



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی عمران

بررسی تأثیر عمق پایاب بر مشخصه‌های جریان در شیب‌شکن‌های قائم مجهز به مستهلک‌کننده‌ی شبکه‌ای

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران-آب

معصومه شریف‌گوزین

استاد راهنما

دکتر عبدالرضا کبیری سامانی

زمستان ۱۳۹۲

چکیده

سازه‌های شیب‌شکن معمولاً برای کنترل جریان و استهلاک انرژی در کانال‌هایی که شیب بستر آنها از شیب طبیعی زمین بیشتر است، مورد استفاده قرار می‌گیرند. این سازه‌ها به سبب سادگی ساخت و بهره‌برداری از جمله رایج‌ترین ساختمان‌های آبی جهت کاهش انرژی جریان در شبکه‌های آبیاری، آبراه‌های فرسایش‌پذیر و سیستم‌های جمع‌آوری و تصفیه آب و فاضلاب هستند. از آنجا که یکی از مهم‌ترین اهداف احداث شیب‌شکن‌ها استهلاک انرژی جنبشی مخرب جریان حین عبور از روی شیب‌شکن است، لذا ارائه‌ی راهکارهای مناسب مانند استفاده از سازه‌های استهلاک انرژی نظیر مستهلک‌کننده‌های شبکه‌ای می‌تواند در راستای تحقق این هدف مؤثر باشد. تغییرات عمق پایاب در پایین‌دست شیب‌شکن‌های قائم سبب بروز تغییراتی در هیدرولیک جریان و شکل‌گیری رژیم‌هایی در پایین‌دست شیب‌شکن می‌شود.

در مطالعه‌ی حاضر به بررسی تأثیر تغییر عمق پایاب بر شکل‌گیری رژیم‌های مختلف جریان و مشخصات هیدرولیکی جریان و پارامترهای هیدرولیکی در پایین‌دست شیب‌شکن در حضور سازه‌ی مستهلک‌کننده‌ی انرژی از نوع شبکه‌ای که توسط محققین پیشین پیشنهاد شده است، پرداخته می‌شود. بدین منظور مطالعاتی آزمایشگاهی برای بررسی رژیم‌های جریان و محدوده‌ی وقوع آنها و همچنین بررسی تغییرات پارامترهای هیدرولیکی شیب‌شکن در حضور سازه‌ی مستهلک‌کننده‌ی انرژی شبکه‌ای، صورت گرفته است. آزمایش‌ها بر روی سه شیب‌شکن قائم با هشت مستهلک‌کننده‌ی شبکه‌ای با ابعاد شبکه‌های متفاوت به‌ازای هفت دبی مختلف و در محدوده‌ی عمق بحرانی به ارتفاع شیب‌شکن (Y_c/p) برابر با ۰/۱۸۸ تا ۰/۴۲ انجام شده‌اند. در هر سری از آزمایشات به ازای دبی ثابت، عمق آب در پایین‌دست شیب‌شکن مجهز به مستهلک‌کننده به آرامی و در هشت مرحله افزایش داده شده و وقوع رژیم‌های جریان و هرگونه تغییری در وضعیت جریان و پارامترهای هیدرولیکی شیب‌شکن مجهز به مستهلک‌کننده نظیر عمق و طول استخر ایجادشده در پای شیب‌شکن و طول اختلاط ناحیه‌ی آشفته بررسی و تمامی مشاهدات و برداشت‌ها به ازای کاهش تدریجی عمق پایاب نیز تکرار شده است. با استفاده از نتایج به دست‌آمده از آزمایشات انواع رژیم‌های جریان در شیب‌شکن مجهز به مستهلک‌کننده و محدوده‌ی تغییرات این رژیم‌ها مشخص شده و به ارابه‌ی روابطی تجربی برای تخمین محدوده‌ی وقوع این رژیم‌ها پرداخته شده است. سپس پارامترهای هیدرولیکی شیب‌شکن مجهز به مستهلک‌کننده بررسی و روابطی تجربی برای تخمین تغییرات این پارامترها با تغییرات عمق پایاب ارابه شده است. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که تغییر عمق پایاب در پایین‌دست شیب‌شکن مجهز به مستهلک‌کننده شبکه‌ای باعث وقوع دو رژیم اصلی جت‌های سقوطی حباب-دار و رژیم جریان‌های سطحی می‌شود که رژیم جریان‌های سطحی خود شامل سه زیر رژیم ناحیه‌ی جابی، رژیم موج سطحی و رژیم جت سطحی است. هم‌چنین افزایش عمق پایاب سبب افزایش عمق استخر تشکیل‌شده در پای شیب‌شکن، کاهش طول استخر و کاهش طول اختلاط ناحیه‌ی آشفته در شیب‌شکن مجهز به مستهلک‌کننده می‌شود.

