسبات هیدرولیکی بدست می‌آید، برای جلوگیری از بسته شدن دهانه آبیگر توسط رسوبات استفاده شود [۱]. همچنین برای غلتیدن رسوبات بر

روی شبکه آشغال‌گیر، شیب بهینه بین ۲۰ تا ۳۰٪ می‌باشد [۱،۲].

سوبرامانیا و شوکلا جریان بر روی آبیگر با کف مشبک را به ۵ دسته کلی تقسیم‌بندی کردند (جدول ۱) [۳]. طی این تحقیقات مشخص گردید برای جریان زیر بحرانی در بالادست و جریان فوق بحرانی در پایین دست آبیگر، نسبت جریان منحرف شده به کل جریان در بالادست Q_d/Q_f با افزایش نسبت‌های طول آبیگر به عمق بحرانی L/y_c و فاصله خالص بین میله‌ها به قطر میله‌ها d/ϕ بطور مؤثری افزایش می‌یابد.

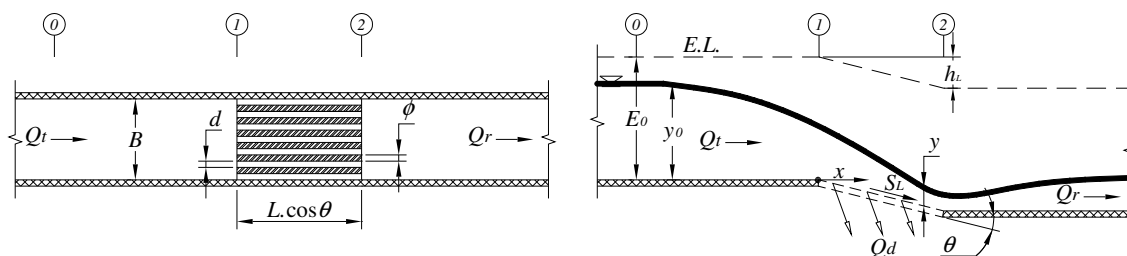
برونلا و همکاران تحقیقاتی را با استفاده از کانال مستطیلی انجام داده‌اند که در نهایت به رسم پروفیل سرعت، معادله‌ای دیفرانسیلی برای تعیین پروفیل سطح آب، رابطه‌ای براساس پارامترهای مؤثر از قبیل ضریب تخلیه و نسبت بازشدگی به کل سطح برای طراحی مناسب کف مشبک و بر اساس عرض کانال بالادست و آبیگر، عدد سقوط D و شیب طولی میله‌ها روابطی برای جلوگیری از پس‌زدگی جریان در کانال آبیگر منجر شده است [۴].

هدف از ارائه این مقاله بررسی رفتار هیدرولیکی آبیگرهای با کف مشبک با میله‌های طولی در مقایسه با میله‌های عرضی می‌باشد. همچنین ارائه روابطی برای ضریب تخلیه که بر اساس هندسه کف مشبک و عدد رینولدز Re استوار می‌باشد و در سایر مراجع کمتر به آن پرداخته شده است، از دیگر اهداف این مقاله می‌باشد.

جدول ۱- انواع پروفیل‌های شکل گرفته بر روی کف مشبک

براساس تحقیقات سوبرامانیا و شوکلا [۳]

| نوع پروفیل | جریان در بالا دست | نوع جریان بر روی آبیگر | جریان در پایین دست |
|------------|-------------------|----------------------------|--------------------|
| A1 | زیر بحرانی | فوق بحرانی | پرش هیدرولیکی |
| A2 | زیر بحرانی | در قسمتی از طول فوق بحرانی | زیر بحرانی |
| A3 | زیر بحرانی | زیر بحرانی | زیر بحرانی |
| B1 | فوق بحرانی | فوق بحرانی | پرش هیدرولیکی |
| B2 | فوق بحرانی | در قسمتی از طول فوق بحرانی | زیر بحرانی |



شکل ۱- نمایی کلی از یک کف مشبک با میله‌های طولی
(الف) مقطع طولی از موقعیت آبگیر همراه با مشخصات هیدرولیکی جریان، (ب) پلان کف مشبک

۲- روابط هیدرولیکی حاکم بر کف‌های مشبک

در شکل‌های (۱- الف، ب) که به ترتیب نشان دهنده مقطع طولی و پلان یک کف مشبک با آرایش طولی میله‌ها هستند، پارامترهای مؤثر هندسی L طول کف مشبک، ϕ قطر میله‌ها، d فاصله خالص بین میله‌ها، S_L شیب طولی میله‌ها و B عرض کانال مستطیلی بوده و پارامترهای هیدرولیکی بکار رفته عبارتند از: Q_r دبی کل، Q_d دبی باقیمانده در رودخانه و Q_h دبی منحرف شده توسط کف مشبک.

با قبول این فرض که ارتفاع مؤثری که باعث ایجاد جریان در کف مشبک می‌گردد، برابر با انرژی مخصوص است [۵] می‌توان به منظور تخمین دبی منحرف شده Q_d بر حسب انرژی مخصوص در مقطع تقرب E_0 از معادله زیر استفاده کرد.

$$Q_d = C_d \varepsilon B L \sqrt{2gE_0} \quad (2)$$

برای تخمین طول مورد نیاز آبگیر با کف مشبک می‌توان از رابطه (۳) استفاده کرد. تحقیقات نشان داده که افت انرژی بر روی کف مشبک در تیپ‌های A1 و B1 جریان زیاد بوده و در تیپ A3 چندان زیاد نیست [۶، ۷] در نتیجه از فرمول موسستکو (معادله ۳) فقط برای تیپ A3 جریان می‌توان استفاده کرد:

$$x = \frac{E}{\varepsilon C_1} (\eta_1 \sqrt{1-\eta_1} - \eta \sqrt{1-\eta}) \quad (3)$$

در رابطه فوق $\eta = y/E$ و C_1 ضریبی معلوم است. عمق کنترل برای استفاده در معادله (۳) بر اساس تحقیقات دماچی که با فرض اولیه همخوانی دارند با توجه به نوع پروفیل شکل گرفته مطابق جدول (۱)، برای پروفیل‌های A3 و B1 برابر y_0 و برای پروفیل A1 برابر عمق بحرانی در کانال بالادست می‌باشد [۶]. تحقیقات به عمل آمده توسط سوبرامانیا [۶، ۷] نشان داد که:

$$C_d = f\left(\frac{\phi}{d}, S_L, \eta_E, \text{Type of Flow}\right) \quad (4)$$

که در آن η_E پارامتری از جریان بوده و برابر است با:

$$\eta_E = \frac{V_0^2}{2gE_0} = \frac{Fr_0^2}{2 + Fr_0^2} \quad (5)$$

Fr_0 و V_0 به ترتیب عدد فرود و سرعت متوسط جریان در مقطع با جریان یکنواخت در بالادست که در شکل (۱) با علامت مقطع 0 نشان داده شده است.

