

مطالعه‌ی آزمایشگاهی فرآب ناشی از پایه‌ی کج پل با مقطع دایره‌یی شکل

افسانه نوبخت دلیر (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

مسعود قدسیان* (استاد)

پژوهشکده‌ی مهندسی آب، دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

مجتبی مهرآیین (استادیار)

دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی

مهندسی عمران شریف، بهار ۱۳۹۹ (دوره ۲ - شماره ۱/۲، ص. ۱۲۳-۱۳۲، یادداشت نثی)

مطالعه‌ی آزمایشگاهی حاضر با هدف بررسی اثر پارامترهای مختلف در میزان فرآب انجام شده است. در مطالعه‌ی حاضر، اثر زاویه‌ی پایه‌ی پل به سمت پایین دست، به سمت بالادست و به سمت دیواره‌ی کانال و همچنین اثر عدد فرود جریان و نسبت تنگ‌شدگی بر میزان فرآب بررسی شده است. برای طراحی آزمایش‌ها و تحلیل نتایج از نرم‌افزار طراحی آزمایش (Design-Expert ۷) استفاده و با انجام ۵۴ آزمایش به بررسی اثر کج‌شدگی پایه‌ی استوانه‌یی شکل در سه راستا بر عمق جریان پرداخته شده است. نتایج نشان داد با افزایش زاویه‌ی کج‌شدگی پایه به سمت پایین دست و به سمت دیواره‌ی کانال، فرآب افزایش می‌یابد. در حالی که با افزایش زاویه‌ی کج‌شدگی پایه به سمت بالادست، فرآب (نسبت به حالت قائم) کاهش می‌یابد. البته تأثیر مقدار زاویه‌ی کج‌شدگی در حالت‌های مختلف کج‌شدگی پایه در فرآب یکسان نیست. همچنین نتایج نشان داد با افزایش عدد فرود جریان و نسبت تنگ‌شدگی فرآب افزایش می‌یابد. علاوه بر این مشخص شد پارامترهایی که بیشتر اثر را در میزان فرآب دارند، عدد فرود جریان و نسبت تنگ‌شدگی هستند. در پایان نیز رابطه‌ی تجربی برای محاسبه‌ی مقدار فرآب ارائه شده است.

واژگان کلیدی: فرآب، پایه‌ی کج پل، طراحی آزمایش، عدد فرود، نسبت تنگ‌شدگی.

۱. مقدمه

ارتفاع آب پیش‌بینی شده بستگی خواهد داشت و لذا لازم است جهت طراحی بهیسه‌ی پل، میزان تأثیر مجموعه‌یی از پایه‌ها را در شرایط خاص حاکم بر رودخانه در حد قابل قبول و نسبتاً دقیق بررسی کرد. با توجه به اهمیت موضوع ذکر شده، پژوهشگران زیادی از سال‌های پیشین در این زمینه مطالعات علمی فراوانی انجام داده و تاکنون روش‌های مختلفی برای محاسبه‌ی فرآب ناشی از ساخت تکیه‌گاه و پایه‌های پل ارائه کرده‌اند. یارنل (۱۹۳۴)، آزمایش‌های زیادی در مورد آثار انسدادی پایه‌های پل با شکل‌های مختلف در جریان آب انجام داده و با در نظر گرفتن عدد فرود جریان، تنگ‌شدگی ناشی از پایه و شکل پایه، روش تجربی و ترسیمی خود را برای محاسبه‌ی فرآب ارائه کرده است.^[۱] روش USGS^۱ یکی از بزرگ‌ترین و جامع‌ترین تحقیقات جریان عبوری از تکیه‌گاه‌های مستطیل‌شکل است که توسط ماتاهی (۱۹۶۷) توسعه یافته است.^[۲] بردلی (۱۹۷۸) در مطالعات آزمایشگاهی خود با در نظر گرفتن عدد فرود جریان و تنگ‌شدگی ناشی از تکیه‌گاه‌های پل، رابطه‌یی برای محاسبه‌ی فرآب ارائه کرده است، که به عنوان روش USBPR^۲ نیز شناخته شده است.^[۳] پژوهشگران دیگری نیز با مطالعات آزمایشگاهی، روش‌های مختلفی برای

احداث پل در مسیر رودخانه، تکیه‌گاه‌ها و پایه‌های پل باعث کاهش عرض طبیعی جریان و ایجاد تنگ‌شدگی در مسیر جریان می‌شود. در نتیجه‌ی تنگ‌شدگی ایجاد شده، تراز آب در بالادست افزایش می‌یابد که به آن فرآب می‌گویند.^[۱] اهمیت افزایش تراز ذکر شده هنگامی مشخص می‌شود که لازم باشد مناطق خاص و مهمی در بالادست پل در برابر سیلاب محافظت شوند. بنابراین فرآب، یکی از نگرانی‌های مهم در طراحی و ساخت یک پل است و پیش از احداث پل، باید برآورد مناسبی از آن به دست آید و براساس محاسبات انجام شده، عملیات سامان‌دهی لازم برای بالادست پل تعیین شود. اهمیت اثر فرآب ایجاد شده در بالادست پل در برآورد اقتصادی تراز آب رودخانه نیز مشخص می‌شود. اگر به علت وجود مناطق خاص و معین در اطراف و بالادست رودخانه، نیاز به عملیات سامان‌دهی و همچنین محافظت کناره‌های رودخانه به خصوص به هنگام وقوع سیل باشد، هزینه‌های مورد نیاز مستقیماً به

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۵/۲/۱۳۹۷، اصلاحیه ۲۳/۷/۱۳۹۷، پذیرش ۶/۶/۱۳۹۷.

DOI:10.24200/J30.2018.50827.2349

afsaneh.nobakht@modares.ac.ir
ghods@modares.ac.ir
mehraein@khu.ac.ir

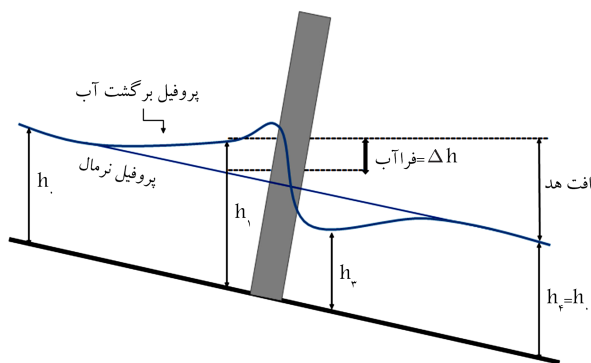
از پایه‌های کج پل در طبیعت را نشان می‌دهد. درخصوص پایه‌ی کج پل، مطالعات معدودی انجام شده است. برخی پژوهشگران (۲۰۰۴ و ۲۰۱۰)،^[۱۵] به بررسی اثر کج‌شدگی پایه‌ی پل دایره‌بی‌شکل در عمق آب‌شستگی پرداختند و بیان کردند با افزایش زاویه‌ی کج‌شدگی پایه به سمت پایین‌دست، عمق آب‌شستگی کاهش می‌یابد. همچنین سلیمی (۱۳۸۸) در بررسی آزمایشگاهی آب‌شستگی اطراف پایه‌ی کج پل در جهت‌های مختلف اظهار داشت که کج‌شدگی پایه به سمت پایین‌دست، موجب کاهش عمق آب‌شستگی و به سمت بالادست موجب افزایش آن می‌شود. همچنین عمق آب‌شستگی در پایه‌ی کج شده در صفحه‌ی عمود بر جریان تقریباً با پایه‌ی قائم یکسان است.^[۱۷] قدسیان و واقفی (۲۰۱۵ و ۲۰۱۶) نیز در یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی روی آب‌شستگی پایه‌ی کج به سمت پایین‌دست و به سمت دیوار جانبی نشان دادند در حالت کج‌شدگی به سمت پایین‌دست با افزایش زاویه‌ی کج‌شدگی، آب‌شستگی کاهش می‌یابد اما در حالت کج‌شدگی جانبی، مقدار آن نسبت به حالت قائم تغییری نمی‌کند.^[۱۸] همچنین کریمی و همکاران (۲۰۱۷)، در بررسی تأثیر زاویه‌ی کج شدن پایه به سمت پایین‌دست در آب‌شستگی نشان دادند که عمق آب‌شستگی و ابعاد حفرةی آب‌شستگی با افزایش زاویه‌ی کج‌شدگی کاهش می‌یابد.^[۲۰]