کلمات کلیدی: شیب‌شکن قائم، مستهلک‌کننده‌ی شبکه‌ای، عمق پایاب، رژیم جریان، مشخصات هیدرولیکی شیب‌شکن

فهرست مطالب

فصل اول: پیشگفتار	۲
۱-۱- مقدمه	۲
۲-۱- شیب‌شکن‌ها	۳
۳-۱- پرش هیدرولیکی	۴
۴-۱- حوضچه‌های آرامش	۴
۵-۱- مستهلک‌کننده‌های انرژی	۵
۶-۱- رژیم جریان	۷
۷-۱- اهداف پژوهش حاضر و ساختار پایان‌نامه	۸
فصل دوم: مروری بر پژوهش‌های گذشته	۱۰
۱-۲- مقدمه	۱۰
۲-۲- تاریخچه مطالعاتی	۱۱
۳-۲- جمع‌بندی فصل	۴۱
فصل سوم: مدل‌سازی آزمایشگاهی	۴۲
۱-۳- مقدمه	۴۲
۲-۳- کانال آزمایشگاهی و تجهیزات مورد استفاده	۴۳
۳-۳- مدل‌های مستهلک‌کننده	۴۵
۴-۳- پارامترهای اندازه‌گیری شده	۴۷
۱-۴-۳- اندازه‌گیری دبی جریان	۴۸
۲-۴-۳- اندازه‌گیری عمق آب در بالادست، لبه و پایین‌دست شیب‌شکن	۴۸
۳-۴-۳- اندازه‌گیری طول و عمق استخر ایجاد شده در پای شیب‌شکن	۴۸
۴-۴-۳- اندازه‌گیری طول اختلاط ناحیه‌ی آشفته	۴۹
۵-۳- بررسی رژیم‌های جریان	۴۹
۶-۳- اندازه‌گیری پروفیل سرعت در پایین‌دست شیب‌شکن	۵۰
۷-۳- جمع‌بندی فصل	۵۱

۵۲	فصل چهارم: مشاهدات آزمایشگاهی و تحلیل نتایج
۵۲	۱-۴- مقدمه
۵۳	۲-۴- مشاهدات آزمایشگاهی و بحث روی نتایج
۶۲	۳-۴- ارزیابی محدوده‌ی تغییرات رژیم‌ها و بررسی پارامترهای مؤثر بر تغییرات رژیم‌ها
۷۰	۴-۴- بررسی تغییرات پارامترهای شیب‌شکن مجهز به مستهلک‌کننده با تغییرات عمق پایاب
۷۰	۴-۴-۱- بررسی تغییرات عمق استخر تشکیل شده در پای شیب‌شکن مجهز به مستهلک‌کننده‌ی شبکه‌ای
۷۵	۴-۴-۲- بررسی تغییرات طول استخر تشکیل شده در پای شیب‌شکن مجهز به مستهلک‌کننده‌ی شبکه‌ای
۷۹	۴-۴-۳- بررسی تغییرات طول اختلاط ناحیه‌ی آشفته در شیب‌شکن مجهز به مستهلک‌کننده‌ی شبکه‌ای
۸۳	۴-۵-۱- ارزیابی روابط تجربی و آنالیز خطا
۸۴	۴-۵-۱-۱- رابطه‌ی محدوده‌ی تغییرات رژیم‌ها
۸۵	۴-۵-۲- روابط بین پارامترهای هیدرولیکی شیب‌شکن مجهز به مستهلک‌کننده با تغییرات عمق پایاب
۸۷	۴-۶- جمع‌بندی فصل
۸۹	فصل پنجم: جمع‌بندی، نتیجه‌گیری و پیشنهادها
۸۹	۱-۵- مقدمه
۹۰	۲-۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری‌های کلی
۹۳	۳-۵- پیشنهادها