روابط مختلفی بیانگر تغییرات ضریب تخلیه C_d در انواع جریان بسته به شیب‌دار بودن یا افقی بودن کف مشبک عبارتند از [۷]:

الف) کف مشبک شیب‌دار

$$A1: C_d = 0.53 + 0.4 \log(\phi/d) - 0.61 S_L \quad (6)$$

$$B1: C_d = 0.39 + 0.27 \log(\phi/d) - 0.8 \eta_E - 0.51 \log S_L \quad (7)$$

ب) کف مشبک افقی

$$A1: C_d = 0.601 + 0.2 \log(\phi/d) - 0.247 \eta_E \quad (8)$$

$$A3: C_d = 0.752 + 0.28 \log(\phi/d) - 0.565 \eta_E \quad (9)$$

$$B1: C_d = 1.115 + 0.36 \log(\phi/d) - 1.084 \eta_E \quad (10)$$

$$C_d = 0.611 + 0.08 \frac{H_d}{P} \quad (11)$$

در این رابطه C_d ضریب تخلیه سرریز لبه تیز تمام عرض هوا دهی شده، H_d ارتفاع آب روی سرریز که در فاصله حداقل $3H_d$ از تاج سرریز اندازه‌گیری می‌شود و P ارتفاع سرریز می‌باشد. به منظور ساخت مدل با ایجاد کانالی بر روی فلوم موجود در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی، یک کانال دو طبقه از جنس پلکسی گلس مطابق شکل (۲) ایجاد گردید. برای اندازه‌گیری عمق آب در کانال فوقانی از عمق سنج و در کانال تحتانی از مانومتر و نیز به منظور کنترل نتایج حاصل از مانومترها از عمق سنج‌های مستغرق استفاده گردید.



تصویر ۲- نمایی از قسمت اندازه‌گیری دبی به کمک دو سرریز لبه تیز مستطیلی در انتهای کانال دو طبقه

۴- بررسی نتایج

در شکل (۳) نسبت دبی‌های منحرف شده Q_d و باقیمانده Q_r به دبی کل Q_t برای قطرهای و طول‌های متفاوتی از کف‌های مشبک طولی و عرضی با $\varepsilon = 36\%$ نشان داده شده است. مقایسه نمودارهای مختلف نشان می‌دهد که کمترین انحراف دبی در حالتی است که میله‌ها عمود بر جهت جریان قرار گرفته‌اند. در راهنمای این نمودارها، T بیانگر میله‌های عمود بر جهت جریان، L میله‌های موازی با جهت جریان، خطوط ممتد دبی منحرف شده و خطوط گسسته دبی باقیمانده در کانال می‌باشند. با دقت در شکل (۳) می‌توان دریافت که در چیدمان طولی و دبی‌های کمتر از ۲۰ لیتر بر ثانیه، تمام دبی منحرف شده و سپس با افزایش دبی کل Q_t تا ۳۵ الی ۴۰ لیتر بر ثانیه، درصد دبی منحرف شده (Q_d/Q_t) تا حداکثر ۶۷٪ کاهش می‌یابد.

در مورد سایر انواع کف‌های مشبک مانند کف‌های مشبک با میله‌های عرضی می‌توان به مطالعات سوبرامانیا و سنگوپتا [۸] و همچنین رانگاراچو و همکاران [۹] و در مورد صفحات مشبک در حالت افقی به تحقیقات سوبرامانیا و زاگاد رجوع کرد [۱۰].

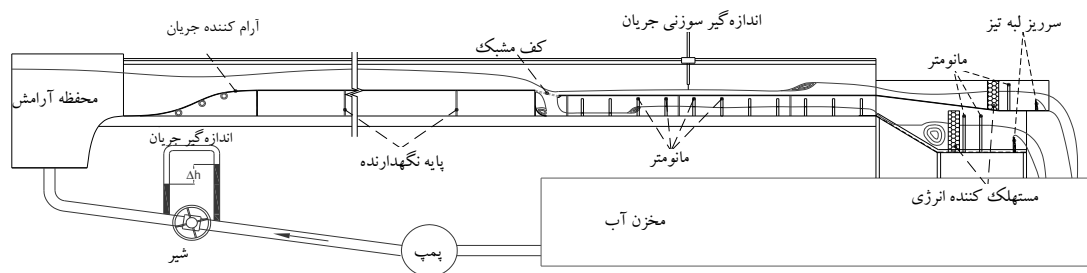
۳- ساخت مدل آزمایشگاهی

با استفاده از روابط (۱) تا (۱۰) و با توجه به محدودیت‌های موجود، محاسبات برای دبی کل بین ۵ تا ۶۰ لیتر بر ثانیه و در کانالی مستطیلی با عرض ۴۰ سانتی‌متر برای حالت‌های مختلف کف مشبک از قبیل چیدمان طولی و عرضی و قطرهای متفاوت میله‌ها برای جریان فوق بحرانی و زیر بحرانی در بالادست، انجام گردید. با انجام این محاسبات طول لازم برای انحراف تمام دبی جاری در بالادست آبیگر، حداکثر عمق در قسمت‌های مختلف مدل برای دبی‌های گوناگون و ضریب تخلیه با استفاده از روابط سوبرامانیا و موسکو محاسبه گردید. در انجام این محاسبات برای داشتن متغیرهای مختلف جهت مقایسه و همچنین استفاده از قانون تشابه دینامیکی جریان بر اساس عدد فرود، قطرهای ۴، ۶ و ۸ میلی‌متر با بازشدگی خالص ۳۰٪، ۳۶٪ و ۴۰٪ بر اساس توصیه‌های طراحی که ε را ۳۰ تا ۴۰٪ در کف‌های مشبک توصیه می‌کنند، در نظر گرفته شد. این پارامترها طوری اختیار شده‌اند که با تغییر آنها، حالات گوناگونی از قبیل آبیگر کاملاً مستغرق و یا حالتی که در آن تمام دبی منحرف می‌شود، ایجاد گردد. در نهایت در نظر گرفتن جریان زیر بحرانی در کانال بالادست، $L_{max} = 20 \text{ cm}$ و شیب ۲۵٪ برای کف مشبک با توجه به شیب بهینه بین ۲۰ تا ۳۰٪ انتخاب گردید (شکل ۱). برای بررسی بیشتر نقش طول آبیگر در دبی منحرف شده، از طول‌های متنوعی استفاده شده است (۲۰، ۱۶، ۱۴، ۱۲ و ۱۰ سانتی‌متر). با توجه به محاسبات صورت گرفته و میزان دبی‌های منحرف شده و باقیمانده در کانال، اندازه‌گیری دبی توسط سرریزهای لبه تیز مستطیلی کالیبره شده با ارتفاع‌های ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متر انجام شده است.

کالیبراسیون سرریزها با اندازه‌گیری زمان عبور حجم مشخصی از آب از روی سرریزها و نیز اندازه‌گیری ارتفاع در بالادست سرریزها، انجام پذیرفته که نهایتاً ضریب تخلیه سرریزها با استفاده از رابطه (۱۱) محاسبه گردید:



تصویر ۱- کف مشبک با $L=20\text{ cm}$ (الف) کف مشبک با میله‌های طولی، (ب) کف مشبک با میله‌های عرضی