لذا هدف از انجام مطالعه‌ی حاضر، بررسی آثار زاویه و جهت کج‌شدگی، عدد فرود و نسبت تنگ‌شدگی در تراز سطح آب، و مقدار فرآب است. با توجه به اینکه فرآب ناشی از پایه‌های قائم پل با شکل‌های مختلف، تاکنون توسط برخی از پژوهشگران بررسی و روش‌های مختلفی برای برآورد آن ارائه شده است، لذا در پژوهش حاضر، اثر کج بودن پایه‌ها در تراز آب و میزان فرآب بررسی شده است، که تاکنون به آن پرداخته نشده است. برای کاهش تعداد آزمایش‌ها از روش طراحی آزمایش استفاده شده است. از جمله اهداف طراحی آزمایش می‌توان به کاهش تعداد آزمایش‌ها، کاهش زمان و هزینه و تعیین متغیرهای مهم اشاره کرد.^[۲۱] یکی از روش‌های طراحی آزمایش، روش RSM^۵ است. روش RSM موجب کاهش قابل توجه تعداد آزمایش‌ها می‌شود و امکان مطالعه‌ی تعداد زیاد پارامترها را فراهم می‌سازد.^[۲۲] در روش RSM، یک معادله‌ی ریاضی به منظور تخمین رابطه بین متغیرهای مستقل و پاسخ برآزش و شرایط بهینه‌ی متغیرها برای رسیدن به پاسخ نیز تعیین می‌شود.^[۲۳]

۲. مواد و روش‌ها

۱.۲. آنالیز ابعدادی

شکل ۲، فرآب ناشی از وجود پایه‌ی پل در مسیر جریان را نشان می‌دهد. در ادامه،



شکل ۲. تعریف فرآب برای جریان یک‌نواخت در عمق.

محاسبه‌ی فرآب ناشی از پایه‌های پل ارائه کرده‌اند.^[۴-۶] همچنین هاشمی (۱۳۸۰)، با در نظر گرفتن پارامترهای: عدد فرود، نسبت تنگ‌شدگی، زاویه‌ی جهت جریان با محور پایه‌ی پل و شکل پایه، عوامل مؤثر در فرآب را به صورت آزمایشگاهی بررسی کرده است.^[۷] قدسیان و شفیعی فر (۲۰۰۲) نیز به منظور بررسی اثر شکل پایه‌ی پل در مقدار فرآب، یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی انجام دادند و دریافتند که در شرایط جریان مشابه، پایه‌ی مستطیلی‌شکل، بیشینه‌ی فرآب و پایه‌ی دایره‌بی، کمینه‌ی فرآب را تولید می‌کنند.^[۸] همچنین دانشمند (۱۳۸۲) با در نظر گرفتن پارامترهای: عدد فرود، نسبت تنگ‌شدگی، نسبت طول به عرض پایه و زاویه‌ی جهت جریان با محور پایه‌ی پل به بررسی آزمایشگاهی عوامل مؤثر در فرآب در پایه‌های مستطیلی‌شکل پرداخته است.^[۹] سکین و همکاران (۲۰۰۹) با اطلاعات هیدرولیکی چند سیل در محل پل‌های مختلف روی رودخانه‌ی می‌سی‌سی‌پی و با استفاده از شبکه‌ی عصبی مصنوعی، رابطه‌ی جدیدی برای محاسبه‌ی فرآب ارائه کردند.^[۱۰] لیو و همکاران (۲۰۱۰) نیز برای محاسبه‌ی فرآب پل‌های یک و چنددهانه با در نظر گرفتن پارامترهای: نسبت تنگ‌شدگی، تقارن، زاویه‌ی انحراف و شکل پایه و تکیه‌گاه‌ها از روش لاتیک بولتزمن^۳ استفاده کردند و نشان دادند که روش لاتیک با تقریب مناسبی فرآب را پیش‌بینی می‌کند.^[۱۱]

مهدی‌پور (۱۳۹۱) هم بخشی از رودخانه‌ی کن تهران را با استفاده از نرم‌افزار HEC-RAS شبیه‌سازی کرد و ضمن بررسی تأثیر متغیرهای مختلف هیدرولیکی، از جمله: شیب، ضرایب زبری بستر، شکل پایه‌ها، زاویه‌ی برخورد جریان به پایه، عرض پایه‌ها، فاصله‌ی دهانه‌ها، عرض عرشه و فاصله‌ی بین دو پل بر فرآب نتیجه گرفت در غالب موارد، پل پایین‌دست در حالت منفرد و موازی به صورت یکسان عمل کرده و تأثیر حالت موازی در پل بالادست بیشتر بوده است.^[۱۲] آتابای و همکاران (۲۰۱۳) نیز از شبکه‌ی عصبی مصنوعی^۴ برای پیش‌بینی فرآب براساس پارامترهای ضریب اصطکاک کانال اصلی و سیلاب‌دشت، عرض پل و دبی جریان استفاده کردند و اظهار داشتند که مقدار فرآب پیش‌بینی‌شده توسط مدل ANN بسیار دقیق هستند.^[۱۳] همچنین ایشان (۲۰۱۵) در مطالعه‌ی دیگری با استفاده از یکی از مدل‌های نرم‌افزار HEC-RAS، تأثیر پارامترهای: ضریب زبری مانینگ کانال اصلی و سیلاب‌دشت، بازشدگی پل، ضریب انبساط و انقباض و دبی جریان را در فرآب بررسی کردند.^[۱۴]

از مواردی که تاکنون کمتر مورد توجه پژوهشگران قرار داشته است، بحث قرار گرفتن پایه به صورت کج در برابر جریان آب است. در برخی موارد در طبیعت، شمع‌ها و یا پایه‌های پل را برای افزایش مقاومت در برابر بارهای جانبی یا در موقعیت‌های مکانی و یا معماری خاص از نظر سازه‌ی به صورت کج احداث می‌کنند. شکل ۱، نمونه‌هایی



الف) کشور تایوان؛



ب) استان اصفهان.

شکل ۱. پل‌های ساخته شده با پایه‌های کج.^[۲۴]

مشاهده می‌شود. در روش ترکیب مرکزی، تعداد آزمایش‌های لازم (n) از معادله‌ی ۳ به دست می‌آید:

$$n = Z(2^k + 2k + c) \quad (3)$$

که در آن، k تعداد عوامل ورودی عددی، z تعداد سطوح عوامل ورودی اسمی^۱ و c تعداد آزمایش‌های نقاط مرکزی است.

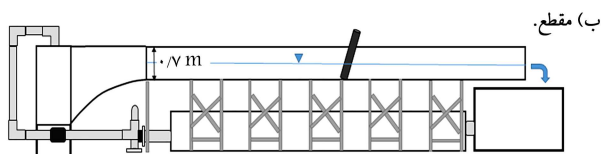
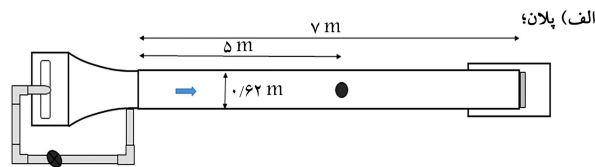
در پژوهش حاضر، عوامل عددی مؤثر ورودی عبارت‌اند از: عدد فرود جریان ورودی، نسبت تنگ‌شدگی و زاویه‌ی کج‌شدگی جریان ($k = 3$). همچنین در مطالعه‌ی حاضر، جهت کج‌شدگی پایه به سمت: بالادست، پایین دست و دیواره‌ی جانبی بررسی شده است؛ بنابراین، یک عامل اسمی نیز در ۳ سطح وجود دارد ($Z = 3$). با توجه به عوامل مذکور و در نظر گرفتن نقاط مرکزی با ۴ تکرار ($c = 4$)، تعداد آزمایش‌ها طبق معادله‌ی ۳ برابر با ۵۴ آزمایش است. بنابراین روش طراحی آزمایش به روش RSM، تعداد آزمایش‌ها را از ۳۷۵ آزمایش، به ۵۴ آزمایش کاهش داد. جدول ۱، عوامل عددی و اسمی مورد بررسی را نشان می‌دهد. اطلاعات بیشتر در خصوص روش مورد استفاده‌ی نرم‌افزار جهت طراحی آزمایش در مرجع^[۲۱] ارائه شده است.

۳.۲. تجهیزات آزمایشگاهی و روش انجام آزمایش

آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس در یک کانال با مقطع مستطیلی شکل به طول ۷ m، ارتفاع ۰٫۷ m، عرض ۰٫۶۲ m و با شیب طولی ۰٫۰۰۱ انجام شده‌اند. شکل ۴، نمای کلی از کانال مورد استفاده را نشان می‌دهد که مجهز به یک مخزن ورودی است و جریان توسط پمپ به داخل فلوم هدایت می‌شود.

جدول ۱. عوامل اسمی و عددی مورد بررسی در طراحی آزمایش.