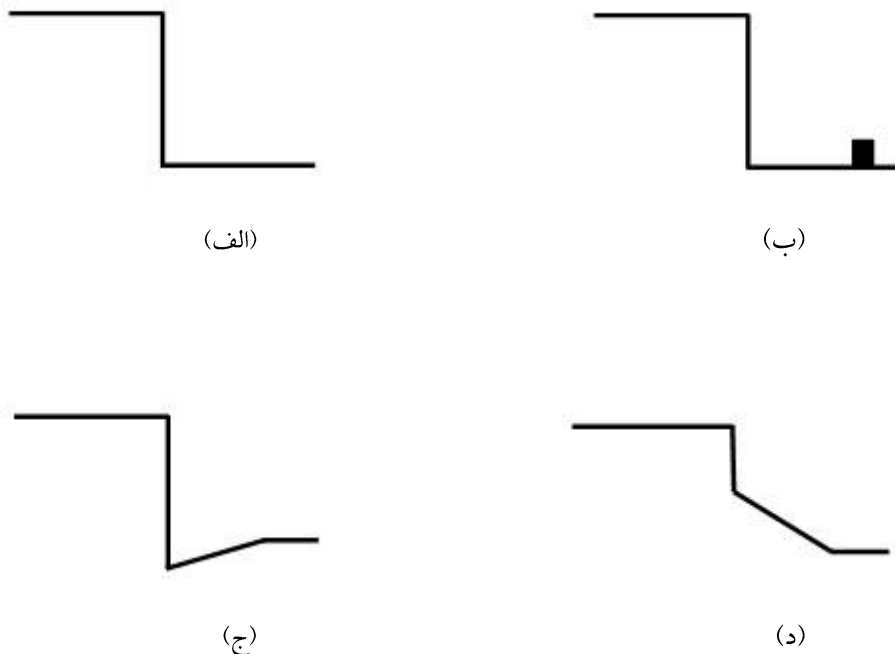
فصل اول - پیشگفتار

۱-۱- مقدمه

سازه‌های شیب‌شکن معمولاً برای کنترل جریان و استهلاک انرژی در کانال‌هایی که شیب بستر آنها از شیب طبیعی زمین بیشتر است، مورد استفاده قرار می‌گیرند. این سازه‌ها به سبب سادگی ساخت و بهره‌برداری از جمله رایج‌ترین ساختمان‌های آبی جهت کاهش انرژی جریان در شبکه‌های آبیاری، آبراهه‌های فرسایش پذیر، سیستم‌های جمع‌آوری و تصفیه آب و فاضلاب و سایر هستند که معمولاً با انواع موانع و کف‌بند در پایین دست می‌توانند حالت‌های متنوعی از سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی را ایجاد نمایند. اتلاف انرژی در حین عبور جریان از شیب‌شکن به دو صورت شامل تلفات ناشی از شکل هندسی ساختمان و تلفات ناشی از وقوع پدیده‌ی پرش هیدرولیکی در حوضچه‌ی آرامش پایین دست رخ می‌دهد. شناخت بهتر پارامترهای مؤثر در تخمین خصوصیات هیدرولیکی جریان از جمله استهلاک انرژی ناشی از ساختمان شیب‌شکن و میزان افت انرژی در پرش، کاهش ابعاد ساختمانی این سازه هیدرولیکی و حوضچه‌ی پایین دست آن را موجب شده و از این نظر صرفه‌جویی اقتصادی قابل توجهی را به همراه دارد. از آنجا که یکی از مهم‌ترین اهداف احداث شیب‌شکن‌ها، استهلاک انرژی جنبشی مخرب جریان حین عبور جریان از روی شیب‌شکن است، ارائه‌ی راهکارهای مناسب مانند استفاده از سازه‌های استهلاک انرژی می‌تواند در راستای تحقق این هدف مثمرتر باشد. تغییرات عمق پایاب در پایین دست شیب‌شکن‌های قائم، چه در اثر عوامل طبیعی (نظیر بروز سیل) و چه در اثر عوامل غیرطبیعی (وجود دریچه و یا سرریز) سبب بروز تغییراتی در هیدرولیک جریان و شکل‌گیری رژیم‌هایی در حوضچه‌های آرامش پایین دست شیب‌شکن‌ها می‌شود. لذا لازم است تأثیر تغییرات عمق پایاب بر مشخصات هیدرولیکی جریان و رژیم‌های شکل گرفته در پایین دست شیب‌شکن، در حضور سازه‌ی مستهلک‌کننده‌ی انرژی مورد بررسی قرار گیرد. در این فصل ابتدا نگاهی اجمالی بر ساختار شیب‌شکن‌ها به خصوص شیب‌شکن قائم خواهیم داشت، سپس سازه‌های استهلاک انرژی به خصوص مستهلک‌کننده‌های شبکه‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین شرح مختصری بر رژیم‌های جریان شکل گرفته در پایین دست شیب‌شکن‌های قائم ارائه می‌شود.