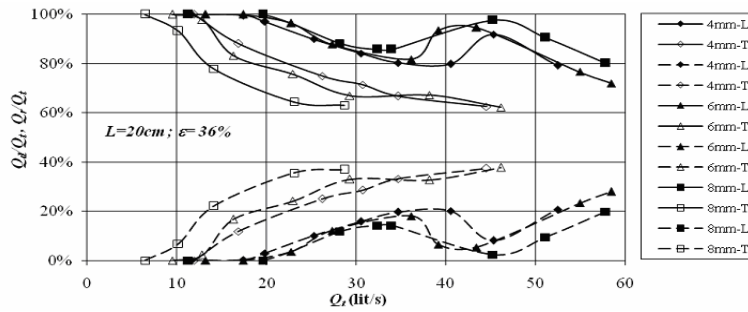


شکل ۲- نمایی کلی از مدل ساخته شده برای انجام آزمایشات رسوب

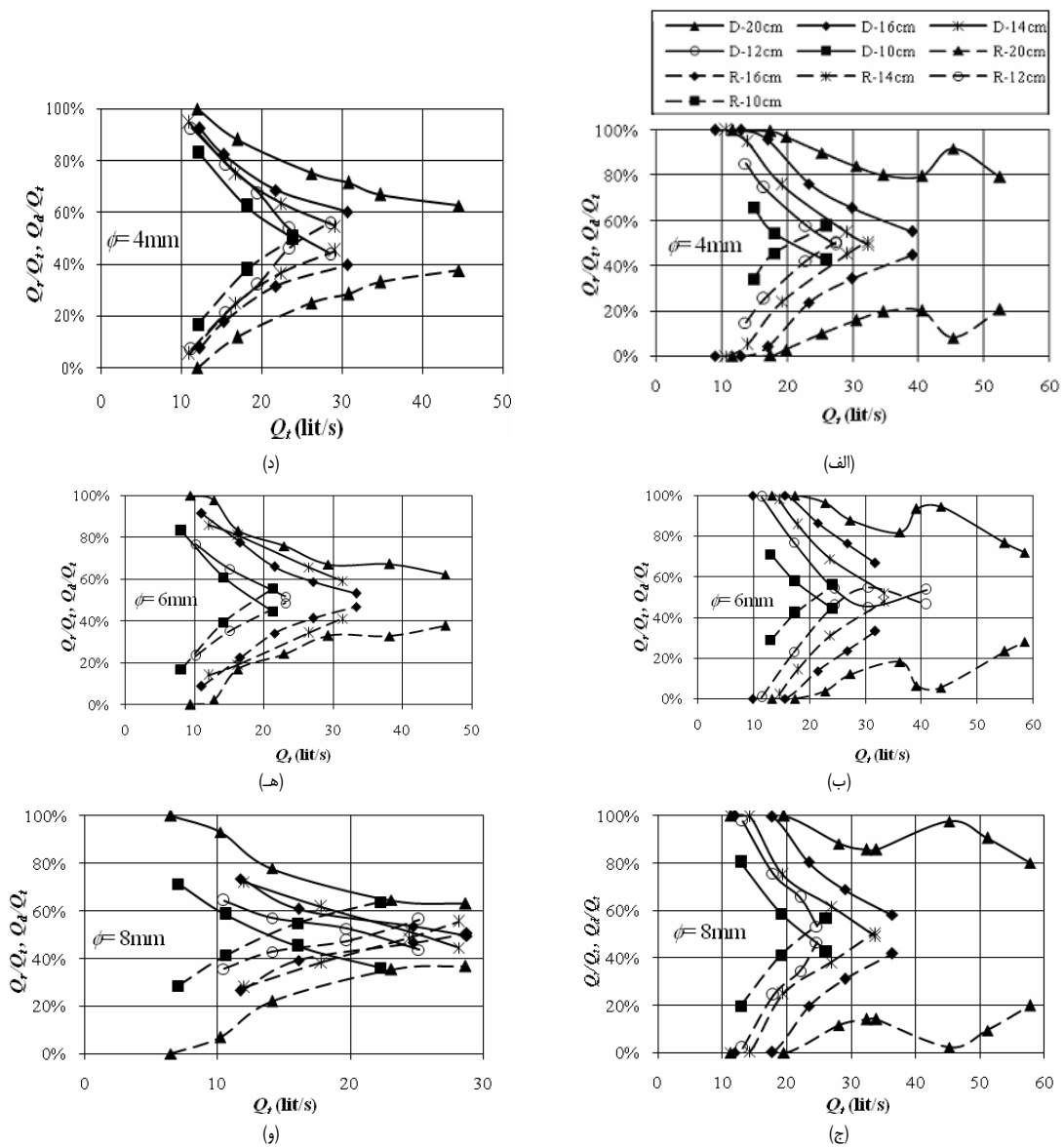
در شکل‌های (۴- الف تا و) می‌توان به مقایسه عملکرد آبگیرهای با کف مشبک با توجه به پارامترهای گوناگون پرداخت. در این شکل‌ها خطوط توپر که با حرف D نشان داده شده اند نمایانگر دبی منحرف شده و خط چین‌ها که با حرف R نشان داده شده‌اند، نمایانگر دبی باقیمانده هستند. با بررسی شکل‌های (۴- الف، ب، ج) می‌توان دریافت که در بین آبگیرهای با میله‌های طولی با ε ثابت، هرچه قطر بیشتر شود درصد دبی منحرف شده افزایش می‌یابد. البته مقدار دبی منحرف شده در کف‌های مشبک با میله‌های طولی با طول سرریز رابطه مستقیمی داشته و با کم و یا زیاد کردن طول می‌توان میزان دبی منحرف شده را کاهش یا افزایش داد.

در شکل‌های (۴- د، ه، و) متناظر با شکل‌های (۴- الف، ب، ج) رفتار هیدرولیکی کف‌های مشبک با میله‌های عرضی نشان داده شده است. البته برعکس حالت میله‌های موازی با جهت جریان طول سرریز با میزان دبی منحرف شده همواره رابطه مستقیمی نداشته و گاهی با کاهش طول آبگیری، دبی منحرف شده افزایش پیدا می‌کند. این مسأله را در شکل (۴- ه) در دو حالت $L=14\text{ cm}$ و $L=16\text{ cm}$ می‌توان به راحتی دید.

پس از آن با افزایش بیشتر دبی در کانال اصلی تا ۴۵ لیتر بر ثانیه به دلیل محبوس شدن هوا بین خط جریان زیرین و دیواره‌های کانال تحتانی دبی منحرف شده افزایش یافته و نهایتاً در دبی‌های بالاتر از ۴۵ لیتر بر ثانیه با استغراق کانال تحتانی در محل آبگیر و همچنین خود آبگیر، بر اساس قوانین حاکم بر آریفیس‌ها با افزایش ارتفاع آب روی آبگیر مقدار دبی منحرف شده کاهش و در نتیجه دبی باقیمانده افزایش می‌یابد. در چیدمان عرضی میله‌ها به دلیل نحوه متفاوت ریزش آب به درون کانال تحتانی، نوسانات انحراف دبی وجود نداشته و با افزایش دبی کل، مقدار دبی منحرف شده نیز افزایش یافته و در نهایت در مقدار تقریبی ۶۰٪ ثابت باقی می‌ماند. با بکارگیری میله‌های طولی این عدد به ۸۰٪ افزایش پیدا می‌کند. همچنین می‌توان چنین نتیجه گرفت که در بین آبگیرهای با میله‌های طولی با ε ثابت، هرچه قطر بیشتر شود درصد دبی منحرف شده افزایش می‌یابد که عکس این مسأله در آبگیرهای عرضی صادق است. البته مقدار دبی منحرف شده در کف‌های مشبک طولی با طول سرریز رابطه مستقیمی داشته و با کم و یا زیاد کردن طول می‌توان میزان دبی منحرف شده را کاهش یا افزایش داد.



