

مطالعه آزمایشگاهی جریان دوگانه غیرماندگار در کانال مستطیلی

عاطفه پرورش‌ریزی¹، صلاح کوچکزاده^{2*}، محمدحسین امید³

1- دانشجوی دکتری گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه تهران

2- دانشیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه تهران

3- استادیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه تهران

* کرج، صندوق پستی 4111، کدپستی 31587-11167

چکیده- در مجاری روباز سازه‌های مسیر جریان، تغییر شرایط مرزی و یا تغییر شیب و سطح مقطع در طول کانال، موجب بروزحالت‌های مختلفی از جریان غیرماندگار می‌شوند. یکی از این شرایط، وقوع جریان دوگانه است که در آن، هر دو رژیم زیربحرانی و فوق‌بحرانی وجود دارد. مثال بارز این نوع جریان، پرش هیدرولیکی متحرک است. تحلیل عددی این جریان از پیچیدگی‌های خاصی برخوردار است و از نظر آزمایشگاهی نیز، داده‌های انتشاریافته چندانی در باره آن وجود ندارد. از این‌رو مطالعه آزمایشگاهی و تعیین ویژگی‌های هیدرولیکی آن مدنظر قرار گرفت. آزمایشها در فلوم مستطیلی انجام شد که در بالادست، به دریچه‌ای کشویی محدود بود. هیدروگراف دبی با رژیم فوق‌بحرانی از زیر دریچه خارج می‌شد و به این ترتیب جهش هیدرولیکی متحرک شکل می‌گرفت که پروفیل آن در هر لحظه ثبت می‌شد. بر مبنای برداشتها، پارامترهای جریان دوگانه در زمانهای مختلف به دست آمد و روند تغییرات آنها با در نظر گرفتن غیرماندگاری جریان تحلیل شد. نتایج، تغییر پارامترها را نسبت به تغییرات دبی یا انرژی و هم‌بندطور وضعیت فشار در مقطع زیربحرانی جریان دوگانه را، مستقل از زمان و تابع روابط معینی نشان می‌دهد. بنابراین با معلوم بودن تغییرات شرط مرزی بالادست، می‌توان روابط مناسبی را برای پیش‌بینی وضعیت جریان دوگانه و تدوین الگوریتم بهره‌برداری ارائه داد.

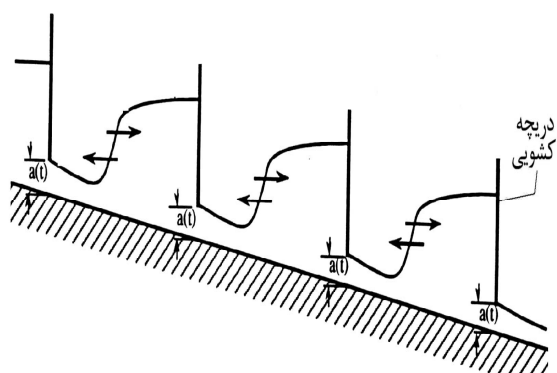
کلید واژگان: جریان دوگانه، جریان غیرماندگار، شرایط مرزی، پرش هیدرولیکی متحرک.

1- مقدمه

عددی مد نظر باشد، جایگاه خود را حفظ کرده‌اند. برای هدایت جریان غیرماندگار در شبکه‌های روباز، الگوریتم‌های عددی مختلفی ارائه شده‌اند. به سبب پیچیدگی جریان و شرایط مختلف هیدرولیکی که در هر قسمت کانال حاکم است، این الگوریتم‌ها باید توانایی پوشش دادن کلیه شرایط محتمل را داشته باشند. بنابراین وجود اطلاعات کافی از رفتار جریان در حالت‌های مختلف و ثبت آنها در اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی، به تدوین و ارزیابی مدل مناسب عددی، کمک می‌کند. یکی از مواردی که ممکن است در حین وقوع جریان

برای بررسی رفتار جریان روباز یک بعدی، پیش‌بینی شرایط جریان و فراهم آوردن اطلاعات لازم برای بهره‌برداری از سازه‌های هیدرولیکی، از مدل‌های فیزیکی، شبیه‌سازی عددی یا هر دو استفاده می‌شود. با وجود اینکه مدل‌های عددی در بسیاری از مسائل از نظر دقت و دامنه کاربرد، مثبت ارزیابی می‌شوند، اما مدل‌های فیزیکی و اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی برای مطالعه مواردی که در مدل عددی مجال پرداختن به آنها نیست، و یا ارائه راه‌حلهای ساده‌تر و کاربرد، و صحت‌سنجی مدل‌های

وجود دارند که وارد عمل شدن آنها، گاهی به تشکیل شوک یا پرش هیدرولیکی می‌انجامد. به عنوان مثال اگر کانالی با شیب تند که سازه‌های مختلف هیدرولیکی در آن قرار دارند در نظر گرفته شود، هر سازه در بالادست خود تحت اثر برگشت آب قرار دارد که موجب بوجود آمدن جریان زیر بحرانی می‌شود؛ در حالی که در پایین‌دست آن جریان فوق بحرانی وجود دارد و برای رسیدن به بالادست سازه بعدی، ناگزیر باید پرش هیدرولیکی به وقوع بپیوندد (شکل 1). چنانچه دبی ورودی به ابتدای کانال تغییر کند در موقعیت پرش هیدرولیکی تغییر به وجود می‌آید همینطور اگر سازه‌های هیدرولیکی دریاچه‌هایی کشویی باشند که بازشدگی آنها تابع زمان باشد، پرش هیدرولیکی تشکیل شده، متحرک خواهد بود. در این صورت چنانچه بتوان اندازه‌گیری سطح آب را با سرعت انجام داده و به مرکز تصمیم‌گیری شبکه انتقال داد، می‌توان بر اساس الگوریتم تنظیم، میزان مناسب بازشدگی دریاچه‌ها را تعیین کرد.



شکل 1 عملکرد دریاچه‌های کشویی متوالی با بازشدگی متغیر با زمان

معادلات حاکم بر جریانی با ناپیوستگی هیدرولیکی و همینطور جریان دوگانه، همان معادلات حاکم بر جریان در کانالهای روباز و در شکل یک بعدی به معادلات سنت

غیرماندگار رخ دهد، جریان دوگانه¹ است. وقوع همزمان جریانهای زیر بحرانی و فوق بحرانی در بازه محاسباتی، جریان دوگانه را به وجود می‌آورد که معادل جریان ترانسونیک² در دینامیک گازها (Meselhe et al., 1997; kim and Han, 2000). جریانهای دوگانه علاوه بر اینکه از دیدگاه عددی، مسائل خاصی را به همراه دارند، مطالعه آزمایشگاهی آنها نیز امکانات ویژه‌ای را می‌طلبد.