عوامل اسمی جهت کج‌شدگی	سطح ۱ بالادست			سطح ۲ پایین دست		سطح ۳ دیواره	
	$(-\alpha)$	(-1)	0	0	$(+1)$	$(+\alpha)$	عوامل عددی
σ	۰٫۱	۰٫۲	۰٫۳	۰٫۴	۰٫۵		
θ	۰	۶	۱۲	۱۸	۲۴		
Fr_0	۰٫۲	۰٫۲۷۵	۰٫۳۵	۰٫۴۲۵	۰٫۵		



شکل ۴. نمای کلی از کانال آزمایشگاهی و نحوه‌ی قرار گرفتن پایه‌ها.

با توجه به مطالعات صورت گرفته در زمینه‌ی فرآب،^[۲۱-۲۳] پارامترهای معرفی شده، به عنوان پارامترهای مؤثر در فرآب در نظر گرفته شده‌اند. B عرض کانال، h_0 عمق نرمال جریان قبل از احداث پایه‌ی پل، Q دبی جریان، D قطر پایه، g شتاب ثقل، θ زاویه و جهت کج شدن پایه (به سمت: بالادست، پایین دست و دیواره‌ی کانال). در همه‌ی مطالعات صورت گرفته در زمینه‌ی فرآب، تمامی پارامترهای اخیر به جز زاویه و جهت کج‌شدگی پایه، به عنوان پارامترهای مؤثر در نظر گرفته شده‌اند. بنابراین Δh (میزان فرآب) از رابطه‌ی ۱ محاسبه می‌شود:

$$\Delta h = f(h_0, B, Q, g, D, \theta, Direction) \quad (1)$$

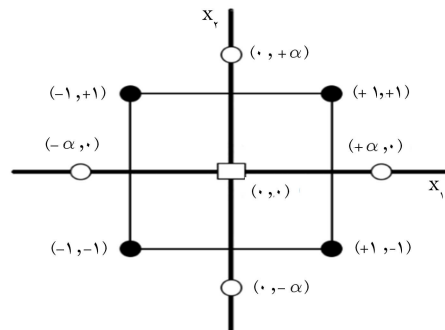
با انتخاب پارامترهای (B, g, h_0) به عنوان پارامترهای تکراری و با استفاده از تئوری باکینگهام، مقدار نسبت فرآب $\Delta h/h_0$ از رابطه‌ی ۲ به دست می‌آید:

$$\frac{\Delta h}{h_0} = f(Fr_0, \sigma, \theta, Direction) \quad (2)$$

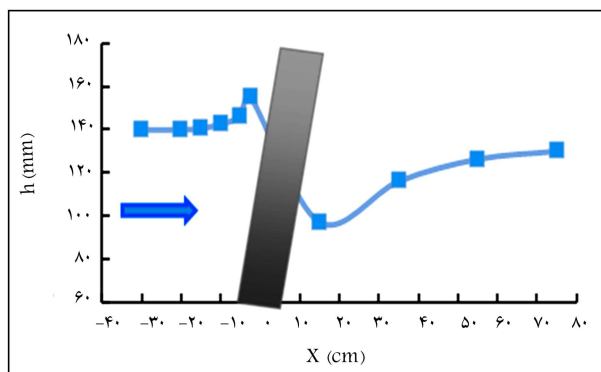
که در آن، Fr_0 عدد فرود جریان با عمق نرمال برابر با $\frac{Q}{Bh_0\sqrt{gh_0}}$ و σ نسبت تنگ‌شدگی برابر با $\frac{D}{B}$ است.

۲.۲. طراحی آزمایش‌ها

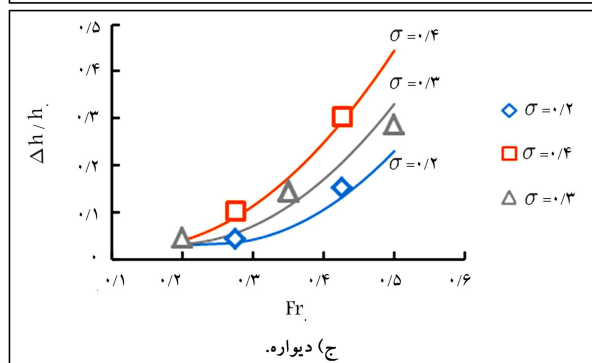
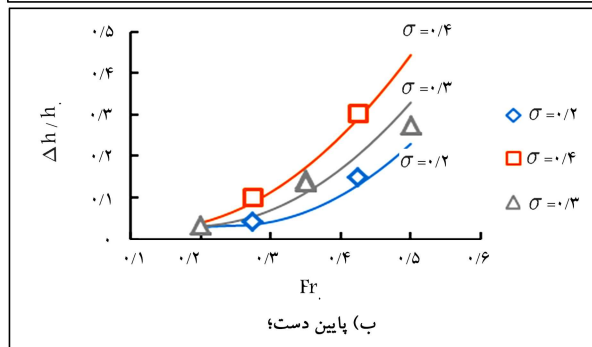
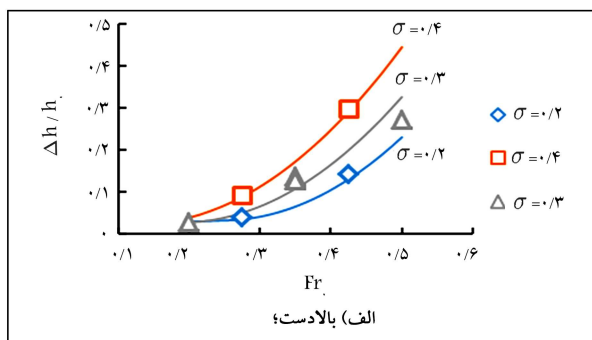
روش طراحی آزمایش‌ها، یکی از روش‌های آماری مفیدی است که به وسیله‌ی آن می‌توان متغیرهای کلیدی که در پارامتر مورد بررسی اثر می‌گذارد، را شناسایی کرد. با استفاده از روش طراحی آزمایش می‌توان عوامل ورودی قابل کنترل را تغییر داد و اثر آن‌ها را در پارامترهای خروجی ارزیابی کرد.^[۲۱] با در نظر گرفتن پارامترهای عدد فرود، نسبت تنگ‌شدگی و زاویه‌ی پایه‌ی پل در ۵ سطح و در ۳ جهت مختلف کج‌شدگی، به روش فاکتوریل کامل^۶ باید ۳۷۵ آزمایش انجام می‌شد که لازمه‌ی آن صرف وقت و هزینه نسبتاً زیادی است، به همین دلیل به منظور کاهش تعداد آزمایش‌ها از نرم‌افزار طراحی آزمایش^[۲۵] برای طراحی آزمایش‌ها استفاده شده است. طراحی آزمایش در بیشتر شاخه‌های علوم به ویژه مهندسی صنایع، مهندسی مواد، مهندسی مکانیک،^[۲۶، ۲۷] محیط زیست،^[۲۸] و در مهندسی آب توسط برخی پژوهشگران^[۲۹، ۳۰] استفاده شده است. در مطالعه‌ی حاضر، طراحی آزمایش به شیوه‌ی رویه‌ی پاسخ^۷ (RSM) و به روش ترکیب مرکزی (CCD)^۸ انجام شده است. در طراحی آزمایش به شیوه‌ی ترکیب مرکزی، ۵ سطح $(+\alpha, -1, 0, +1, -\alpha)$ به ازاء هر عامل عددی^۹ تعریف می‌شود. این شیوه‌ی طراحی، ۳ گروه از نقاط طراحی با عنوان: نقاط عاملی دوسطحی، نقاط محوری و نقاط مرکزی دارد که در شکل ۳



شکل ۳. نقاط طراحی در روش طراحی ترکیب مرکزی به ازاء دو متغیر ورودی (X_2, X_1) (□) نقاط مرکزی، ● نقاط عاملی دوسطحی و ○ نقاط محوری).



شکل ۵. پروفیل طولی جریان ($Fr_0 = 0.425, \sigma = 0.2, \theta = 18^\circ$).



شکل ۶. تغییرات نسبت فرآب بر حسب عدد فرود، پایه به سمت‌های مختلف.

که در نمودارهای شکل ۶ مشاهده می‌شود و پژوهشگران پیشین نیز بیان کرده‌اند، عدد فرود، پارامتر مهم و اثرگذاری در نسبت فرآب است. نکته‌ی قابل توجه این است که در نسبت تنگ‌شدگی‌های بیشتر، مقدار نسبت فرآب نسبت به تغییر عدد فرود حساس‌تر است و هر چه نسبت تنگ‌شدگی افزایش یابد، شیب منحنی‌ها نیز افزایش می‌یابد؛ یعنی افزایش عدد فرود به یک میزان، در نسبت تنگ‌شدگی‌های

جدول ۲. مشخصات جریان و پایه‌ی پل در مدل آزمایشگاهی.