شکل ۳- مقایسه کفهای مشبک با میله‌های موازی و عمود بر جهت جریان



شکل ۴- مقایسه میزان گذردهی کفهای مشبک با $\epsilon=36\%$ (الف)، (ب) و (ج) چیدمان طولی، (د)، (ه) و (و) چیدمان عرضی

۵- تحلیل هیدرودینامیکی

در شکل (۵) نحوه ریزش آب از میان میله‌های کف مشبک در دو حالت چیدمان طولی و عرضی میله‌ها نشان داده شده است. با مقایسه دو شکل (۵- الف، ب) با یکدیگر می‌توان چنین نتیجه گرفت که هرچه قطر میله بزرگتر باشد شعاع انحنای خط جریان آب نیز بزرگتر می‌شود، در نتیجه برای چیدمان عرضی آبگیر با کف مشبک: $\sum \delta_s > \sum \delta_l$ که در آن δ عرض غیر مؤثر عبور جریان به علت حضور میله‌ها می‌باشد. بنابراین مقدار بازشدگی مؤثر با قطر رابطه مستقیم داشته و بزرگتر شدن قطر موجب بیشتر شدن فاصله خالص بین میله‌ها و در نهایت افزایش میزان دبی عبور کننده از میان میله‌ها می‌شود. با مقایسه اشکال (۴- الف، ب، ج) می‌توان دید که در دبی ثابت ۳۵ lit/s و طول ۲۰ cm، پروفیل‌های با قطر ۴، ۶ و ۸ mm به ترتیب ۸۰، ۸۲ و ۸۶٪ جریان را منحرف می‌کنند. اما در کف‌های مشبک عرضی بر خلاف کف‌های مشبک طولی با افزایش قطر، مقدار ضریب تخلیه C_d و در نهایت دبی منحرف شده Q_d کاهش پیدا می‌کند. همچنین همانطور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، با افزایش قطر از ۴ به ۸ میلی‌متر، مقدار دبی منحرف شده کاهش می‌یابد.

۶- مقایسه ضرایب تخلیه آزمایشگاهی

شکل (۶) مقایسه ضریب تخلیه در کف‌های مشبک با قطر و چیدمان طولی و عرضی میله‌ها را به تفکیک میزان بازشدگی نشان می‌دهد. همانطور که در شکل پیداست ضریب تخلیه با افزایش عدد رینولدز آریفیس ($Q_d/(v \cdot \Delta L)$) افزایش می‌یابد. همچنین افزایش قطر در میان میله‌های طولی باعث افزایش مقدار ضریب تخلیه می‌شود که عکس این مسأله در میله‌های با چیدمان عرضی صادق است.

با نگاهی به این شکل می‌توان گفت برای تمام حالات بازشدگی، ضریب تخلیه کف مشبک با میله‌های طولی از میله‌های عرضی بیشتر است. این تفاوت در بازشدگی‌های کمتر یعنی ۳۰٪ با شدت بیشتری دیده می‌شود. در این درصد بازشدگی، ضریب تخلیه برای میله‌های عرضی با قطر کم، کمتر از میله‌های با قطر زیاد می‌باشد. این موضوع بخصوص برای \mathcal{E} های ۳۶٪ و ۴۰٪ در آرایش طولی میله‌ها هم صادق است.

همچنین در شکل (۶)، در بازشدگی‌های ۳۶٪ و ۴۰٪، روند افزایش ضریب تخلیه تقریباً ثابت بوده اما در حالتی که رژیم

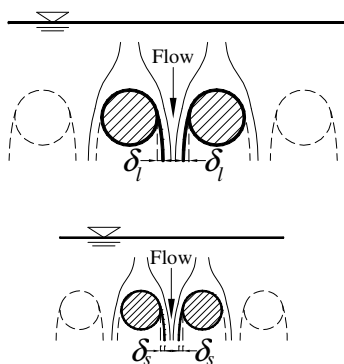
جریان در بالادست به جریان فوق بحرانی نزدیک می‌شود ($Fr_0 > 0.95$) مقدار ضریب تخلیه کاهش می‌یابد. به دلیل انحنای جریان عبور کننده از میان میله‌ها و گسترش فشار منفی ناشی از اثر کواندا در امتداد میله‌های با مقطع دایره و $0.4 < \mathcal{E} < 0.3$ مقدار ضریب تخلیه بزرگتر از واحد در شکل (۶- ب) مشاهده می‌شود که مطابق با یافته‌های برونلا و همکاران است [۴].

۷- آنالیز ابعادی

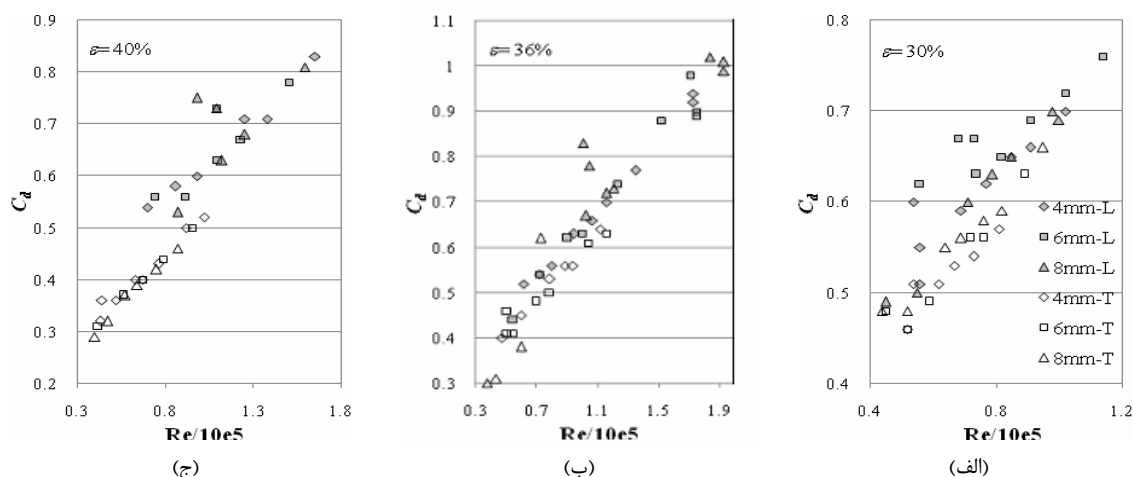
با توجه به نتایج آزمایشات و مطالعات انجام شده پارامترهای بدون بعدی که علاوه بر چیدمان میله‌ها (طولی یا عرضی) بر تغییرات ضریب تخلیه مؤثرند عبارتند از:

$$C_d = f\left(\frac{\phi}{d}, \frac{y_1}{L}, S_L, Fr, Re\right) \quad (12)$$

با توجه به اینکه هیچگونه شناختی از نحوه ارتباط این متغیرها با C_d وجود ندارد و یا به عبارت دیگر اطلاعی از نوع تابع f موجود نیست، باید با مراجعه به توابع آماری که یک سری اطلاعات آزمایشگاهی را با تعدادی متغیر به یکدیگر ارتباط می‌دهند، تابع f را جستجو نمود. در این جستجو می‌توان از توابع خطی یا توابع غیر خطی بهره جست. این کار به معنای برازش دادن یک خط یا منحنی بر اطلاعات بدست آمده از آزمایش می‌باشد. برای اطمینان از مناسب بودن برازش‌ها باید از روابط و معیارهای آماری استفاده کرد.



شکل ۵- مقطع عرضی خطوط جریان در عبور از کف مشبک (الف) میله‌های با قطر بزرگتر و (ب) میله‌های با قطر کوچکتر



شکل ۶- مقایسه ضریب تخلیه کف‌های مشبک با میله‌های موازی و عمود بر جریان با طول ثابت $L=20\text{cm}$

خطوط برازش داده شده بر داده‌های چیدمان طولی حدوداً $1/2$ برابر شیب متوسط خطوط برازش داده شده بر داده‌های چیدمان عرضی است که نشانگر حساسیت بیشتر ضریب تخلیه میله‌های طولی نسبت به تغییرات Re می‌باشد.