جهت متفاوت انتشار امواج در دو رژیم زیربحرانی و فوق بحرانی، بارزترین ویژگی مدلسازی جریان دوگانه است. حل عددی مناسب برای جریان دوگانه، باید توانایی کنار آمدن با ناپیوستگی موجود را داشته باشد، تغییر جهت انتشار داده‌های جریان را در نظر بگیرد و شرایط مرزی متناسب با هر یک را فراهم آورد. تعدادی شماهای تفاضل محدود برای مدلسازی شوک وجود دارند که در آیرودینامیک برای حل سیستم معادلات قوانین بقا به کار می‌روند. به دلیل تشابه معادلات آب کم‌عمق با معادلات قابل تراکم ناویر-استوکس، تلاش‌هایی برای استفاده از این روشها در حل معادلات سنت و نانت و کار با ناپیوستگی‌ها انجام شده است:

(Martin and Zovne, 1997; Fennema and Chaudhry, 1986, 1990; Garcia-Navaro and Saviron, 1992; Meselhe et al., 1997; Jin and Fread, 1997; Tseng, 1999; Yost and Rao, 2001; Tseng et al., 2001).

جالب است که الگوی عددی پرایسمن - که روشی استاندارد برای جریانهای روباز یک بعدی است - برای جریانهای دوگانه اعتبار ندارد؛ گرچه برای جریانهای صرفاً زیربحرانی یا فوق‌بحرانی کارایی بالایی دارد (Meselhe, and Holly, 1997).

مثالهای زیادی از وجود جریان دوگانه در مجاری روباز وجود دارد. در شبکه‌های آبیاری، سازه‌های هیدرولیکی متنوعی مانند سرریزها، دریاچه‌های کنترل و کالورتها

1. Transcritical Flow
2. Transonic

برای این حالت اندیشیده شود (Jin and Fread, 1997; Zhang and Summer, 1999). همچنین مجموعه‌های آزمایشگاهی که داده‌های آنها منتشر شده یا برای آزمون مدل‌های عددی در این زمینه استفاده شده اند، کمیاب بوده (Gharangik and Chaudhry, 1991; Zhang and Summer, 1999; Tseng, 1999) و محدودیتهایی در شرایط مرزی، شکل مقطع و شیب دارند. بنابراین با توجه به دشواری‌های ثابت داده در جریانهای غیرماندگار، انجام مطالعاتی آزمایشگاهی که بتواند برخی از محدودیت‌های مطالعات قبلی را از میان بردارد و به درک بهتر این پدیده منجر شود، ضروری به نظر می‌رسد. همچنین تحلیل داده‌های آزمایشگاهی می‌تواند به نتایجی منجر شود که لزوماً در مدل‌های عددی دست‌یافتنی نیستند؛ یا راه حل‌های ساده‌تری را برای تدوین برنامه بهره‌برداری به دست دهد.

2- مجموعه آزمایشگاهی

فلوم مورد استفاده در آزمایشگاه، فلوم مستطیلی با طول 9 متر، عرض 25 سانتی‌متر و عمق 50 سانتی‌متر و شیب طولی کانال قابل تنظیم است. دیوارهای فلوم از شیشه ساخته شده و کف آن فلزی است. به منظور ایجاد پرش هیدرولیکی و کنترل دبی ورودی فلوم، دریچه ای کشویی در فاصله 0/7 متر از ابتدای فلوم نصب شده که مقدار بازشدگی آن قابل تنظیم است. در انتهای فلوم، دریچه‌ای کرکره‌ای² وجود دارد که برای کنترل پایین‌دست به کار می‌رود. جریان ورودی کانال از مخزن هوایی با هد ثابت تامین می‌شود. دبی ورودی پس از جریان یافتن در فلوم و خروج از آن، به سمت سرریز مستطیلی هدایت می‌شود که واسنجی آن از طریق دبی‌سنج حجمی انجام شده است؛ سپس به وسیله پمپ به مخزن هوایی هدایت می‌شود. این چرخه در طول انجام آزمایش‌ها برقرار است.

و نانت معروف است. شکل کامل غیرخطی پایستار¹ این معادلات که مستقیماً از شکل انتگرالی استخراج می‌شوند برای کانال افقی، منشوری و بی‌اصطکاک، به صورت زیر بیان می‌شود (Cunge et al., 1980):

$$\frac{\partial U}{\partial t} + A' \frac{\partial U}{\partial x} = 0.0 \quad (1)$$

در این معادله $U = \begin{bmatrix} A \\ Q \end{bmatrix}$ و $A' = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ c^2 - V^2 & 2V \end{bmatrix}$ ماتریس ژاکوبی با مقادیر ویژه، $\lambda_1 = V + c$ و $\lambda_2 = V - c$ است. A ، مساحت مقطع خیس شده، $Q(x,t)$ ، دبی، V ، سرعت در سطح مقطع و $c = \sqrt{g \frac{A}{B}}$ ، سرعت موج و B ، عرض سطح مقطع در سطح آب است. اساساً چنانچه در جریان متغیرهای حالت دچار ناپیوستگی باشند، نمی‌توان از شکل دیفرانسیلی معادلات استفاده کرد (Meselhe and Holly, 1997). این در حالی است که شکل انتگرالی در حالت وجود یا عدم وجود ناپیوستگی در میدان جریان، قابل استفاده است.

عدد فرود به صورت $F = V / \sqrt{gA/B}$ تعریف می‌شود و جریانهایی با عدد فرود کمتر از واحد، زیر بحرانی، مساوی با واحد، بحرانی، و بیشتر از واحد، فوق بحرانی هستند. بنابراین مقادیر بردارهای ویژه در جریان زیربحرانی با علامت مخالف و در جریان فوق بحرانی هم علامت هستند.

علاوه بر وقوع جریان دوگانه در شبکه‌های روباز، در مجاری طبیعی نیز، تغییرات شیب و زبری بستر و یا وقوع حالت‌های سیلابی، منجر به تغییر رژیم جریان می‌شود. از این رو پرداختن به جزئیات هیدرولیکی جریان دوگانه و شرایطی که در شکل‌گیری، پروفیل سطح آب و محل وقوع نقاط بحرانی دخالت دارند، ضروری و کاربردی است. مشکلات عددی مانع از این شده که در بسیاری از مدل‌های تجاری روندیابی جریان، تدبیری مناسب و کارآمد

2. Tail Gate With Rotating Flaps

1. Conservation Form

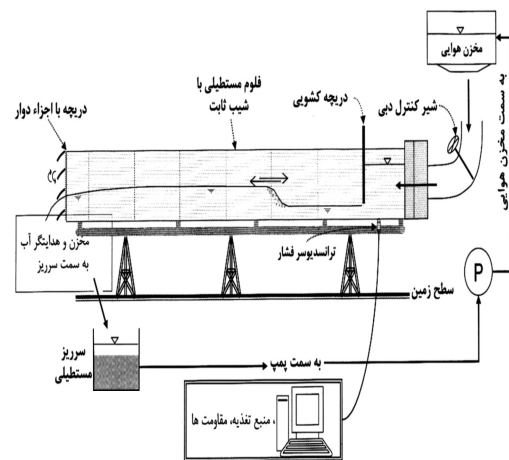
تعیین شد.