۹-۱۸/۱۴	h_0 (cm)
۱۰-۵۰	Q (L/s)
۰-۲۴	θ ($^\circ$)
۰/۲-۰/۵	Fr_0
۶/۴-۳/۱	D (cm)
۰/۱-۰/۵	σ

دبی جریان ورودی از طریق دبی‌سنج قرار گرفته روی پمپ مشخص می‌شود. در انتهای کانال، به منظور تنظیم ارتفاع سطح آب، دریچه‌ی پروانه‌ی وجود دارد که عمق آب داخل کانال توسط آن تنظیم می‌شود.

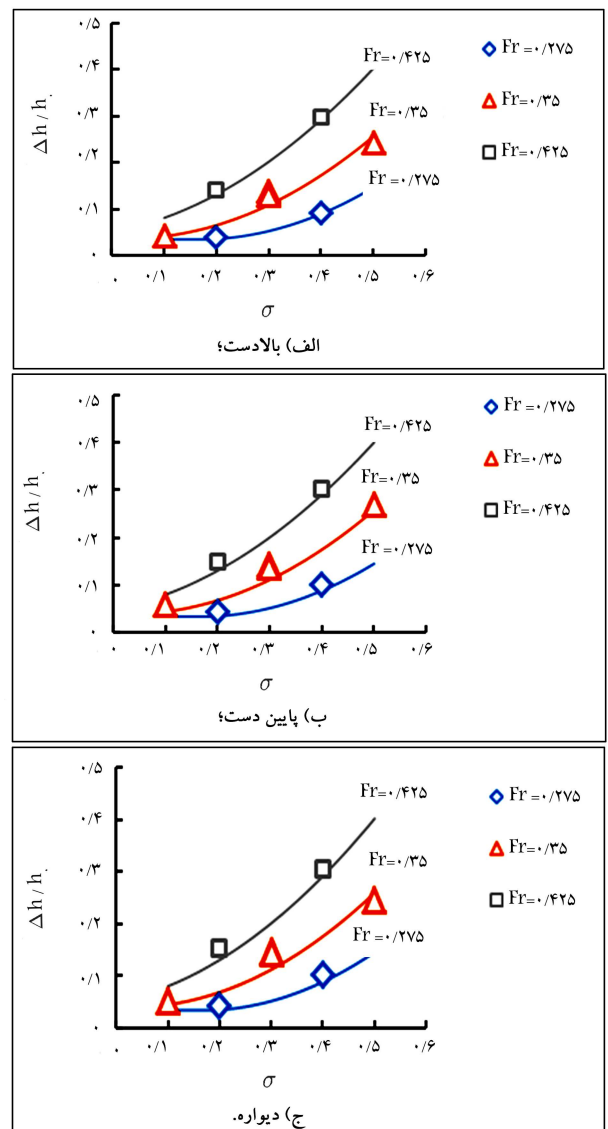
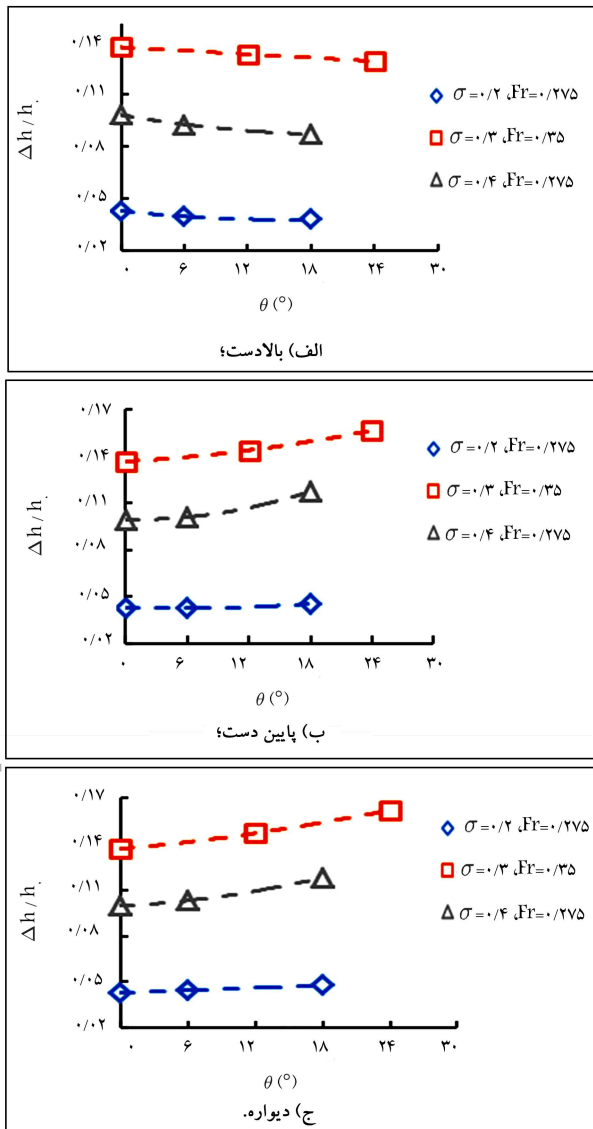
برای مدل‌سازی پایه‌های پل استوانه‌ی از لوله‌ی PVC استفاده شده است. آزمایش‌های مذکور با جریان زیر بحرانی که معمولاً در طبیعت مشاهده می‌شود، انجام گرفته است. محدوده‌ی پارامترهای مورد نظر به گونه‌ی انتخاب شده که با مطالعات پیشین و همچنین با موارد موجود در طبیعت مطابقت داشته باشد. همچنین محدودیت‌های تجهیزات آزمایشگاهی در انتخاب محدوده‌های مذکور مؤثر بوده و آزمایش‌ها در بستر صلب انجام شده است. مشخصات جریان و مدل پایه در هر سه جهت کج‌شدگی، با توجه به محدودیت‌های موجود در آزمایشگاه انتخاب و در جدول ۲ ارائه شده است. برای انجام آزمایش‌ها، ابتدا پایه با قطر و زاویه‌ی مورد نظر تقریباً در $\frac{1}{3}$ انتهای کانال قرار داده شده و برای جلوگیری از حرکت پایه و تغییر زاویه‌ی آن در اثر برخورد جریان، پایه از بالا مهار شده است. همچنین برای جلوگیری از ورود جریان آب به داخل، پایه با چسب به کف کانال چسبانده شده است. سپس آب به داخل کانال جریان یافته و با تنظیم دبی و عمق در هر مورد، آزمایش شروع شده است. برای داشتن عدد فرود مورد نظر، با رهاکردن یک دبی مشخص در کانال و سپس تنظیم عمق جریان لازم به وسیله‌ی دریچه‌ی انتهای کانال، عدد فرود مورد نظر در مدل ایجاد شده است. در انتها پس از یکنواخت شدن جریان با استفاده از عمق‌سنج دیجیتالی با دقت صدم میلی‌متر که روی ریل‌های فوقانی کانال قرار داشت، فرآب اندازه‌گیری شده است.

۳. تجزیه و تحلیل نتایج

شکل ۵، پروفیل طولی جریان را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با نزدیک شدن به پایه، عمق جریان افزایش می‌یابد و بیشینه‌ی عمق بلافاصله قبل از پایه ایجاد می‌شود. در پایین دست پایه نیز سطح آب دچار افت شده و عمق جریان کاهش یافته و سپس با دور شدن از پایه، جریان دوباره به عمق اولیه بازگشته است.

۱.۳. اثر عدد فرود در فرآب

شکل ۶، تغییرات نسبت فرآب بر حسب عدد فرود برای نسبت تنگ‌شدگی‌های مختلف در ۳ حالت کج‌شدگی پایه را نشان می‌دهد. روند تغییرات نسبت فرآب با تغییرات عدد فرود به این صورت است که در هر زاویه و هر جهت و در هر تنگ‌شدگی، با افزایش عدد فرود جریان (Fr_0)، مقدار نسبت فرآب افزایش می‌یابد؛ هر چند که نحوه‌ی تغییرات ذکر شده، در تنگ‌شدگی‌های متفاوت یکسان نیست. عدد فرود از طریق افزایش سرعت جریان افزایش می‌یابد و به دلیل اینکه افزایش سرعت جریان باعث افزایش افت انرژی می‌شود، جریان برای جبران افت ایجاد شده، افزایش عمق بیشتری می‌یابد؛ به همین دلیل با افزایش عدد فرود، فرآب افزایش می‌یابد. همان‌طور



شکل ۸. تغییرات نسبت فرآب بر حسب زاویه‌ی کج‌شدگی به سمت‌های مختلف.

شکل ۷. تغییرات نسبت فرآب بر حسب نسبت تنگ‌شدگی، پایه به سمت‌های مختلف.