۱-۲- شیب‌شکن‌ها^۱

شیب‌شکن‌ها از جمله سازه‌های هیدرولیکی هستند که برای انتقال آب از یک ارتفاع بالاتر به ارتفاع پایین‌تر و اتلاف انرژی ناشی از سقوط آب، جهت اعمال یک سرعت بهینه در کانال‌ها و شبکه‌های آبیاری و زهکشی به کار می‌روند. در واقع شیب‌شکن قائم سازه‌ای با ارتفاع کم و هم‌عرض کانال است که در آن جریان از یک ریزش آزاد تبعیت کرده و سپس در حوضچه‌ی آرامش پایین‌دست فرود می‌آید. جریان در بالادست شیب‌شکن می‌تواند زیر-بحرانی یا فوق‌بحرانی باشد. برای جریان زیربحرانی، جریان قبل از لبه‌ی شیب‌شکن به عمق بحرانی رسیده و سپس از روی لبه‌ی شیب‌شکن ریزش می‌کند. برای جریان فوق‌بحرانی، عمق جریان در بالادست شیب‌شکن کمتر از عمق بحرانی بوده و تابعی از عدد فرود و دبی است. همان‌طور که اشاره شد، یکی از اصلی‌ترین کاربردهای شیب‌شکن‌ها در شرایطی است که توپوگرافی بستر کانال دارای شیب تند باشد. همچنین از دیگر کاربردهای شیب‌شکن‌های قائم می‌توان به کاهش در هزینه‌های حفاری زمین در صورتی که شیب کانال از شیب طبیعی زمین بیشتر است، اشاره کرد. شیب‌شکن‌های قائم علاوه بر اتلاف انرژی می‌توانند برای اکسیژن‌دهی به جریان‌هایی که اکسیژن محلول در آنها کم است، در امتداد یا کنار رودخانه‌ها و آبراهه‌ها استفاده شوند. شیب‌شکن‌ها معمولاً به دو دسته‌ی قائم و مایل تقسیم‌بندی می‌شوند. شیب‌شکن‌های قائم نیز از لحاظ کاربرد به چهار دسته‌ی شیب‌شکن قائم با شیب افقی در کانال پایین-دست، شیب‌شکن قائم با مانع در پایین‌دست، شیب‌شکن قائم با شیب معکوس در کانال پایین‌دست، شیب‌شکن قائم با شیب مثبت در کانال پایین‌دست تقسیم می‌شوند (شکل ۱-۱).