3- روش انجام آزمایشها و ثبت داده‌ها

با واسنجی دریچه کشویی که در بالادست فلوم قرار دارد، اندازه‌گیری دبی جریان غیرماندگار - که در هر آزمایش به صورت یک هیدروگراف در مرز بالادست فلوم اعمال شد - انجام شد. واسنجی دریچه با ایجاد جریان ماندگار برای دامنه‌ای از دبی‌ها - که به حداقل و حداکثر دبی ورودی به کانال محدود می‌شد - انجام شد. براین اساس، رابطه خطی دبی با ارتفاع پشت دریچه حاصل شد که با استفاده از آن و با ثبت لحظه‌ای عمق پشت دریچه، هیدروگراف دبی در مرز بالادست جریان به دست آمد.

بازشدگی دریچه به نحوی تنظیم شد که با استفاده از حداقل دبی، پرش هیدرولیکی در نزدیکی دریچه شکل گیرد. این معیار به این دلیل رعایت شد که با زیاد شدن دبی، پرش به سمت پایین دست حرکت می‌کند و باید فضای کافی برای ثبت پروفیل ناشی از حرکت پرش در دبی‌های مختلف وجود داشته باشد. از دریچه پایین دست برای ایجاد عمق پایاب و تنظیم موقعیت پرش استفاده شد. عمق آب در مرز پایین دست نیز توسط ترانسدیوسری با همان کیفیتی که برای بالادست به کار رفت، ثبت شد. برای تنظیم دبی و تولید هیدروگراف در بالادست، از یک شیر کنترل که قبل از ورودی کانال تعبیه شده استفاده شد. با باز و بسته کردن تدریجی شیر کنترل در حین آزمایش، هیدروگراف‌های ورودی متنوعی تولید شد. برای ایجاد هیدروگراف کافی است پمپ روشن شده و پس از ثابت شده هد مخزن هوایی، شیر کنترل بتدریج باز شود. از آنجا که هیدروگراف به صورت بهنگام ثبت می‌شد، پس از رسیدن به دبی حداکثر دلخواه، شیر کنترل با سرعت مناسبی بسته می‌شد و بدین ترتیب شاخه پایین‌رونده هیدروگراف شکل می‌گرفت. به این صورت پروفیل کاملی از رفت و برگشت پرش ثبت شد که در آن دامنه پیوسته‌ای از دبی‌ها ثبت شده است.

برای اندازه‌گیری هد پشت دریچه از حسگر یا ترانسدیوسر فشار با قابلیت ثبت دامنه فشاری (0-400) میلی بار و دقت 0/2% کل مقیاس استفاده شده که می‌تواند هد استاتیک را به پالس‌های الکتریکی تبدیل کند. به کمک کارت Advantech PCL818 که ابزار تبدیل آنالوگ به دیجیتال است، این پالس‌ها توسط نرم‌افزار مربوط ثبت و سپس از طریق واسنجی هر ترانسدیوسر به هد استاتیک تبدیل می‌شوند (شکل 2).



شکل 2 نمایی از تجهیزات مورد استفاده در مجموعه آزمایشگاهی

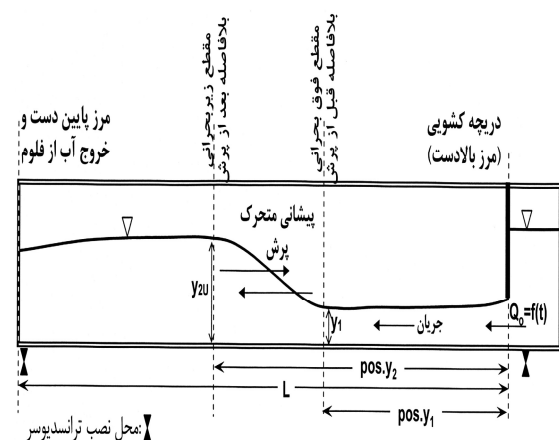
برای حذف اثر اغتشاشات سطح آب بر پالس‌های خروجی، ترانسدیوسر به طور مستقیم به فلوم وصل نشد، بلکه به انتهای لوله‌ای عمودی به قطر 2/5 سانتیمتر متصل شد که بر روی آن یک ورودی و یک خروجی تعبیه شده است. ورودی آن توسط لوله لاستیکی به کف فلوم در نقطه مورد نظر متصل است و خروجی آن به ترانسدیوسر اتصال دارد. بنابراین در هر لحظه رقوم آب در نقطه مورد نظر در فلوم با رقوم آب در داخل لوله یکسان است.

برای ثبت داده‌های جریان غیرماندگار که به عنوان تابعی از زمان در حال تغییر است، از پروفیل سطح آب در جریان دوگانه، فیلمبرداری و مقدار عمق یا رقوم سطح آب در زمان و مکان دلخواه، پس از رقومی کردن تصاویر

است، در نظر گرفته شده است. فرض بر آن است که در بالادست پرش (جریان فوق بحرانی)، دبی در هر لحظه برابر است با دبی جریان ماندگار، Q_0 ، به عبارت دیگر در هر لحظه در جریان فوق بحرانی، از تغییرات $\partial Q/\partial x$ صرف نظر شده است. این فرض تا حد زیادی به واقعیت نزدیک است و علت آن نیز به پروفیل مشاهده شده در این قسمت باز می‌گردد؛ به طوری که در طول جریان قبل از پرش، پروفیلی تقریباً بدون تغییر و با عمق یکسان شکل می‌گرفت.

نامگذاری نمادهایی که در ارائه نتایج به کار رفته با توجه به شکل توصیفی 3، به شرح زیر است:

y ، عمق جریان؛ V ، متوسط سرعت جریان؛ Q_0 ، دبی لحظه‌ای جریان در انتهای بالادست (دبی خروجی از زیر دریچه)؛ $Q=Q(t)$ ، دبی جریان در مقطع مشخص؛ F_r ، عدد فرود در مقطع مورد نظر؛ E ، انرژی واحد وزن کل جریان در مقطع مورد نظر؛ ΔE ، تلفات انرژی در پرش در لحظه مورد نظر؛ F_p ، نیروی فشاری در مقطع مورد نظر و γ ، وزن حجمی آب. برای هر یک از این پارامترها، شاخصهای 1، 2، 3، 4، 5، 6، 7، 8، 9، 10، 11، 12، 13، 14، 15، 16، 17، 18، 19، 20، 21، 22، 23، 24، 25، 26، 27، 28، 29، 30، 31، 32، 33، 34، 35، 36، 37، 38، 39، 40، 41، 42، 43، 44، 45، 46، 47، 48، 49، 50، 51، 52، 53، 54، 55، 56، 57، 58، 59، 60، 61، 62، 63، 64، 65، 66، 67، 68، 69، 70، 71، 72، 73، 74، 75، 76، 77، 78، 79، 80، 81، 82، 83، 84، 85، 86، 87، 88، 89، 90، 91، 92، 93، 94، 95، 96، 97، 98، 99، 100، 101، 102، 103، 104، 105، 106، 107، 108، 109، 110، 111، 112، 113، 114، 115، 116، 117، 118، 119، 120، 121، 122، 123، 124، 125، 126، 127، 128، 129، 130، 131، 132، 133، 134، 135، 136، 137، 138، 139، 140، 141، 142، 143، 144، 145، 146، 147، 148، 149، 150، 151، 152، 153، 154، 155، 156، 157، 158، 159، 160، 161، 162، 163، 164، 165، 166، 167، 168، 169، 170، 171، 172، 173، 174، 175، 176، 177، 178، 179، 180، 181، 182، 183، 184، 185، 186، 187، 188، 189، 190، 191، 192، 193، 194، 195، 196، 197، 198، 199، 200، 201، 202، 203، 204، 205، 206، 207، 208، 209، 210، 211، 212، 213، 214، 215، 216، 217، 218، 219، 220، 221، 222، 223، 224، 225، 226، 227، 228، 229، 230، 231، 232، 233، 234، 235، 236، 237، 238، 239، 240، 241، 242، 243، 244، 245، 246، 247، 248، 249، 250، 251، 252، 253، 254، 255، 256، 257، 258، 259، 260، 261، 262، 263، 264، 265، 266، 267، 268، 269، 270، 271، 272، 273، 274، 275، 276، 277، 278، 279، 280، 281، 282، 283، 284، 285، 286، 287، 288، 289، 290، 291، 292، 293، 294، 295، 296، 297، 298، 299، 300، 301، 302، 303، 304، 305، 306، 307، 308، 309، 310، 311، 312، 313، 314، 315، 316، 317، 318، 319، 320، 321، 322، 323، 324، 325، 326، 327، 328، 329، 330، 331، 332، 333، 334، 335، 336، 337، 338، 339، 340، 341، 342، 343، 344، 345، 346، 347، 348، 349، 350، 351، 352، 353، 354، 355، 356، 357، 358، 359، 360، 361، 362، 363، 364، 365، 366، 367، 368، 369، 370، 371، 372، 373، 374، 375، 376، 377، 378، 379، 380، 381، 382، 383، 384، 385، 386، 387، 388، 389، 390، 391، 392، 393، 394، 395، 396، 397، 398، 399، 400، 401، 402، 403، 404، 405، 406، 407، 408، 409، 410، 411، 412، 413، 414، 415، 416، 417، 418، 419، 420، 421، 422، 423، 424، 425، 426، 427، 428، 429، 430، 431، 432، 433، 434، 435، 436، 437، 438، 439، 440، 441، 442، 443، 444، 445، 446، 447، 448، 449، 450، 451، 452، 453، 454، 455، 456، 457، 458، 459، 460، 461، 462، 463، 464، 465، 466، 467، 468، 469، 470، 471، 472، 473، 474، 475، 476، 477، 478، 479، 480، 481، 482، 483، 484، 485، 486، 487، 488، 489، 490، 491، 492، 493، 494، 495، 496، 497، 498، 499، 500، 501، 502، 503، 504، 505، 506، 507، 508، 509، 510، 511، 512، 513، 514، 515، 516، 517، 518، 519، 520، 521، 522، 523، 524، 525، 526، 527، 528، 529، 530، 531، 532، 533، 534، 535، 536، 537، 538، 539، 540، 541، 542، 543، 544، 545، 546، 547، 548، 549، 550، 551، 552، 553، 554، 555، 556، 557، 558، 559، 560، 561، 562، 563، 564، 565، 566، 567، 568، 569، 570، 571، 572، 573، 574، 575، 576، 577، 578، 579، 580، 581، 582، 583، 584، 585، 586، 587، 588، 589، 590، 591، 592، 593، 594، 595، 596، 597، 598، 599، 600، 601، 602، 603، 604، 605، 606، 607، 608، 609، 610، 611، 612، 613، 614، 615، 616، 617، 618، 619، 620، 621، 622، 623، 624، 625، 626، 627، 628، 629، 630، 631، 632، 633، 634، 635، 636، 637، 638، 639، 640، 641، 642، 643، 644، 645، 646، 647، 648، 649، 650، 651، 652، 653، 654، 655، 656، 657، 658، 659، 660، 661، 662، 663، 664، 665، 666، 667، 668، 669، 670، 671، 672، 673، 674، 675، 676، 677، 678، 679، 680، 681، 682، 683، 684، 685، 686، 687، 688، 689، 690، 691، 692، 693، 694، 695، 696، 697، 698، 699، 700، 701، 702، 703، 704، 705، 706، 707، 708، 709، 710، 711، 712، 713، 714، 715، 716، 717، 718، 719، 720، 721، 722، 723، 724، 725، 726، 727، 728، 729، 730، 731، 732، 733، 734، 735، 736، 737، 738، 739، 740، 741، 742، 743، 744، 745، 746، 747، 748، 749، 750، 751، 752، 753، 754، 755، 756، 757، 758، 759، 760، 761، 762، 763، 764، 765، 766، 767، 768، 769، 770، 771، 772، 773، 774، 775، 776، 777، 778، 779، 780، 781، 782، 783، 784، 785، 786، 787، 788، 789، 790، 791، 792، 793، 794، 795، 796، 797، 798، 799، 800، 801، 802، 803، 804، 805، 806، 807، 808، 809، 810، 811، 812، 813، 814، 815، 816، 817، 818، 819، 820، 821، 822، 823، 824، 825، 826، 827، 828، 829، 830، 831، 832، 833، 834، 835، 836، 837، 838، 839، 840، 841، 842، 843، 844، 845، 846، 847، 848، 849، 850، 851، 852، 853، 854، 855، 856، 857، 858، 859، 860، 861، 862، 863، 864، 865، 866، 867، 868، 869، 870، 871، 872، 873، 874، 875، 876، 877، 878، 879، 880، 881، 882، 883، 884، 885، 886، 887، 888، 889، 890، 891، 892، 893، 894، 895، 896، 897، 898، 899، 900، 901، 902، 903، 904، 905، 906، 907، 908، 909، 910، 911، 912، 913، 914، 915، 916، 917، 918، 919، 920، 921، 922، 923، 924، 925، 926، 927، 928، 929، 930، 931، 932، 933، 934، 935، 936، 937، 938، 939، 940، 941، 942، 943، 944، 945، 946، 947، 948، 949، 950، 951، 952، 953، 954، 955، 956، 957، 958، 959، 960، 961، 962، 963، 964، 965، 966، 967، 968، 969، 970، 971، 972، 973، 974، 975، 976، 977، 978، 979، 980، 981، 982، 983، 984، 985، 986، 987، 988، 989، 990، 991، 992، 993، 994، 995، 996، 997، 998، 999، 1000.