تغییر نسبت تنگ‌شدگی حساس‌تر است و با افزایش عدد فرود، شیب منحنی‌ها نیز افزایش می‌یابد. علاوه بر این، در مقادیر نسبت تنگ‌شدگی کوچک‌تر، تغییرات پارامتر اخیر، تأثیر کمتری در فرآب می‌گذارد و در حالت ثابت بودن پارامترهای دیگر، شیب منحنی‌ها در نسبت تنگ‌شدگی‌های بزرگ‌تر از حدود 0.3 ، تندتر است. بنابراین، نسبت فرآب، از پارامتر نسبت تنگ‌شدگی، اثرپذیرتر است. روشن است که به ازاء مقادیر ضریب تنگ‌شدگی کوچک‌تر از حدود 0.3 ، فاصله‌ی منحنی‌ها کاهش می‌یابد که نشان می‌دهد در ضرایب تنگ‌شدگی کوچک‌تر از حدود 0.3 ، تغییرات نسبت تنگ‌شدگی و عدد فرود اثر کمتری در افزایش نسبت فرآب دارد.

۳.۳. اثر زاویه و جهت کج‌شدگی پایه در فرآب

شکل ۸، تغییرات نسبت فرآب بر حسب زاویه‌ی کج‌شدگی در نسبت تنگ‌شدگی‌های مختلف و در سه جهت کج‌شدگی را نشان می‌دهد. شکل ۸ الف، نشان می‌دهد که در نسبت تنگ‌شدگی و عدد فرود ثابت، با افزایش زاویه‌ی کج‌شدگی پایه به سمت بالادست کانال، نسبت فرآب کاهش یافته است. همچنین مشاهده می‌شود که شیب

بیشتر، باعث ایجاد فرآب بیشتری می‌شود. همچنین با توجه به نمودارهای مذکور، مشخص است که در مقادیر عدد فرود کوچک‌تر از حدود 0.3 ، تغییرات عدد فرود، تأثیر کمتری در مقدار فرآب دارد. این موضوع در نسبت تنگ‌شدگی‌های کوچک‌تر، مشهودتر است.

۲.۳. اثر نسبت تنگ‌شدگی در فرآب

شکل ۷، تغییرات نسبت فرآب بر حسب نسبت تنگ‌شدگی برای اعداد فرود مختلف و در سه حالت کج‌شدگی پایه را نشان می‌دهد. روند تغییرات نسبت فرآب با تغییرات نسبت تنگ‌شدگی به این صورت است که در هر جهت و در هر عدد فرود ثابت، با افزایش نسبت تنگ‌شدگی به دلیل افزایش سطح مقطع مقابل جریان، مقدار نسبت فرآب افزایش می‌یابد؛ اما شدت افزایش ایجاد شده در اعداد فرود بزرگ‌تر، بیشتر است. همان‌طور که پژوهشگران پیشین نیز بیان کرده‌اند و نتایج حاضر نیز نشان می‌دهند، نسبت تنگ‌شدگی، پارامتری مهم و اثرگذار در نسبت فرآب است. نکته‌ی قابل توجه این است که در اعداد فرود بیشتر، مقدار نسبت فرآب به

حالت دیگر است. با تغییر زاویه از صفر تا ۲۴ درجه، مقدار نسبت فرآب در حالت کج‌شدگی به سمت دیواره‌ی کانال و پایین‌دست به ترتیب ۲۰٪ و ۱۵٪ افزایش یافته است، در حالی که در همان شرایط با کج شدن پایه به سمت بالادست، مقدار نسبت فرآب ۵٪ کاهش یافته است.

۴.۳. آنالیز واریانس نتایج

با وارد کردن اطلاعات مربوط به هر آزمایش در نرم‌افزار Design Expert، مدل برازش داده شده انتخاب و مدل درجه دو به عنوان مدل پیشنهادی ارائه شده است. مدل برازش به صورت ترکیبی از ضریب تأثیر عوامل ورودی (β_i) و عوامل ورودی (x_i) در مقدار پاسخ (y) طبق معادله‌ی ۴ تعریف می‌شود:^[۲۱]

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \dots \quad (4)$$

سطح پاسخ می‌تواند یک سطح صاف مانند معادله‌ی ۴ و یا یک سطح انحنادار باشد. زمانی که هیچ اثری از انحنا در پاسخ وجود ندارد، یک مدل خطی شامل آثار اصلی و تداخلی برای تشریح سطح پاسخ کفایت می‌کند. اگر پاسخ، مقداری غیرخطی باشد (انحنا زیاد باشد)، توابع چندجمله‌یی مرتبه‌ی بالاتر به صورت معادله‌ی ۵ برای داده‌های آزمایشی مطرح می‌شود:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (5)$$

که در آن، $\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$ به ترتیب ضرایب ثابت، خطی، درجه دوم و اثر متقابل رگرسیون هستند. به منظور تأیید آثار عوامل ورودی (عدد فرود، نسبت تنگ‌شدگی، زاویه و جهت کج‌شدگی پایه) در مدل برازش شده از تحلیل واریانس استفاده می‌شود. تحلیل واریانس، پرکاربردترین نوع تحلیل برای بررسی اثر متغیرهای ورودی در پاسخ فرآیند است. اطلاعات آماری و آنالیز واریانس مدل استفاده شده در طراحی آزمایش در جدول‌های ۳ و ۴ ارائه شده است. مقدار سطح اطمینان در پژوهش حاضر برابر ۹۵٪ انتخاب شده است. این بدان معناست که p -value (سطح اطمینان-۱) کوچک‌تر از ۰٫۰۵، نشان‌دهنده‌ی معنی‌دار بودن مدل است. F-value^{۱۱} در مدل برابر با ۲۱۹ است که نشان‌دهنده‌ی معنادار بودن مدل مورد استفاده است. در واقع،

جدول ۳. اطلاعات آماری مدل.

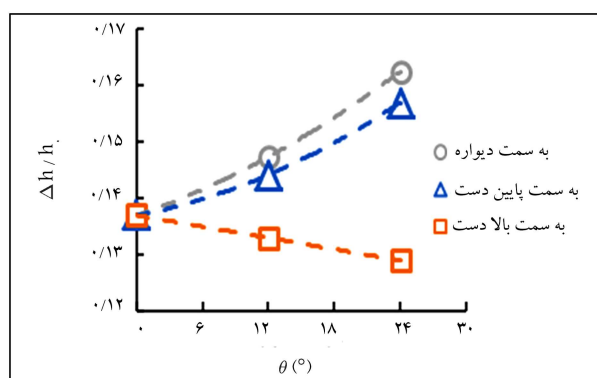
۰٫۹۶۶	R-Squared
۰٫۹۶۷	Adj R-Squared
۰٫۹۶۲	Pred R-Squared
۵۰٫۷	Adeq Precision

جدول ۴. آنالیز واریانس.

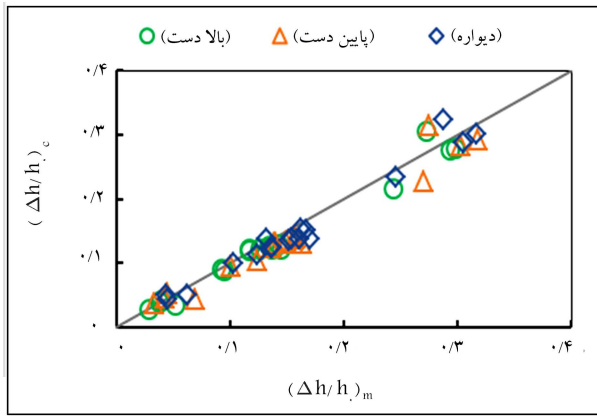
P-value	F value	Source
< ۰٫۰۰۰۱	۲۱۹٫۵۸	Model
< ۰٫۰۰۰۱	۱۴۷۲٫۳۹	Fr
< ۰٫۰۰۰۱	۸۲۳٫۲۸	σ
۰٫۱۱۶۴	۲٫۵۷	θ
۰٫۰۰۰۲	۱۰٫۲۲	Direction
< ۰٫۰۰۰۱	۸۱٫۷۱	$\sigma.Fr$
۰٫۰۵۰	۲٫۹۲	$\theta.Direction$

کاهش منحنی با نسبت تنگ‌شدگی ۰٫۲، کمتر از دو نسبت تنگ‌شدگی دیگر است. با وجود اینکه با کج شدن پایه، سطح مقطع مقابل جریان نسبت به پایه‌ی قائم افزایش می‌یابد، اما نسبت فرآب در این حالت کاهش یافته است. شکل ۸، تغییرات نسبت فرآب را بر حسب زاویه‌ی کج‌شدگی به سمت پایین‌دست برای نسبت تنگ‌شدگی و عدد فرود ثابت نشان می‌دهد. با افزایش زاویه‌ی کج‌شدگی پایه به سمت پایین‌دست کانال و در جهت جریان، نسبت فرآب افزایش می‌یابد. در این حالت از کج‌شدگی تا زاویه‌ی ۹ درجه، تغییرات نسبت فرآب ناچیز است و می‌توان گفت تا زاویه‌ی ۹ درجه، نسبت فرآب تقریباً ثابت بوده و بعد از آن افزایش یافته است. همچنین مشاهده می‌شود شیب افزایشی منحنی با نسبت تنگ‌شدگی ۰٫۲، کمتر از دو نسبت تنگ‌شدگی دیگر است. در این حالت با افزایش زاویه‌ی کج‌شدگی، سطح مقطعی که در مقابل جریان قرار دارد، افزایش یافته است؛ بنابراین یکی از دلایل افزایش نسبت فرآب را می‌توان به افزایش سطح مقطع پایه در مقابل جریان نسبت داد.