شکل (۱-۱): انواع شیب‌شکن‌ها از لحاظ کاربرد

¹ Drops

۳-۱- پرش هیدرولیکی^۲

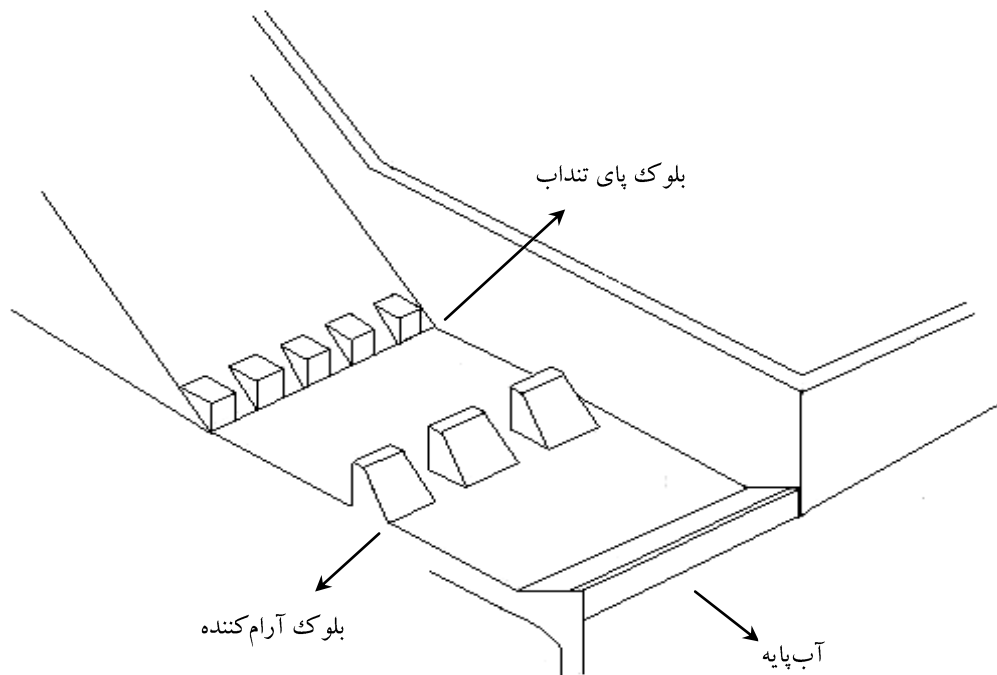
پرش یا جهش هیدرولیکی از نوع جریان‌های متغیر سریع است و در بسیاری از مسایل عملی کاربرد دارد. پرش هیدرولیکی تغییر حالت جریان از فوق بحرانی به زیربحرانی است. چنانچه آب در قسمتی از مسیر دارای حالت فوق-بحرانی بوده و بنا به مشخصات و موقعیت خاص کانال تغییر حالت دهد، عمق جریان در مسیر نسبتاً کوتاهی به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته و در نتیجه‌ی آن ضمن افت انرژی محسوس، از میزان سرعت به اندازه‌ی قابل توجهی کاسته می‌شود. پرش هیدرولیکی روی کف‌های نسبتاً افقی یا شیب‌دار، با مانع یا بدون مانع رخ می‌دهد. بدیهی است بسته به این که پرش در کدام یک از موقعیت‌های مذکور اتفاق بیفتد، دارای خصوصیات کاملاً متفاوتی خواهد بود. قدرت و شدت پرش به عدد فرود در محل شروع پرش بستگی دارد. پرش‌های هیدرولیکی بر حسب مقدار عدد فرود به انواع پرش موجی، پرش ضعیف، پرش نوسانی، پرش پایدار و پرش قوی تقسیم‌بندی می‌شوند.