۷-۲- برازش غیرخطی

با توجه به شکل‌های (۷) و (۸) در ابتدا مدلی به صورت زیر جهت برآورد ضریب تخلیه پیشنهاد گردید:

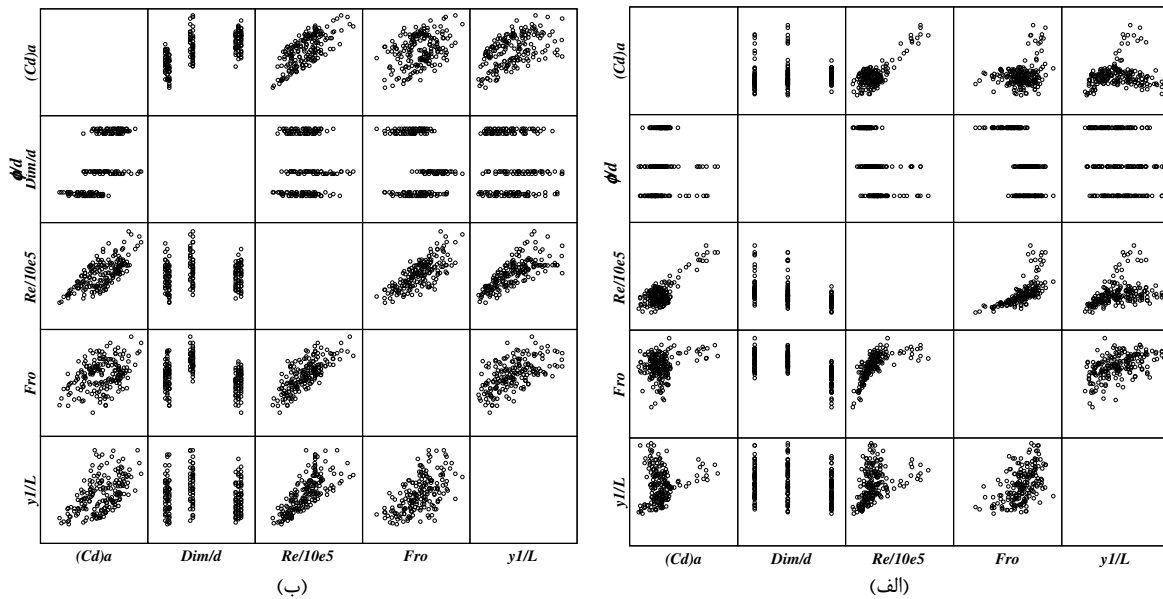
$$C_d = c_1 + c_2 \log\left(\frac{\phi}{d}\right) + c_3 Fr_0^{c_4} + c_5 \left(\frac{y_1}{L}\right) \quad (13)$$

اما به دلیل پایین بودن مقدار عددی R^2 مدل، عدد رینولدز آریفیس Re جایگزین عدد فرود بالادست Fr_0 گردید. در سعی بعد، به دلیل ناچیز بودن مقدار عددی c_5 و همچنین تأثیر اندک آن در بالا بردن دقت مدل، از وارد کردن پارامتر بدون بُعد y_1/L در محاسبات صرفنظر گردید. سپس در سعی سوم، مدلی کلی به صورت رابطه (۱۴) برای 221 داده چیدمان طولی و 213 داده چیدمان عرضی میله‌ها در نظر گرفته شد.

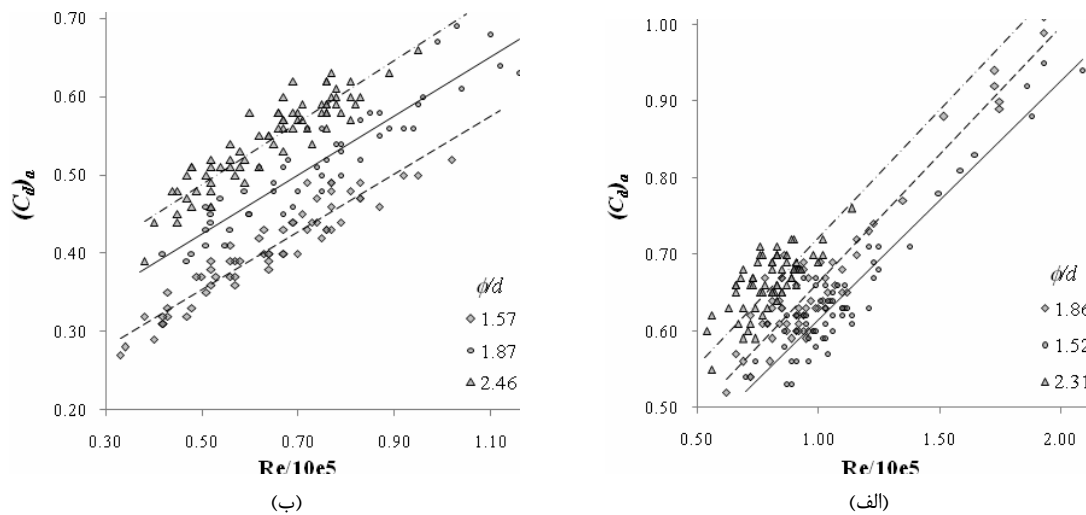
$$C_d = c_1 + c_2 \cdot \log\left(\frac{\phi}{d}\right) + c_3 \left(\frac{Re}{10^5}\right)^{c_4} \quad (14)$$

با توجه به اینکه نوع جریان در آزمایشات $A1$ و $A3$ بوده و همچنین شیب طولی میله‌ها تغییر داده نشده، در تعیین تابع ضریب تخلیه از این دو پارامتر رابطه (۱۲) استفاده نمی‌شود. اگر $(C_d)_a$ را متغیر وابسته و ϕ/d ، Fr_0 و $Re/10e5$ را به عنوان متغیرهای مستقل در نظر بگیریم، اشکال (۷-الف، ب) پراکنش این متغیرها را در مقابل یکدیگر به ترتیب برای چیدمان‌های طولی و عرضی نشان می‌دهند. این شکل بیانگر رابطه قوی خطی بین مقدار $(C_d)_a$ و عدد رینولدز آریفیس Re می‌باشد. همچنین با توجه به نمودارهای مربوط به $(C_d)_a$ در مقابل Fr_0 و y_1/L می‌توان به رفتار کاملاً متفاوت دو نوع چیدمان طولی و عرضی پی برد.

تأثیر نسبت ϕ/d بر ضریب تخلیه برای مقادیر مختلف طول کف مشبک با تغییر عدد رینولدز آریفیس Re در شکل (۸) نشان داده شده است. در این شکل پراکنش ناچیزی مشاهده می‌شود که حاکی از تغییرات تقریباً یکسان $(C_d)_a$ برای طول‌های مختلف است. از آنجا که شیب سه خط برازش داده شده برای دو چیدمان طولی و عرضی میله‌ها با هم برابر است، می‌توان استقلال پارامتر بی بُعد ϕ/d را از سایر پارامترهای مؤثر نتیجه گرفت. همچنین با دقت در این شکل می‌توان گفت که در چیدمان طولی میله‌ها در یک Re ثابت کمترین مقدار $(C_d)_a$ متعلق به $\phi/d = 1/52$ و بیشترین مقدار $(C_d)_a$ مربوط به $2/31$ است اما در چیدمان عرضی با افزایش نسبت ϕ/d در یک Re ثابت، ضریب تخلیه نیز افزایش پیدا می‌کند. شیب متوسط



شکل ۷- پراکنش پارامترهای بدون بعد مؤثر در تعیین ضریب تخلیه آبیگرهای با کف مشبک، (الف) چیدمان طولی، (ب) چیدمان عرضی



شکل ۸- ضریب تخلیه بر اساس عدد رینولدز آرفیس Re برای نسبت‌های مختلف ϕ/d (الف) چیدمان طولی، (ب) چیدمان عرضی

رگرسیون، تعدادی از داده‌ها که در نمودارهای تست ثبات واریانس به صورت چشمی پرت به نظر می‌رسیدند، حذف شده و برای $N_T=184$ و $N_L=197$ ضرایب به صورت زیر مشخص گردیدند.