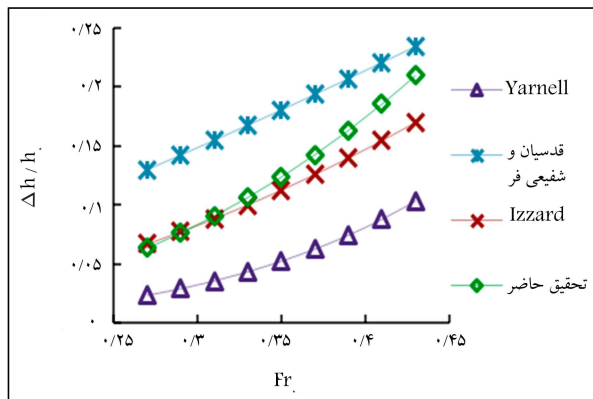
بررسی الگوی جریان اطراف پایه‌های کج به سمت بالادست و پایین‌دست نشان می‌دهد گردابه‌یی که در پشت پایه با کج‌شدگی به سمت پایین‌دست تشکیل می‌شود، نسبت به حالت کج‌شدگی به سمت بالادست بزرگ‌تر است. از آنجا که گردابه، یک محیط چرخشی است و در انتقال سیال در جهت پایین‌دست مشارکت ندارد،^[۲۱] مانند مانعی اضافی بر پایه در برابر جریان است و به همین دلیل می‌توان گفت فرآب تشکیل شده در حالت کج‌شدگی به سمت پایین‌دست نسبت به کج‌شدگی به سمت بالادست بیشتر است. شکل ۸، تغییرات نسبت فرآب را بر حسب زاویه‌ی کج‌شدگی به سمت دیواره‌ی کانال در نسبت تنگ‌شدگی و عدد فرود ثابت نشان می‌دهد. در این حالت نیز با افزایش زاویه‌ی کج‌شدگی پایه به سمت دیواره‌ی کانال، به علت افزایش سطح مقطعی که در مقابل جریان قرار دارد، نسبت فرآب افزایش یافته است. تا زاویه‌ی حدود ۶ درجه، تغییرات نسبت فرآب ناچیز بوده و بعد از آن افزایش یافته است. همچنین مشاهده می‌شود شیب افزایشی منحنی با نسبت تنگ‌شدگی ۰٫۲، کمتر از دو نسبت تنگ‌شدگی دیگر است. شکل ۹، نحوه‌ی تغییرات نسبت فرآب را بر حسب زاویه‌ی کج‌شدگی در سه حالت مختلف کج‌شدگی پایه با نسبت تنگ‌شدگی و عدد فرود ثابت نشان می‌دهد ($Fr_0 = 0.35$ و $\sigma = 0.3$). تغییرات نسبت فرآب با زاویه‌ی کج‌شدگی، در حالت کج‌شدگی پایه به سمت پایین‌دست و کج‌شدگی به سمت دیواره‌ی کانال، تقریباً مشابه است و با افزایش زاویه‌ی کج‌شدگی پایه، نسبت فرآب افزایش می‌یابد؛ اما در حالت کج‌شدگی به سمت دیواره، تأثیر زاویه‌ی کج‌شدگی بیشتر است. در حالت کج‌شدگی پایه به سمت بالادست با افزایش زاویه‌ی کج‌شدگی پایه، نسبت فرآب کاهش می‌یابد. اثر زاویه‌ی کج‌شدگی پایه در این حالت کمتر از دو



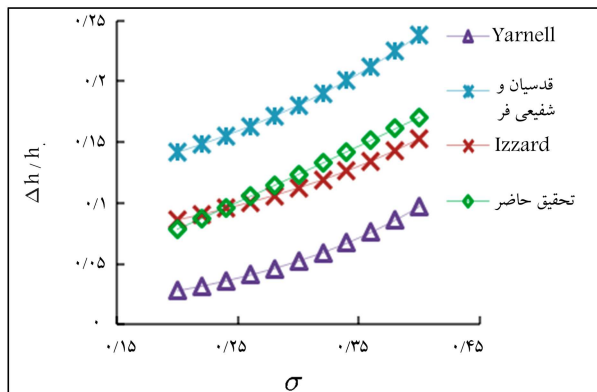
شکل ۹. تغییرات نسبت فرآب بر حسب زاویه‌ی کج‌شدگی و جهت کج‌شدگی ($\sigma = 0.3, Fr_0 = 0.35$).



شکل ۱۰. مقادیر پیش‌بینی شده در برابر مقادیر اندازه‌گیری شدهی فرآب.



شکل ۱۱. مقایسه‌ی معادله‌ی ۶ با روابط دیگر (تغییرات فرآب بر حسب عدد فرود $(\sigma = 0.3)$).



شکل ۱۲. مقایسه‌ی معادله‌ی ۶ با روابط دیگر (تغییرات فرآب بر حسب نسبت تنگ‌شدگی $(Fr = 0.35)$).

می‌شود، معادله‌ی ۶ نسبت به رابطه‌ی قدسیان و شفیعی فر (۲۰۰۲)، فرآب را کمتر و نسبت به رابطه‌ی یارنل (۱۹۳۴) فرآب را بیشتر برآورد کرده است. در میان روابط موجود، رابطه‌ی ارائه شده در مطالعه‌ی حاضر، بیشترین مطابقت را با رابطه‌ی ایزارد (۱۹۵۸) دارد.

در شکل ۱۳، فرآب به دست آمده از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی در مطالعه‌ی حاضر $((\Delta h/h)_m)$ ، با مقادیر به دست آمده از معادله‌ی ارائه شده توسط سایر پژوهشگران $((\Delta h/h)_c)$ مقایسه شده است. به دلیل اینکه سایر پژوهشگران اثر

با احتساب مقدار بزرگ F-value ذکر شده، احتمال اینکه نتایج حاصل از مدل، تحت تأثیر خطاهای آزمایش قرار داشته باشند، فقط حدود ۰/۰۱٪ است. جدول آنالیز واریانس نشان می‌دهد که در مدل پیشنهادی برای محاسبه‌ی فرآب، مهم‌ترین پارامتر، عدد فرود و پس از آن، نسبت تنگ‌شدگی است و تأثیر زاویه و جهت کج شدن پایه، نسبت به دو پارامتر عدد فرود و نسبت تنگ‌شدگی خیلی کمتر است. به منظور استفاده از مدل در گستره‌ی آزمایش، مقدار ضریب تعیین R^2 (در طراحی آزمایش به شیوه‌ی ترکیب مرکزی باید بزرگ‌تر از ۰/۶ باشد. [۲۲]) مقدار R^2 در مدل استفاده شده، ۰/۹۶۶ است که شرط ذکر شده را ارضا می‌کند.

همچنین تطابق مقدار ضریب تعیین تعدیل شده $(Adjusted R^2)$ و ضریب تعیین پیش‌بینی $(Predicted R^2)$ از دیگر شرط‌های لازم مدل است. به این منظور، اختلاف دو مقدار اخیر باید کمتر از ۰/۲ باشد. اختلاف مقادیر $Adjusted R^2$ و $Predicted R^2$ در مدل مورد استفاده برابر ۰/۰۲ است که نشان دهنده‌ی تطابق آن‌هاست. مقدار نسبت سیگنال به نویز $(Adeq Precision)$ نیز ضریب اختلاف مدل را اندازه‌گیری می‌کند و مقدار آن در مدل، به منظور دستیابی به نتایج مناسب، باید بزرگ‌تر از ۴ باشد که کمینه‌ی مقدار آن در مدل مورد استفاده، ۵۰/۷ است. [۲۵] با توجه به نتایج و همچنین با استفاده از پیشنهاد نرم‌افزار Design Expert، عدد فرود، نسبت تنگ‌شدگی و زاویه و جهت کج‌شدگی پایه به عنوان پارامترهای مؤثر در نسبت فرآب انتخاب شدند. نرم‌افزار مذکور، روابط درجه ۲ را برای محاسبه‌ی نسبت فرآب برای پایه با کج‌شدگی به سمت بالادست (رابطه‌ی ۶)، پایه با کج‌شدگی به سمت پایین دست (رابطه‌ی ۷)، و پایه با کج‌شدگی به سمت دیواره‌ی کانال (رابطه‌ی ۸) ارائه کرده است.