۴-۱- حوضچه‌های آرامش^۳

یکی از روش‌های مناسب استهلاک انرژی اضافه جریان بهره‌گیری از حوضچه‌های آرامش همراه با پرش هیدرولیکی است. حوضچه‌های آرامش در پایین‌دست سرریزها، تنداب‌ها، شیب‌شکن‌ها و به طور کلی هر سازه‌ای که در پایین-دست، جریان فوق‌بحرانی ایجاد کند، ساخته می‌شوند. همان‌طور که در قسمت قبل اشاره شد، عدد فرود در پنجه‌ی سرریز بیان‌گر وضعیت و نوع پرش هیدرولیکی است. چنانچه پرش ضعیف باشد انرژی مخرب آن به اندازه‌ای نیست که خطرات قابل توجهی داشته باشد. از این‌رو در چنین مواردی موانع اضافی به عنوان مستهلک‌کننده‌ی انرژی در سر راه جریان قرار داده نمی‌شود. در صورتی که عدد فرود زیاد باشد انرژی مخرب زیاد بوده و برای گرفتن انرژی اضافی آب به مانع نیاز است. بر اساس عدد فرود و سرعت آب در پنجه‌ی سرریز و یا شیب‌شکن حوضچه‌های آرامش استاندارد بر اساس مطالعات انجام شده توسط مؤسسه USBR به شرح زیر مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای پرش‌های موجی، ضعیف، نوسانی و قوی به ترتیب حوضچه‌های آرامش USBRI، USBRIV و USBRIII پیشنهاد شده است. در این حوضچه‌ها بلوک‌های پای تنداب، آب‌پایه و بلوک‌های آرام‌کننده نقش اصلی را در استهلاک انرژی دارند. شکل (۱-۲) اجزای مختلف یک حوضچه‌ی آرامش از نوع USBRIII را نشان می‌دهد.

^۲ Hydraulic Jump

^۳ Stilling Basins



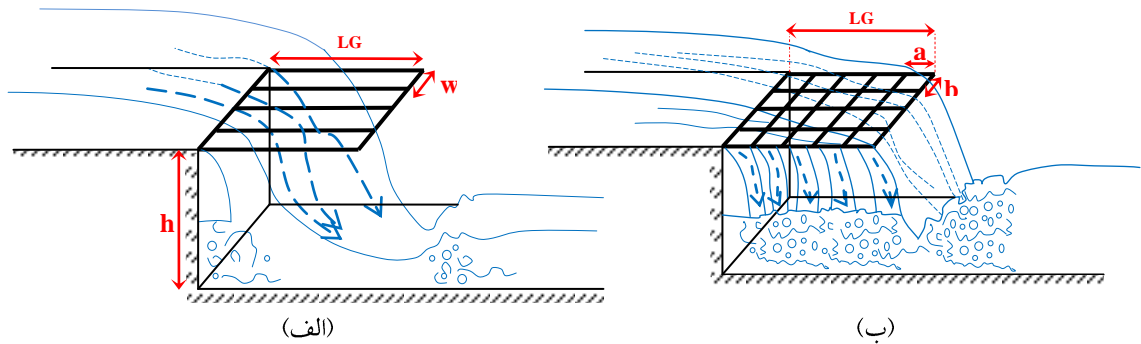
شکل (۱-۲): اجزای حوضچه‌های آرامش

۱-۵- مستهلک کننده‌های انرژی^۴

انرژی جنبشی مخرب جریان آب، باعث وقوع فرسایش و آب‌شستگی در بستر کانال‌های باز می‌شود. از جمله عوامل افزایش انرژی جنبشی آب می‌توان به وجود شیب تند در بستر کانال، تنگ‌شدگی‌های کانال (مانند دریچه‌ها، سرریزها و سایر) و شیب‌شکن‌های واقع در ارتفاعات اشاره نمود. برای از بین بردن انرژی جنبشی مخرب آب از سازه‌های مستهلک کننده‌ی انرژی استفاده می‌شود. این سازه‌ها معمولاً در مقاطع با افت ناگهانی ارتفاع کف، مقاطع پایانی فلوم-ها و شوت‌ها، خروجی کالورت‌ها و سیفون‌های معکوس و پایین دست سازه‌هایی که باعث ایجاد جریان زیربحرانی می‌شوند، استفاده می‌شوند. عمل کرد سازه‌های استهلاک انرژی معمولاً بر دو اصل ایجاد پرش هیدرولیکی همراه با آشفته‌گی جریان و ضربه‌ی مستقیم استوار است. با این که هر دو روش می‌توانند سبب ایجاد آشفته‌گی و کاهش انرژی هیدرولیکی جریان شوند، اما مؤسسه USBR اعلام نموده است که روش دوم از کارآیی بیشتری برخوردار است. در شیب‌شکن‌ها معمولاً پرش هیدرولیکی و مشخصه‌ی ضربه‌ای هم‌زمان عمل می‌کنند. این استهلاک انرژی از طریق بلوک‌های کف، برآمدگی پایانی در حوضچه‌های آرامش، اغتشاش در پایاب و پرش هیدرولیکی اتفاق می‌افتد. از دیگر سازه‌های استهلاک انرژی می‌توان به حوضچه‌های آرامش همراه با پرش هیدرولیکی، ایجاد برآمدگی و یا پایین‌افتادگی موضعی در کانال و موارد دیگر اشاره نمود. در مواردی که پرش هیدرولیکی پایدار در حوضچه