با وارد کردن داده‌ها در نرم افزار SPSS و مشخص کردن ضرایب، برای اصلاح فرمول ارایه شده و ارضای شرط‌های

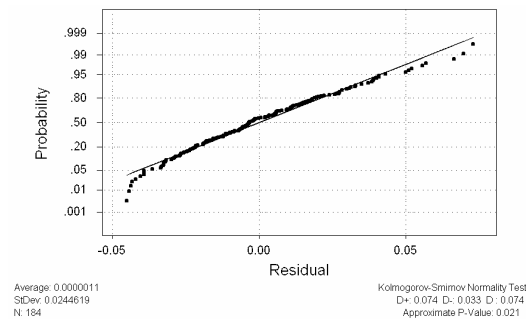
$$C_{dL} = 0.352 + 0.549 \log\left(\frac{\phi}{d}\right) + 0.162 \left(\frac{Re}{10^5}\right)^{1.659} \quad (15)$$

با توزیع مفروضی امتحان می‌کند، آزمون کلموگروف-اسمیرنوف یا K-S می‌باشد. این آزمون آماره D_{max} که به آماره یک نمونه‌ای K-S معروف است را به صورت بیشینه قدر مطلق اختلافات تعریف می‌کند. اگر فرض کنیم توزیع برازش شده با توزیع نمونه یکی است، آنگاه $D_{max} < D_a$. مقدار D_{max} محاسبه شده بوسیله نرم افزار Minitab برای روابط (۱۵) و (۱۶) به ترتیب برابر $۰/۰۳۲$ و $۰/۰۷۴$ می‌باشد که هر دو مقدار کمتر از $D_a = ۰/۱۴$ در فاصله اطمینان ۹۵% می‌باشند، بنابراین طبق تست K-S خطاها از توزیع نرمال پیروی می‌کنند (شکل ۹). در مرحله بعد ثبات واریانس باقیمانده‌ها کنترل می‌شود. ثابت بودن واریانس باقیمانده‌ها به معنی بی‌اعتباری مساوی برای تمام باقیمانده‌ها می‌باشد. به منظور کنترل اینکه آیا واریانس متغیر وابسته برای تمام مقادیر مستقل ثابت است، می‌توان نمودار باقیمانده‌ها را در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده بررسی کرد.

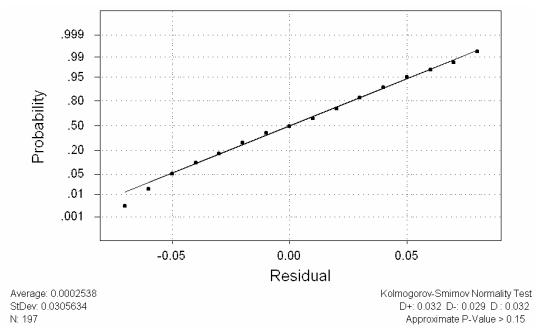
$$C_{dT} = 0.021 + 0.696 \log\left(\frac{\phi}{d}\right) + 0.723 \left(\frac{Re}{10^5}\right)^{0.548} \quad (۱۶)$$

مقدار R^2 برای دو رابطه (۱۵) و (۱۶) به ترتیب $۰/۸۷$ و $۰/۹۳$ بدست آمده است.

تجزیه و تحلیل باقیمانده‌ها در بررسی فرض نرمال بودن باقیمانده‌ها یا خطاها و در تعیین این موضوع که آیا جملات اضافی در مدل مفیدند یا نه، ارزنده خواهد بود. برای بررسی نرمال بودن، می‌توان هیستوگرام فراوانی مانده‌ها را رسم کرد. اگر خطاها نرمال باشند، آنگاه تقریباً ۹۵% مانده‌های استاندارد شده در فاصله $(-۲, ۲)$ قرار گیرند. مانده‌های خارج از این فاصله می‌توانند دلالت بر این موضوع داشته باشند که یک یا چند مشاهده از نوع بقیه نیستند و باید از محاسبات خارج شوند. یکی دیگر از آزمون‌های معروفی که برای بررسی توزیع یک نمونه را

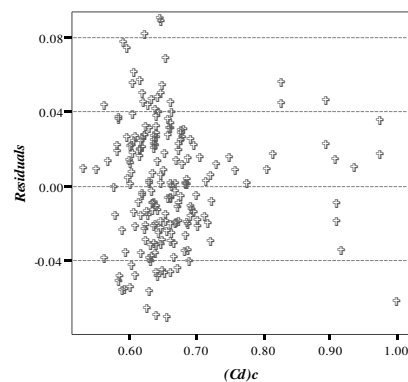
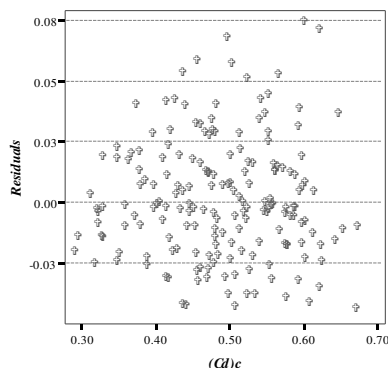


(ب)



(الف)

شکل ۹- نمایش تست نرمال K-S. (الف) رابطه پیشنهادی برای چیدمان طولی، (ب) رابطه پیشنهادی برای چیدمان عرضی



شکل ۱۰- نمایش باقیمانده‌ها بر اساس مقدار برازش شده

(الف) رابطه پیشنهادی برای چیدمان طولی (رابطه ۱۵) (ب) رابطه پیشنهادی برای چیدمان عرضی (رابطه ۱۶)

درصد خطای محاسبات را برای هر یک از دو رابطه پیشنهادی می‌توان از رابطه زیر بدست آورد:

$$Error = 100 \times \frac{(C_d)_a - (C_d)_c}{(C_d)_a} \quad (22)$$

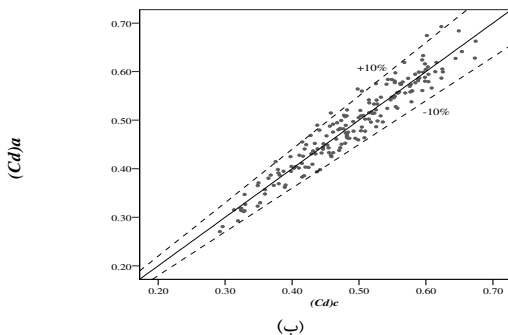
میانگین و انحراف استاندارد درصد خطا برای رابطه پیشنهادی (۱۵) به ترتیب ۰/۲۱۶- و ۴/۶۹۱ و برای رابطه (۱۶) به ترتیب ۰/۲۷۲- و ۴/۹۶۴ می‌باشد. برای تخمین فاصله‌ای مناسب از درصد خطا از فرمول زیر استفاده می‌شود:

$$N(\mu, \sigma^2) \quad (23)$$

$$P[\mu - Z_{\alpha/2}\sigma^2 \leq X \leq \mu + Z_{\alpha/2}\sigma^2] = (1-\alpha)\%$$

فرمول فوق بیان می‌کند که اگر X از توزیع نرمال با میانگین μ و واریانس σ^2 پیروی کند، آنگاه در سطح اعتماد $(1-\alpha)\%$ ، X بین مقادیر $\mu + Z_{\alpha/2}\sigma^2$ و $\mu - Z_{\alpha/2}\sigma^2$ قرار خواهد گرفت. با توجه به روابط ارائه شده، خطای روابط پیشنهادی (۱۵) و (۱۶) در فاصله اطمینان ۹۵٪ به ترتیب در فواصل [۸/۹۸، ۹/۴۱-] و [۱۰/۰۰-، ۹/۴۶] قرار خواهند گرفت.