شکل 3 معرفی توصیفی متغیرهای مورد استفاده

برای ثبت رقوم سطح آب در طول فلوم که تحت تأثیر تغییر دبی (یا تغییرات مرز پایین دست) در حال تغییر است، از روش تصویربرداری استفاده شد. در هر مرحله از آزمایش، بسته به هدف برداشت عمق، ممکن است از دوربین ثابت یا متحرک استفاده شود. برای برداشت مشخصات پرش هیدرولیکی متحرک در هر زمان، باید مقادیر عمق در نواحی زیر بحرانی و فوق بحرانی و همینطور طول پرش معلوم باشد. بنابراین از ریلی که به موازات فلوم نصب شده بود، برای هدایت دوربین و ثبت لحظه به لحظه پرش استفاده شد. در هر لحظه مورد نظر، مشخصات جریان مانند عمقهای مزدوج پرش و طول آن، از رقومی کردن تصویر مربوط به دست آمد؛ در حالی که معادل با هر تصویر، مقادیر عمق بالادست و پایین دست که در همان زمان توسط حسگرها ثبت شده، در دست بود.

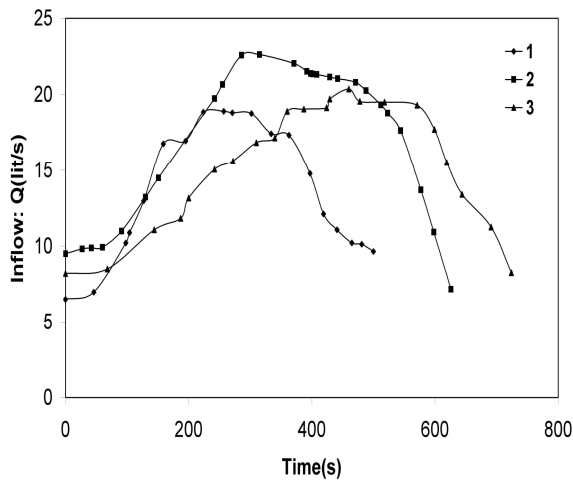
4- تحلیل داده‌ها و نتایج

پس از ثبت کامل پرش متحرک، زمانهایی را برای ثبت داده‌ها و محاسبه پارامترهای لازم انتخاب کردیم که در آنها تغییرات پارامترهای پرش، به نوعی دچار کاهش یا افزایش محسوس می‌شد؛ یا جهت حرکت پرش به سبب تغییر شرایط مرزها عوض می‌شد. سپس برای هر یک از زمانهای انتخاب شده، پارامترهای لازم محاسبه شد تا امکان مقایسه آنها در زمان و مکان مورد نظر میسر باشد. علاوه بر عمق‌های فوق بحرانی و زیر بحرانی که با اندازه‌گیری حاصل شده، با معلوم بودن دبی، عمق مزدوج عمق فوق بحرانی یعنی y_{2s} ، نیز در هر لحظه با استفاده از معادله متداول پرش هیدرولیکی ماندگار یا همان معادله بلانژ¹، محاسبه شد. در قسمتی از تحلیل نتایج، تفاوت عمق y_{2s} با عمق زیر بحرانی اندازه‌گیری شده، y_{2u} ، به عنوان پارامتری که در مشخصات جریان دوگانه تأثیرگذار

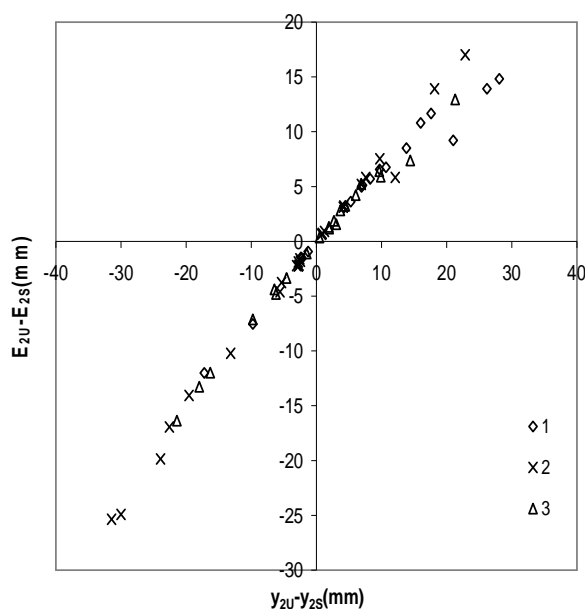
1. Blanger Equation

خطی به‌دست آمده از شکل 5، فرض توزیع فشار هیدروستاتیک و با بسط مقادیر E_{2S} و E_{2U} بترتیب بر حسب $Q = Q_U$ و $Q = Q_0$ ، و با داشتن y_{2U} اندازه‌گیری شده و y_{2S} محاسبه شده، مقدار دبی در مقطع زیربحرانی بعد از پرش، Q_U ، تعدیل می‌شود. معادله برازش شده به شکل (5) چنین است:

$$E_{2U} - E_{2S} = 0.684(y_{2U} - y_{2S}) \quad (5)$$



شکل 4 هیدروگراف دبی سه مجموعه از برداشت‌ها



شکل 5 رابطه بین اختلاف عمقهای زیربحرانی و انرژی مربوط به آنها در حالت ماندگار و غیرماندگار

چنانچه y_{2S} با استفاده از رابطه بلائز محاسبه شود:

$$y_{2S} = \frac{1}{2}y_1 \left(\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1 \right) \quad (2)$$

اگر فرض شود که توزیع فشار هیدروستاتیک در مقاطع 1، 2S و 2U برقرار و همچنین دبی در هر لحظه در طول پرش ثابت است، می‌توان انرژی کل را در این مقاطع (که در نتیجه در بالادست و پایین دست پرش نیز ثابت است) محاسبه کرد:

$$E_{2S} = Z_2 + \frac{Q_0^2}{2gy_{2S}^2} + \frac{P_{2S}}{\gamma} \left[\frac{P_{2S}}{\gamma} = y_{2S}, Z_2 = S_0(L - \text{pos}.y_2) \right] \quad (3)$$

$$E_{2U} = Z_2 + \frac{Q_0^2}{2gy_{2U}^2} + \frac{P_{2U}}{\gamma} \left[\frac{P_{2U}}{\gamma} = y_{2U}, Z_2 = S_0(L - \text{pos}.y_2) \right] \quad (4)$$

که در آنها، Z رقوم کف، S_0 شیب طولی کف (برابر 0/0056)، L طول کل فلوم و pos. علامت اختصاری مربوط به فاصله رخ دادن عمق y از ابتدای فلوم است. در تحقیق حاضر داده‌های مربوط به سه مجموعه از برداشت‌های مجزا تجزیه و تحلیل شده است. هیدروگراف دبی ورودی در مرز بالادست این برداشت‌ها - که با شماره‌های 1، 2 و 3 نامیده شده - در شکل 4 مشاهده می‌شود.

چنانچه با استفاده از روابط موجود و اطلاعات جدول داده‌ها، مقادیر $(E_{2U} - E_{2S})$ در مقابل مقادیر $(y_{2U} - y_{2S})$ رسم شود، مشاهده می‌شود که رابطه‌ای خطی بین آنها وجود دارد (شکل 5).