$$\frac{\Delta h}{h_0} = 0.458 - 2.24Fr_0 - 1.33\sigma + 3.56Fr_0 \cdot \sigma + 3.08Fr_0^2 + 1.044\sigma^2 - 0.3\theta - 0.27\theta^2 \quad (6)$$

$$\frac{\Delta h}{h_0} = 0.46 - 2.24Fr_0 - 1.33\sigma + 3.56Fr_0 \cdot \sigma + 3.08Fr_0^2 + 1.044\sigma^2 - 0.46\theta - 0.23\theta^2 \quad (7)$$

$$\frac{\Delta h}{h_0} = 0.46 - 2.24Fr_0 - 1.33\sigma + 3.56Fr_0 \cdot \sigma + 3.08Fr_0^2 + 1.044\sigma^2 + 0.61\theta + 0.24\theta^2 \quad (8)$$

خطای میانگین سه معادله‌ی ۶ الی ۸، به ترتیب ۱۰/۲٪، ۱۱/۲۳٪ و ۱۲/۵٪ بوده است. بنابراین با داشتن عمق اولیه‌ی جریان، عدد فرود اولیه‌ی جریان، نسبت تنگ‌شدگی، زاویه (رادبان) و جهت کج‌شدگی پایه می‌توان نسبت فرآبی که متناسب با آن‌ها ایجاد می‌شود، را پیش‌بینی کرد. در حالت پایه‌ی قائم (زاویه‌ی صفر درجه)، (θ) از معادلات حذف می‌شود. در شکل ۱۰، مقادیر پیش‌بینی شده توسط نرم‌افزار طراحی آزمایش $((\Delta h/h)_c)$ همراه با مقادیر اندازه‌گیری شده $((\Delta h/h)_m)$ مقایسه شده است که پراکندگی کم نقاط اشاره شده، نشان‌دهنده‌ی نزدیک بودن مقادیر مذکور است.

۵.۳. مقایسه با روابط پژوهشگران دیگر

در بخش حاضر، به مقایسه‌ی نتایج برخی از روابط ارائه شده توسط پژوهشگران پیشین با استفاده از معادله‌ی ۶، (با قرار دادن $\theta = 0^\circ$) پرداخته شده است. با توجه به اینکه در گذشته فقط پایه‌ی قائم بررسی شده است، لذا مقایسه فقط برای پایه‌ی قائم انجام شده است (جدول ۵). همان‌طور که در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ مشاهده

جدول ۵. روابط ارائه شده توسط برخی پژوهشگران.

یارنل (۱۹۳۴) [۲]	$\Delta h = h_c Fr_o^2 (1 + 5Fr_o^2 - 0.6)(\sigma + 15\sigma^2)$
ایزارد (۱۹۸۵) [۳]	$\frac{\Delta h}{h_c} = 0.45 \left(\frac{Fr_o}{\sigma}\right)^2$
ویکتور (۱۹۷۳) [۵]	$\Delta h = \frac{V_o^2}{g} \left(\frac{B^2}{\sigma^2(B-b)^2} - 1 \right)$
قدسیان و شفیع‌فر (۲۰۰۲) [۸]	$\frac{\Delta h}{h_c} = 0.375 Fr_o^{1.265} \sigma^{-1.812}$

زاویه‌ی کج‌شدگی پایه را در نظر نگرفته‌اند، فقط از آزمایش‌هایی که با زاویه‌ی صفر درجه (پایه قائم) انجام شده‌اند، برای مقایسه استفاده شده است. با توجه به شکل ۱۳ مشاهده می‌شود که رابطه‌ی قدسیان و شفیع‌فر (۲۰۰۲)، فرآب را بیشتر و رابطه‌های هاشمی (۱۳۷۸) و یارنل (۱۹۳۴)، فرآب را کمتر از مقادیر به‌دست آمده در مطالعه‌ی حاضر برآورد کرده‌اند. این اختلاف‌ها می‌تواند ناشی از تفاوت شرایط آزمایشگاهی و محدوده‌های در نظر گرفته شده برای پارامترهای مؤثر باشد. برای مثال، یارنل (۱۹۳۴) مقدار نسبت تنگ‌شدگی را بین ۰/۵-۰/۱۲ و عدد فرود را بین ۰/۴۶۵-۰/۳۷ در نظر گرفته است. [۲] همچنین قدسیان و شفیع‌فر (۲۰۰۲)، مقدار تنگ‌شدگی را بین ۰/۱۶-۰/۶۲ و عدد فرود را به ترتیب بین ۰/۶۱-۰/۲۵ و ۰/۶۳-۰/۱ در نظر گرفته‌اند. [۸]

همچنین شکل ۱۳، نزدیکی نتایج پژوهش حاضر به نتایج برخی پژوهشگران را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه نتایج حاصل از آزمایش‌ها، مطابقت نسبتاً خوبی با نتایج برخی پژوهشگران دارد، به نظر می‌رسد با کاهش تعداد آزمایش‌ها با روش استفاده شده در پژوهش حاضر، می‌توان نتایج مناسبی به‌دست آورد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت طراحی آزمایش به روش RSM و کاهش تعداد آزمایش‌ها، نتایج خوبی ارائه داده است.

۴. نتیجه‌گیری

- با افزایش عدد فرود اولیه‌ی جریان، مقدار نسبت فرآب افزایش می‌یابد. اما در مقادیر عدد فرود کوچک‌تر از حدود ۰/۳، تغییرات عدد فرود تأثیر کمتری در مقدار فرآب دارد.
- با افزایش نسبت تنگ‌شدگی، مقدار نسبت فرآب افزایش می‌یابد. اما در مقادیر کوچک‌تر نسبت تنگ‌شدگی، تغییرات نسبت فرآب، تأثیر کمتری در فرآب می‌گذارد و در مقادیر ضریب تنگ‌شدگی بزرگ‌تر از حدود ۰/۳، نسبت فرآب از پارامتر نسبت تنگ‌شدگی، اثر پذیرتر است.
- نسبت فرآب با افزایش زاویه‌ی کج‌شدگی پایه به سمت پایین دست و دیواره‌ی کانال افزایش می‌یابد. اما در حالت کج‌شدگی به سمت دیواره افزایش ایجاد شده بیشتر است.
- با افزایش زاویه‌ی کج‌شدگی پایه به سمت بالادست، فرآب کاهش می‌یابد. تأثیر زاویه‌ی کج‌شدگی به سمت بالادست نسبت به دو حالت دیگر (پایین دست و دیواره) کمتر است.
- مهم‌ترین پارامترها در محاسبه‌ی نسبت فرآب، عدد فرود و نسبت تنگ‌شدگی هستند و تأثیر زاویه و جهت کج‌شدگی پایه در مقدار نسبت فرآب، کمتر از عدد فرود و نسبت تنگ‌شدگی است.

فهرست علائم

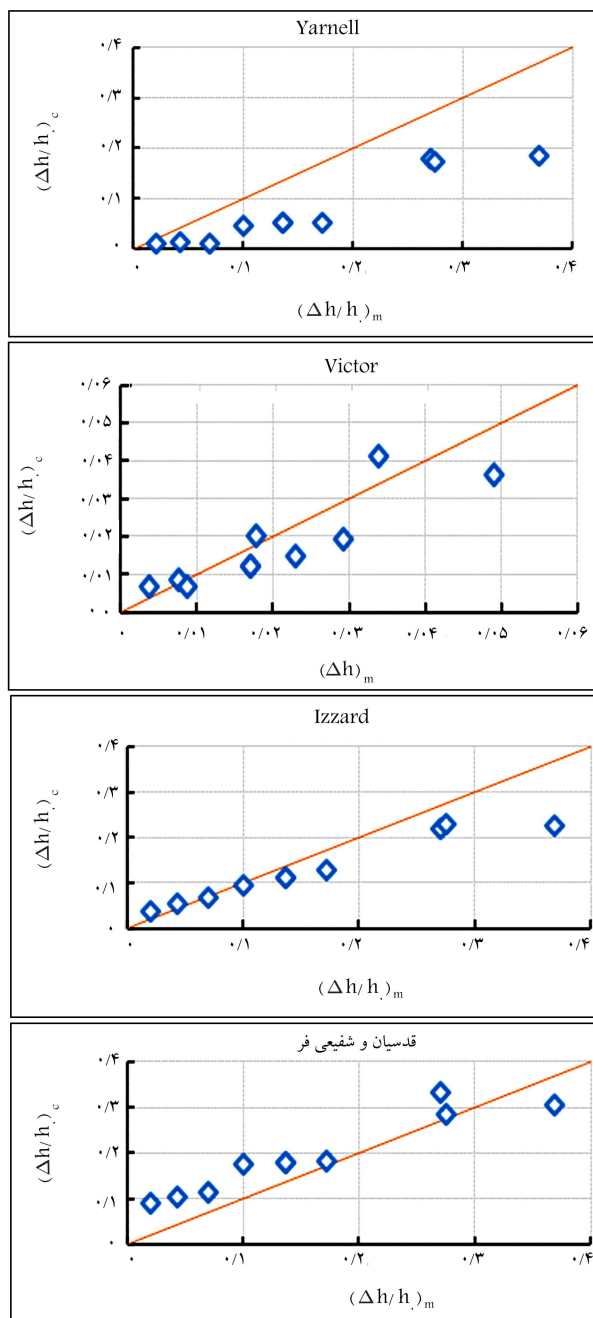
عرض کانال: B ؛

قطر پایه: D ؛

عدد فرود جریان با عمق نرمال: Fr_o ؛

شتاب ثقل: g ؛

عمق جریان: h ؛



شکل ۱۳. مقایسه‌ی مقادیر اندازه‌گیری شده در پژوهش حاضر با مقدار محاسباتی سایر پژوهشگران.