نمودار ضریب تخلیه بدست آمده از مشاهدات آزمایشگاهی $(C_d)_a$ و برازش داده شده $(C_d)_c$ در شکل (۱۱) نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می‌شود، داده‌ها حول خط برازش داده شده (خط پیوسته) به میزان اندکی دارای نوسان می‌باشند که نشان دهنده تخمین مناسبی از ضریب تخلیه به کمک پارامترهای هندسی و هیدرولیکی مؤثر می‌باشد. همچنین با توجه به این که در شکل مذکور خطوط گسسته نشانگر برازش خطی مقادیر $(C_d)_a$ (۱۰±) می‌باشد، می‌توان دید خطای مقادیر برازش شده در حدود ۱۰±٪ می‌باشد.



(ب)

اگر واریانس ثابت باشد، باقیمانده‌ها به صورت تصادفی اطراف خط افقی صفر پراکنده می‌شوند. در شکل (۱۰) ثابت واریانس باقیمانده‌های حاصل از روابط (۱۵) و (۱۶) را می‌توان دید. برای آزمودن استقلال باقیمانده‌ها می‌توان از آزمون والد-ولفوویتز (W-W) استفاده کرد [۱۱]. اگر x_1, x_2, \dots, x_N سری داده‌های نمونه باشند، آزمون W-W بر اساس آماره R و مقدار استاندارد شده آن U_R که از روابط (۱۷) تا (۲۱) بدست می‌آیند، بنا شده است. در مقایسه U_R با $Z_{\alpha/2}$ اگر $U_R \leq Z_{\alpha/2}$ ، آنگاه داده‌ها مستقل فرض می‌شوند. $Z_{\alpha/2}$ نقطه بحرانی توزیع نرمال استاندارد به‌ازای خطای $\alpha/2$ یا فاصله اطمینان $(1-\alpha)\%$ می‌باشد. این مقدار برای فاصله اطمینان ۹۵٪ برابر ۱/۹۶ بدست می‌آید.

$$R = x_1 x_N + \sum_{i=1}^{N-1} x_i x_{i+1} \quad (17)$$

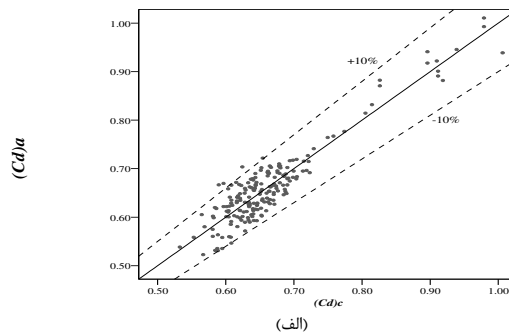
$$U_R = \frac{R - \bar{R}}{\sqrt{Var(R)}} \quad (18)$$

$$S_k = \sum_{i=1}^N x_i^k \quad (19)$$

$$\bar{R} = \frac{S_1^2 - S_2}{N-1} \quad (20)$$

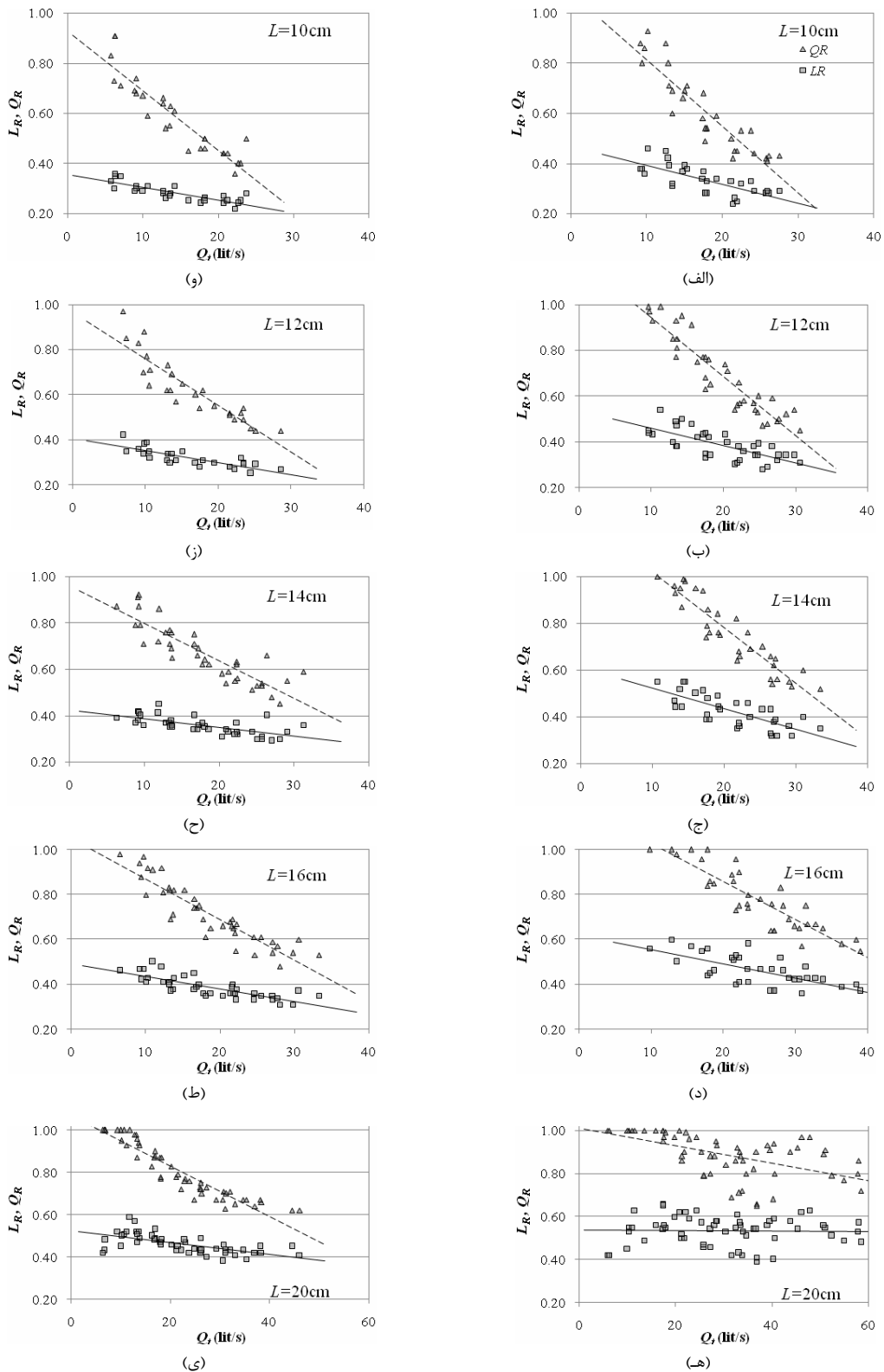
$$Var(R) = \frac{S_2^2 - S_4}{N-1} - \bar{R}^2 + \frac{S_1^4 - 4S_1^2 S_2^2 + 4S_1 S_3 + S_2^2 - 2S_4}{(N-1)(N-2)} \quad (21)$$

با استفاده از آزمون W-W مشاهده می‌شود مقدار U_R برای روابط ضریب تخلیه با چیدمان طولی و عرضی به ترتیب برابر ۰/۱۸ و ۰/۳۲ بدست می‌آید که هر دو از $Z_{0.025} = 1/96$ کوچکتر می‌باشند، پس در هر دو مورد باقیمانده‌ها مستقل می‌باشند.