چنانکه ذکر شد، فرض اینکه دبی در طول رژیم فوق بحرانی با دبی موجود در شرط مرزی بالادست یعنی Q_0 ، برابر است، فرضی نزدیک به واقع است؛ اما دبی در مقطع زیربحرانی بعد از پرش، Q_U ، در هر لحظه مقداری متفاوت با Q_0 دارد. زیرا به دلیل غیرماندگاری جریان و مشخص نبودن سهم جملات معادله مومتم در طول پرش و همینطور تأثیر منحنی برگشت آب پایین‌دست، نمی‌توان از تغییرات دبی در طول صرفنظر کرد. با استفاده از رابطه

$$(y_{2U} - y_{2S}) + \left(\frac{V_{2U}^2 - V_{2S}^2}{2g} \right) = 0.684(y_{2U} - y_{2S}) \quad (6)$$

چنانچه در این معادله، سرعت بر حسب مقادیر دبی و سطح مقطع جایگزین شود، رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$2g \cdot 0.316(y_{2U} - y_{2S}) = \left(\frac{Q_U y_{2S} - Q_0 y_{2U}}{b(y_{2U} \cdot y_{2S})} \right)^2 \quad (7)$$

با حل معادله (7) برای Q_U داریم:

$$Q_U = \sqrt{\frac{2g \cdot 0.316 \cdot b^2 y_{2U}^2 y_{2S}^2 (y_{2U} - y_{2S}) + (Q_0 y_{2U})^2}{y_{2S}^2}} \quad (8)$$

اگر Q_U برای تمامی زمانهای مورد نظر محاسبه شود در هر لحظه نسبت Q_U به Q_0 را می‌توان به دست آورد. اگر مقدار Q_U به دست آمده در این مرحله مجدداً در ترسیم شکلی نظیر شکل (5) به کار رود و با استفاده از ضریب جدید آن، معادله (8) بازنویسی شود، پس از یکی دو تکرار به مقدار واقعی Q_U خواهیم رسید. چنانچه مقادیر $(E_{2U} - E_{2S})$ یا $(y_{2U} - y_{2S})$ در مقابل عدد بی‌بعد Q_U/Q_0 ترسیم شود، بترتیب نمودار شکل‌های 6 و 7 حاصل خواهد شد. این نمودارها رابطه نسبتاً خوبی را برای نسبت دبی واقعی در مقطع زیربحرانی به دبی اولیه به دست می‌دهد.

اکنون با داشتن Q_U ، معادله اندازه حرکت را برای حجم کنترل محصور بین دو مقطع زیربحرانی و فوق‌بحرانی، بلافاصله بعد و قبل از پرش، به کار می‌بریم:

$$\sum F_x = F_{P1} - F_{P2U} + W \sin \alpha - F_F = \rho Q (V_{2U} - V_1) \quad (9)$$

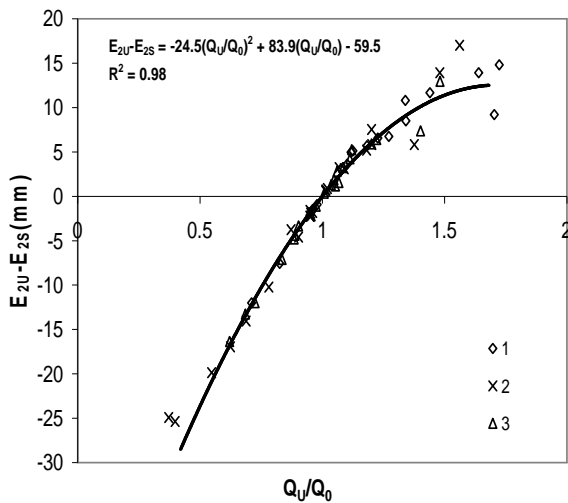
که در آن F_{P1} ، F_{P2U} ، نیروهای فشاری وارد شونده بر مقاطع 1 و 2U؛ $W \sin \alpha$ و F_F ، بترتیب نیروی ثقل و نیروی اصطکاک است. اگر فرض شود نیروی ثقل و اصطکاک بترتیب به دلیل شیب کم کانال و کوتاه بودن بازه پرش ناچیز است، رابطه زیر به دست می‌آید:

$$F_{P1} - F_{P2U} = \rho (Q_U V_{2U} - Q_0 V_1) = \rho \left(\frac{Q_U^2}{b \cdot y_{2U}} - \frac{Q_0^2}{b \cdot y_1} \right) \quad (10)$$

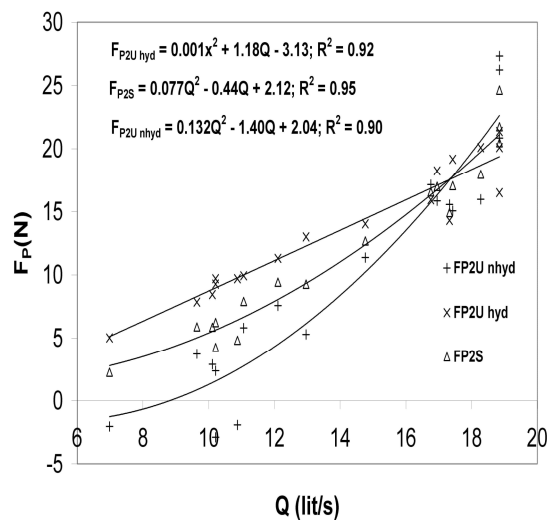
محاسبه انرژی در معادله‌های (3) و (4) با فرض دبی یکسان قبل و بعد از پرش و همینطور فرض هیدروستاتیک بودن فشار در این دو مقطع انجام شده است. این فرضیات در معادله انرژی، به طور صریح در جملات ارتفاع سرعت و ارتفاع فشار تاثیرگذار هستند؛ بنابراین در معادله (4) که مربوط به مقدار انرژی در مقطع زیر بحرانی غیرماندگار است، این فرضیات ساده کننده، بر جمله ارتفاع معادل سرعت (متناسب با y_{2U}^{-2}) و جمله ارتفاع معادل فشار (متناسب با y_{2U}^{+2}) اعمال می‌شوند. واضح است که در مقطع 2U، در هر لحظه دبی با دبی Q_0 متفاوت است. همچنین گمان می‌رود که توزیع فشار در این مقطع به دلیل وجود تلاطم و آثار مرز پایین دست، هیدروستاتیک نیست. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که ضریب زاویه معادله خطی (5) - که ارتباط انرژی و عمق را در مقطع زیربحرانی آشکار می‌سازد - از نظر فیزیکی تعبیر خاصی دارد. به بیان دیگر این ضریب، تاثیر توانهای مختلف y_{2U} ، اختلاف دبی در دو رژیم جریان و غیرهیدروستاتیک بودن فشار در مقطع 2U را به صورت عددی و مستقل از شرایط مختلف مرزی مدلسازی کرده است. این معادله علاوه بر اینکه در محاسبات بعدی سودمند است، می‌تواند پیش‌بینی بسیار خوبی را برای پارامترهای جریان به دست دهد.