فرآب: $\Delta h = h_1 - h_0$;
 زاویه کج شدن پایه ی پل: θ ;
 نسبت تنگ شدگی کانال: σ ;
 محاسبه شده: c ;
 اندازه گیری شده: m).

عمق نرمال جریان: h_0 ;
 عمق جریان بالادست محل تنگ شدگی: h_1 ;
 عمق جریان پایین دست محل تنگ شدگی: h_2 ;
 دبی جریان: Q ;
 نسبت فرآب: $\Delta h/h_0$.

پانوشت ها

1. US geological survey (USGS)
2. US bureau of public roads (USBPR)
3. lattice boltzmann method
4. artificial neural network (ANN)
5. response surface methodology (RSM)
6. full-factorial
7. response surface methodology (RSM)
8. central composition design (CCD)
9. numeric factors
10. categoric factors

۱۱. آزمونی برای مقایسه ی واریانس مدل با واریانس باقیمانده (خطا)

۱۲. مقیاسی برای اندازه گیری مقدار تغییرات در اطراف میانگین مدل

۱۳. مقیاسی برای اندازه گیری مقدار تغییرات در اطراف میانگین مدل که برای تعداد ترم ها در مدل تصحیح شده است.

۱۴. مقیاسی برای اندازه گیری مقدار تغییرات در داده های جدید تولید شده توسط مدل

۱۵. یک نسبت سیگنال به نویز است که محدوده ی مقادیر پیش بینی شده در نقاط طراحی به میانگین خطای پیش بینی را مقایسه می کند.

منابع (References)

1. Hamill, L. "Bridge hydraulics", CRC Press (1998).
2. Yarnell, D.L. "Bridge piers as channel obstructions", US Dept. of Agriculture, 52 p. (1934).
3. Bradley, J.N. "Hydraulics of bridge waterways", US Federal Highway Administration (1978).
4. Izzard, C.F. "Discussions of Backwater effects of open channel constrictions", by Tracy, H.J. and Carter, R.W., *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, **120**, pp. 1008-1013 (1955).
5. Victor, D.J. "Essentials of bridge engineering", Oxford & IBH Publishing Company (1980).
6. Ranga Raju, K.G., Rana, O.P.S., Asawa, G.L. and et al. "Rational assessment of blockage effect in channel flow past smooth circular cylinders", *Journal of Hydraulic Research*, **21**(4), pp. 289-302 (1983).
7. Hashemi, J. "Investigation of afflux at bridge piers", Master's Thesis, Tarbiat Modares University (1999).
8. Ghodsian, M. and Shafieefar, M. "Effect of shape of bridge pier on afflux", *Advances in Hydraulics and Water Engineering*, **I & II**, pp. 131-134 (2002)
9. Daneshmand, P. "The effect of the length of rectangular piers of bridge on afflux", Master's Thesis, Tarbiat Modares University (2003).
10. Seckin, G., Akoz, M.S., Cobaner, M. and et al. "Application of ANN techniques for estimating backwater through bridge constrictions in Mississippi River basin", *Advances in Engineering Software*, **40**(10), pp. 1039-1046 (2009).
11. Liu, H., Li, M., Zhou, J.G. and et al. "Bridge afflux predictions using the lattice Boltzmann method", *Procedia Environmental Sciences*, **2**, pp. 1881-1893 (2010).
12. Mahdipur.H. "Hydraulic design of bridges with numerical methods", Master's Thesis, Khajeh Nasir Toosi University (2011).
13. Atabay, S., Abdalla, J.A., Erduran, K.S. and et al. "Prediction of backwater level of bridge constriction using an artificial neural network", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water, Management*, **166**(10), Thomas Telford Ltd. (2013).
14. Atabay, S., Ali, T.A. and Mortula, M.M. "A Parametric Study on the Backwater Level Due to a Bridge Constriction", World Academy of Science, Engineering and Technology, *International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering*, **9**(3), pp. 316-319 (2015).
15. Bozkus, Z. and Yildiz, O. "Effects of inclination of bridge piers on scouring depth", *Journal of Hydraulic Engineering*, **130**(8), pp. 827-832 (2004).
16. Bozkus.Z. and Cesme, M. "Reduction of scouring depth by using inclined piers", *Canadian Journal of Civil Engineering*, **37**,**12**, pp. 1621-1630, (2010).
17. Salimi, S. "Effects of inclination of circular bridge piers on scouring depth", Master's Thesis, Tarbiat Modares University (2008).
18. Vaghefi, M., Ghodsian, M. and Salimi, S. "Scour formation due to laterally inclined circular pier", *Arabian Journal for Science and Engineering*, **41**(4), pp. 1311-1318 (2016).
19. Vaghefi, M., Ghodsian, M. and Salimi, S. "The effect of circular bridge piers with different inclination angles toward downstream on scour", *Sadhana*, **41**(1), pp. 75-86 (2016).
20. Karimi, N., Heidarnejad, M. and Masjedi, A. "Scour depth at inclined bridge piers along a straight path: a laboratory study", *Engineering Science and Technology, An International Journal*, **20**(4), pp. 1302-1307 (2017).
21. Montgomery, D.C. "Design and analysis of experiments: Response Surface Method and Designs", John Wiley & Sons (2005).

22. Saldana-Robles, A., Guerra-Sanchez, R., Maldonado-Rubio, M.I. and et al. "Optimization of the operating parameters using RSM for the Fenton oxidation process and adsorption on vegetal carbon of MO solutions", *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, **20**(3), pp. 848-857 (2014).
23. Khataee, A.R., Kasiri, M.B. and Alidokht, L. "Application of response surface methodology in the optimization of photocatalytic removal of environmental pollutants using nanocatalysts", *Environmental Technology*, **32**(15), pp. 1669-1684 (2011).
24. Melville, B.W. and Coleman, S.E. "Bridge Scour, Water Resources Publications", Colorado, USA (2000).
25. Design Expert 7.00 software, Help section.
26. Chen, S., Wang, D. and Sun, S. "Bionic fan optimization based on Taguchi method", *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, **5**(3), pp. 302-314 (2011).
27. Ghanbari, H.R. and Shariati, M. "Experimental analysis of spot welded parameters on tensile behavior of ferritemartensite dual phase steel with Taguchi statistical method", *The Modares Scientific Research Quarterly Journal of Mechanical Engineering*, **17**(6), pp. 342-350 (2017).
28. Radaei, E., Alavi Moghaddam, M.R. and Arami, M. "Optimization of Reactive Blue 19 adsorption from aqueous solution by pomegranate residual-based activated carbon using Taguchi method", *The Modares Scientific Research Quarterly Journal of Civil Engineering*, **14**(1), pp. 159-167 (2014).
29. Rostamabadi, M., Salehi Neyshabouri, A.A. and Zarrati, A.R. "Optimization of geometric parameters of submerged vane in straight alluvial channel with taguchi method and GRA", *The Modares Scientific Research Quarterly Journal of Civil Engineering*, **13**(2), pp. 79-93 (2013).
30. Sangsefidi, Y., Mehraein, M., Ghodsian, M. and et al. "Evaluation and analysis of flow over arced weirs using traditional and response surface methodologies", *Journal of Hydraulic Engineering*, **143**(11), 143(11), pp. (2017).
31. Ahmed, F. and Rajaratnam, N. "Flow around bridge piers", *Journal of Hydraulic Engineering*, **124**(3), pp. 288-300 (1998).
32. Shirani Bidabadi, B. "Numerical and experimental study of transforming the hole in cold roll forming process of Pre-notch section", Master's Thesis, Tarbiat Modares University (2013).