(الف)

شکل ۱۱- مقایسه مقادیر آزمایشگاهی و برازش داده شده ضریب تخلیه (الف) رابطه پیشنهادی برای چیدمان طولی، (ب) رابطه پیشنهادی برای چیدمان عرضی



شکل ۱۲- تغییرات پارامترهای بدون بُعد L_R و Q_R به صورت تابعی از Q_i که به ترتیب با علائم مربع و مثلث نشان داده شده‌اند
 دیاگرام‌های سمت راست (الف تا ه) چیدمان طولی و دیاگرام‌های سمت چپ (و تا ی) چیدمان عرضی

۷-۳- نتایج محاسبات عددی

همچنین با داشتن مقادیر برازش داده شده ضریب تخلیه می‌توان نمودار پارامتر $L_R = (C_d) \varepsilon (L/y_0)$ و نسبت دبی منحرف شده به دبی کل $Q_R = Q_d/Q_t$ را به صورت تابعی از دبی کل Q_t رسم کرد (شکل ۱۲). برای $L = 20$ cm در چیدمان طولی، مقدار L_R مستقل از دبی کل Q_t به عدد 0.54 می‌رسد. با توجه به قوانین تشابه دینامیکی، می‌توان مقدار مورد نیاز انحراف دبی و نوع چیدمان میله‌ها را عدد مناسبی برای پارامتر L_R با استفاده از نمودارهای شکل (۱۲) انتخاب کرد. البته باید توجه داشت که در کف‌های مشبک با چیدمان طولی، با افزایش ε مقدار L_R نیز افزایش پیدا می‌کند که عکس این مسأله در کف‌های مشبک با چیدمان عرضی صادق است.

با نگاهی دقیق به شکل (۱۲) می‌توان گفت تا طول L آنگیز برابر 12 cm شیب خط برازش داده شده بر نقاط L_R برای هر دو نوع چیدمان ثابت بوده اما در $L = 14$ cm شیب خط برازش داده شده بر L_R چیدمان طولی به حداکثر و در چیدمان عرضی کاهش زیادی یافته، طوری که به مقدار کمترین شیب نزدیک می‌شود. در $L = 16$ cm با کاهش شیب در چیدمان طولی و افزایش آن در چیدمان عرضی مقدار دو شیب به هم نزدیک می‌شوند. با افزایش طول آنگیز به $L = 20$ cm مقدار شیب در چیدمان طولی با کاهش قابل ملاحظه به صفر رسیده و در چیدمان طولی مقدار شیب خط برازش داده شده بر مقادیر L_R نصف می‌شود. روند کاهش و یا افزایش شیب خط برازش داده شده بر نقاط مربوط به Q_R در چیدمان عرضی مشابه شیب خط برازش نقاط L_R بوده اما در چیدمان طولی شیب خط تا طول 14 cm ثابت بوده و پس از آن رابطه‌ای معکوس با افزایش طول پیدا می‌کند. شایان ذکر است که شیب خط برازش داده شده بر نقاط Q_R در $L = 16$ cm در هر دو چیدمان برابر است.

۸- نتیجه‌گیری

هر یک از روش‌های آنگیزی که تا کنون توسعه داده شده برای رودخانه‌های خاص و شرایط جریان و بار رسوبات ویژه‌ای مناسبند. مناسب بودن هر روش وابسته به میزان آب برداشتی و کنترل ورود رسوبات به محدوده آنگیز می‌باشد. آنگیزهای با کف مشبک در رودخانه‌های کوهستانی و کوهپایه‌ای قابل استفاده هستند. در کار حاضر، آرایش‌های مختلفی از میله‌های کف مشبک از نظر نحوه قرارگیری (به صورت طولی و عرضی) و میزان خالص سطح بازشدگی به سطح کل آنگیز با کف مشبک مورد آزمایش عبور جریان تحت دبی‌ها و هددهای مختلف قرار گرفتند و در هر مورد میزان دبی منحرف شده و دبی باقی‌مانده بر روی کانال اصلی اندازه‌گیری شدند. حاصل کار نشان داد که ضریب تخلیه در آرایش طولی میله‌ها نسبت به این ضریب در

آرایش عرضی حدود 65% بیشتر بوده است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که با استغراق کانال تحتانی در موقعیت کف مشبک عملاً انحراف بیشتر دبی از تغییرات اندکی برخوردار بوده و عمده افزایش دبی در کانال اصلی رخ می‌دهد. با تحلیل آماری نتایج آزمایشگاهی، دو رابطه مجزا برای ضریب تخلیه C_d بر حسب پارامترهای مؤثر برای چیدمان‌های طولی و عرضی ارائه گردید. سپس با رسم نمودارهای تغییرات L_R و Q_R در مقابل دبی کل Q_t و بررسی تغییرات پارامترهای مؤثر رابطه‌ای ساده بر اساس متغیرهای مؤثری چون ε و C_d برای طراحی بهتر یک کف مشبک ارائه گردید.

مراجع

- [1] Drobir, H., "Entwurf von Wasserfassungen im Hochgebirge." Österr. Wasserwirtsch, 33 (11/12), pp. 243-253, 1981 (in German).
- [2] Ract-Madoux, X., M. Bouvard, J. Molbert and J. Zumstein, "Quelques Réalisations Récentes de Prises endessous á Haute Altitudeen Savoie" La Houille Blanche, 10 (6), pp. 852-878, 1955. (In French).
- [3] Ramamurthy, A.S., K. Subramanya and L. Cassabellada, "Uniformly Discharging Lateral Weirs" J. Irrigation and Drainage, ASCE, 1978.
- [4] Brunella, S., and Hager, W., and Minor, H.E., "Hydraulics of Bottom Rack Intake", J. of Hydraulic Engineering, ASCE, 129(1), 2003.
- [5] Mostkow, M.A., "A Theoretical Study of Bottom Type Water Intakes", La Houille Blanche, No. 4, 1957.
- [6] Subramanya, K., "Trench Weir Intake for Mini Hydro projects", Proc. Hydromech and Water Resources Conf. I.I. Sc., Bangalore, pp. 33-41, 1990.
- [7] Subramanya, K., "Hydraulic Characteristics of Inclined Bottom Racks", Proc. National Symp. on Recent Trends in Design of Hydraulic Structures, UOR, Roorkee, pp. 1-9, 1994.
- [8] Subramanya, K. and D. Sengupta, "Flow through Bottom Racks", Indian J. Tech. CSIR, 19(2), pp. 64-67, Feb. 1981.
- [9] Rangaraju, K.G., "Analysis of Flow through Bottom Racks in Open Channels", Proc. Fluid Mech. Conf., Adelaide, Australia, pp. 237-240, Dec. 1977.
- [10] Subramanya, K. and S.B. Zagade, "Flow over Perforated Bottom Plates", Proc. 17 Nat. Conf. of FM and FP., REC, Warangal, India, pp. 55-57, 1990.
- [11] فغفور مغربی، محمود و میر سجاد رضایی نسب، "برآورد دبی فاضلابروهای مدور با استفاده از مدل ترکیبی سرریز- دریچه" مجله آب و فاضلاب، شماره ۵۵، ۱۳۸۴.