ضریب زاویه‌ای که در معادله (5) برای شیب کانال معادل 0/0056 به دست آمده، برای سه هیدروگراف ورودی شکل (4) - که مشخصات مختلفی را برای پرش هیدرولیکی متحرک ایجاد می‌کنند - مقدار ثابتی است. از این رو به نظر می‌رسد که پارامترهای شیب یا زبری، عوامل نقض‌کننده رابطه (5) نخواهند بود و تاثیر آنها فقط در ضریب زاویه معادله مشهود می‌شود، که این موضوع به مطالعه بیشتر و ارزیابی آزمایشگاهی نیاز دارد.

با جایگزینی مقدار انرژی کل بر اساس جملات معادله انرژی در معادله (5)، معادله زیر حاصل می‌شود:



شکل 7 رابطه نسبت دبی‌های ماندگار و غیرماندگار با تفاضل انرژی کل در این دو حالت جریان



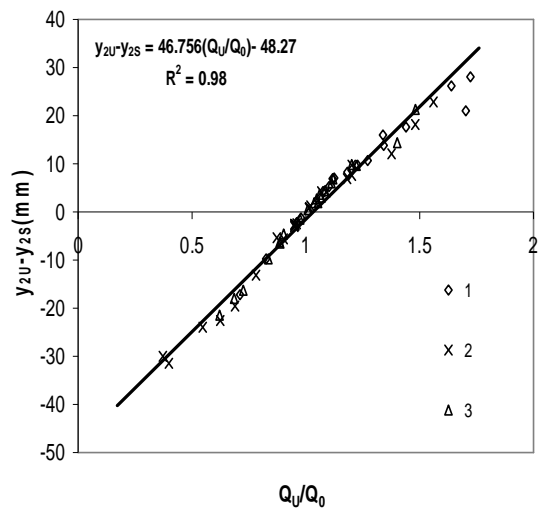
شکل 8 نیروی فشاری در مقطع زیربحرانی بعد از پرش بر حسب دبی Q.

روشی که برای محاسبه نیروی فشاری مقطع زیربحرانی در معادله (11) ارائه شد نشان می‌دهد که این نیرو در مقایسه با نیروی فشاری هیدروستاتیک حاصل از y_{2S} ، کمتر است و با افزایش دبی، از این اختلاف کاسته می‌شود.

با ساده‌سازی معادله (10)، معادله (11) حاصل می‌شود:

$$\frac{F_{P2U}}{\gamma} = f(y_{2U}) = \frac{y_1^2 b}{2} - \frac{1}{gb} \left(\frac{Q_U^2}{y_{2U}} - Q_0^2 \right) \quad (11)$$

با محاسبه طرف راست معادله (11)، مقدار F_{P2U}/γ هر زمان به دست می‌آید. اگر F_{P2U} را نیروی فشاری واقعی (غیرهیدروستاتیک) در مقطع زیربحرانی، $F_{P2U \text{ nhyd}}$ ، در نظر بگیریم، F_{P2S} و $F_{P2U \text{ hyd}}$ فشاری هیدروستاتیک هستند که بترتیب با استفاده از عمقهای y_{2U} و y_{2S} و از روابط $\gamma y_{2U}^2 b/2$ و $\gamma y_{2S}^2 b/2$ در مقطع زیربحرانی به دست آمده‌اند. نیروی فشاری (F_P) در مقطع زیربحرانی جریان دوگانه، با استفاده از سه تعریف یاد شده، در شکل 8 ترسیم شده است که نحوه تغییر این پارامتر را بر حسب دبی ورودی، برای مجموعه ای از داده‌ها (مجموعه 1) نشان می‌دهد. در مجموعه دیگر نیز وضعیتی مشابه دیده می‌شود.



شکل 6 رابطه نسبت دبی‌های ماندگار و غیرماندگار با تفاضل عمق زیربحرانی در این دو حالت جریان

با توجه به شکل (8)، توزیع فشار در مقطع زیربحرانی که یکی از عوامل محاسبه انرژی محسوب می‌شود، به گونه‌ای است که در دبی‌های پایین، کمتر از نیروی فشاری هیدروستاتیک در پرش ماندگار است و با افزایش دبی، از نیروی یاد شده فزونی می‌گیرد.

5- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر، بر اساس اندازه‌گیری مستقیم پارامترهای جریان غیرماندگار و اعمال فرضیاتی، نتایجی به دست آمد که نشان می‌دهد بین مقادیر اندازه‌گیری شده غیرماندگار و پارامترهای محاسبه شده متناظر با آنها (که برخی از روابط جریان ماندگار حاصل شده)، روابط مشخصی وجود دارد. با استفاده از این روابط و با تقریب خوبی می‌توان در کانال مستطیلی، خصوصیات جریان دوگانه‌ای به صورت پرش هیدرولیکی متحرک را تخمین زد.

تأثیر تغییرات دبی ورودی فلوم یا به بیان دیگر تغییر شرایط مرزی بالادست، در همه محاسباتی که دبی در آنها وارد شده، بخوبی مشهود است. هر یک از نقاط منفردی که در نمودارها ترسیم شده، نماینده دبی بخصوص هستند و به این ترتیب هر نمودار، نشان دهنده جریانی غیرماندگار است که در آن دبی و در نتیجه پارامترهای وابسته به آن تغییر کرده‌اند. از آنجا که در طول آزمایش هیچگونه تغییری در وضعیت دریچه پایین دست داده نمی‌شود، بنابراین می‌توان گفت که تغییرات شرط مرزی پایین دست (تغییر رقوم در مقطع پایین دست) نیز وابسته به تغییرات دبی است؛ هر چند مقدار ثابت بازشدگی دریچه پایین دست نیز در میزان رقوم سطح آب پایین دست نقش دارد. اما از آنجا که تغییر دبی در هر لحظه، با تأخیر، موجب ایجاد تغییر در مرز پایین دست می‌شود، می‌توان گفت که عمق و همچنین مکان تشکیل پرش در هر لحظه، حاصل موازنه‌ای است که هر زمان بین تغییرات دبی در بالادست و تغییرات رقوم آب در پایین دست ایجاد می‌شود.

توصیف اجزای معادله اندازه حرکت برای جریان دوگانه - که نوعی جریان غیرماندگار متغیر سریع است - بسادگی میسر نیست. کامل‌ترین شکل معادله اندازه حرکت، معادله سنت ونانت است که با فرض وجود جریان غیرماندگار تدریجی به دست آمده و استفاده از آن برای جریان دوگانه درست نیست. این در حالی است که در پرش هیدرولیکی

ماندگار برای تعیین نیروهای وارد بر حجم کنترل دربرگیرنده پرش، به آسانی از معادله اندازه حرکت حالت ماندگار استفاده می‌شود. در محاسباتی که انجام شد با در نظر گرفتن فرضیاتی برای پرش هیدرولیکی متحرک، از معادله اندازه حرکت حالت ماندگار استفاده شد. بدین ترتیب اگر هر لحظه از جریان غیرماندگار، نوعی جریان ماندگار (با عدم تعادل نیرویی) فرض شود، با کاربرد Q_U و Q_0 ، در مقاطع زیربحرانی و فوق بحرانی، یافتن عبارتهایی برای توصیف شرایط جریان در مقطع زیربحرانی امکان پذیر می‌شود. گرچه ممکن است در این معادله از فرضیات متعددی استفاده شده باشد اما می‌تواند در توسعه رابطه‌ای برای جریان دوگانه مفید واقع شود.

در این مجموعه از آزمایشها، روابطی بر پایه داده‌های ثبت شده حاصل شد. این روابط که برازش نسبتاً خوبی را با داده‌ها نشان می‌دهند، اطلاعات مفیدی را در باره ویژگیهای جریان دوگانه به دست می‌دهند. برخی از این روابط مستقل از دبی بوده و برای هر هیدروگراف دبی در بالادست - تا زمانی که دریچه پایین دست - تغییر وضعیت ندهد، معتبرند.

6- علائم

A' : ماتریس ژاکوبی

A : سطح مقطع خیس شده

B : عرض مقطع در سطح آب

b : عرض فلوم مستطیلی

c : سرعت انتشار موج

ΔE : تلفات انرژی

E : انرژی کل در مقطع مشخص

F_F : نیروی اصطکاک

F_p : نیروی فشاری

F_{p2S} : نیروی فشاری هیدروستاتیک برای عمق Y_{2S}

$F_{p2U \text{ hyd}}$: نیروی فشاری هیدروستاتیک برای عمق Y_{2U}

- 105.
- [5] Gharangik, A.M., and Chaudhry, M.H., (1991). "Numerical simulation of hydraulic jump." *J.hydr.Engng. ASCE*, 117(9), 1195-1211.
- [6] Jin, M., and Fread, D.L., (1997). "Dynamic flood routing with explicit and implicit numerical solution scheme." *J.hydr.Engng. ASCE*, 123(3), 166-173.
- [7] Kim, W., and Han, K. Y., (2000). "Computation of transcritical flow by implicit ENO scheme." 4th International Conference on Hydro-Science and Engineering, Seoul, Korea, September 26-29, 2000.
- [8] Martin, C.S., and Zovne, J.J., (1971). "Finite-Difference simulation of bore propagation." *Journal of Hydraulic division, HY7*, July, 993-1010.
- [9] Meselhe, E.A., and Holly, F.M., (1997). "Invalidity of preissmann for transcritical flow." *J.hydr.Engng. ASCE*, 123(7), 652-655.
- [10] Meselhe, E.A., and Sotiropoulos, F., and Holly, F.M., (1997). "Numerical simulation of transcritical flow in open channel." *J.hydr.Engng. ASCE*, 123(9), 774-783.
- [11] Tseng, M.H., (1999). "Verification of 1-D transcritical flow model in channels." *Proc. Natl. Counc. ROC(A)*, 23(5), 654-664.
- [12] Tseng, M.H., and Hsu, C.A., and Chu, C.R., (2001). "Channel routing in open-channel flows with surges." *J.hydr.Engng. ASCE*, 127(2), 115-122.
- [13] Yost, S.A., and Rao, P., (2001). "A multiple grid approach for open channel flows with strong shock." *Elsevier Science. Appl. Math. Comput.*, 124, 381-395.
- [14] Zhang, W., and Summer, W., (1999). "Computation of rapidly varied unsteady flows in open channels and comparison with physical model and field experiment." 28th IAHR congress, Graz, Austria, August 22-27, 1999.

نیروی فشاری غیرهیدروستاتیک برای عمق $F_{P2U \text{ nhyd}}$

Y_{2U}

عدد فرود: Fr

γ : وزن حجمی آب

L: طول فلوم

λ_1, λ_2 : بردارهای ویژه ماتریس ژاکوبی

P: فشار

Pos.: محل وقوع عمق مشخصی نسبت به ابتدای فلوم

$Q(x, t)$: دبی تابع مکان و زمان

Q_0 : دبی ورودی و دبی مقطع فوق بحرانی

Q_U : دبی در مقطع زیر بحرانی

S_0 : شیب طولی فلوم

V: سرعت متوسط جریان

$W \sin \alpha$: نیروی ثقل

y: عمق جریان

y_1 : عمق فوق بحرانی

y_{2s} : عمق مزدوج عمق فوق بحرانی

y_{2U} : عمق زیر بحرانی اندازه‌گیری شده

Z: رقوم کف فلوم

6- منابع

- [1] Cung, J.A., and Holly Jr, F.M., and Verwey, A., (1980). *Practical aspects of computational river hydraulics*. Pitman, London.
- [2] Fennema, R.J., and Chaudhry, M.H., (1990). "Explicit methods for 2-D transient free-surface flows." *J.hydr.Engng. ASCE*, 116(8), 1013-1034.
- [3] Fennema, R.J., and Chaudhry, M.H., (1986). "Explicit numerical scheme for unsteady free-surface flows with shocks." *Water resource research*, 22(13), 1923-1930.
- [4] Garcia-Navaro, P., and Saviron, J.M., (1992). "Mc cormack's method for the discontinues unsteady open channel flow." *Journal of Hydraulic Research*, 30(1), 95-

Experimental Study of Unsteady Transc

reliably determine the unsteady transcritical flow parameter based on time independent relations.

Key Words: Transcritical Flow, Unsteady Flow, Boundary Conditions, Moving Hydraulic Jump

ritical Flow Characteristics in Rectangular Channels

Parvareh Rizi A., Kouchakzadeh S., Omid M.H.

Respectively,
Graduate student,
Associate Prof.
and Assistant
prof., Irrigation
and Reclamation
Engrg. Dept.,
University of
Tehran

P.O. Box 4111, Karaj 31587-11167

Abstract

The occurrence of transcritical or mixed flow, i.e., supercritical and subcritical flow regimes, is considered as a special case of unsteady flow in a channel reach, which can clearly be exemplified by a moving hydraulic jump. Some complexity is inherent in the numerical analysis of transcritical flow and published experimental data regarding this kind of flow are rarely available. In this research an experimental setup was prepared to compile the hydraulic characteristics of transcritical flow in a rectangular flume. The flume was equipped with a sluice gate at the upstream boundary. Each inflow hydrograph generated unsteady supercritical flow regime at the downstream side of the sluice gate and formed a moving hydraulic jump along the channel. During each run, the water surface profile was continuously recorded using a pressure transducer. Based on the recorded data, some flow parameters such as flow depth, pressure head and energy head were determined. The result reveals specific relations between the discharge and moving hydraulic jump parameters. Also, by applying proper assumptions and employing steady state momentum and energy equations simple yet reasonable (and time independent) relations were obtained, that determines the pressure head in subcritical region of unsteady mixed flow. Consequently, having the discharge variation as a boundary condition, one may