⁴ Energy Dissipators

آرامش اتفاق می‌افتد، ساخت حوضچه‌های آرامش با مانع ممکن است مقرون به صرفه نباشد. همچنین به ازای اعداد فرود بالاتر سازه‌ی مستهلک‌کننده‌ی انرژی بدون پرش مورد توجه قرار می‌گیرد. در این صورت مستهلک‌کننده‌ی انرژی از نوع پرش اسکی می‌تواند به عنوان یک جایگزین پیشنهاد شود. هنگامی که عمق پایاب برای تشکیل پرش هیدرولیکی خیلی زیاد باشد، می‌توان عمل استهلاك انرژی جریان را با استفاده از منحرف‌کننده‌ی جامی مستغرق انجام داد. رفتار هیدرولیکی این نوع مستهلک‌کننده‌ها در دو جریان غلطابی، یکی در سطح و در جهت خلاف عقربه‌های ساعت و در محدوده‌ی انحنای فوقانی جام و دیگری در حرکت غلطاب زمینی در جهت عقربه‌های ساعت در پایین دست منحرف‌کننده خلاصه می‌شود. نوع دیگری از مستهلک‌کننده‌ها حوضچه‌های آرامش با بارشکن هستند. این حوضچه‌ها به تراز آب پایاب حساس نیستند. عمل استهلاك انرژی از طریق برخورد جت ورودی به بارشکن‌هایی که به صورت عمودی قرار گرفته‌اند، صورت می‌گیرد. ضمناً تغییر جهت جریان و تشکیل جریان‌های گردابی نیز مؤثر هستند. بهترین شرایط هیدرولیکی در این سازه‌ها زمانی حاصل می‌شود که تراز پایاب به نصف ارتفاع بارشکن برسد و ضمناً کف بارشکن‌ها بر آبراهه منطبق باشد. مؤسسه USBR نوعی مستهلک‌کننده‌ی شیاری که به سازه‌ی شیب-شکن متصل می‌شود، معرفی نموده است (شکل ۱-۳-الف). جریان ریزشی از روی این مستهلک‌کننده به تعدادی ورقه‌های ریزشی آب تبدیل می‌شود که از لابلای شیارها عبور می‌کند و سبب استهلاك بیشتر انرژی می‌شود. نوع دیگری از این مستهلک‌کننده‌ها، مستهلک‌کننده‌ی شبکه‌ای هستند (شکل ۱-۳-ب). در این نوع از مستهلک‌کننده‌ها جریان آب به تعداد زیادی از جت‌های ریزشی تبدیل می‌شود که در اثر پاشیدن این جت‌ها بر سر جریان پایین دست، اغتشاش و آشفته‌گی شدیدی ایجاد و نهایتاً منجر به افت شدید انرژی می‌شود. در مستهلک‌کننده‌ی شیاری به ازای دبی ثابت، با کاهش عرض شیارها راندمان استهلاك انرژی افزایش می‌یابد. همچنین در مستهلک‌کننده‌های شبکه‌ای هرچه جریان از روی تعداد شبکه‌های بیشتری عبور نماید، تأثیر آن بر افزایش راندمان استهلاك انرژی بیشتر است. همچنین در شیب‌شکن با مستهلک‌کننده‌ی شیاری طول پرش هیدرولیکی بین ۳۰ تا ۳۵ درصد و در شیب‌شکن با مستهلک‌کننده‌ی شبکه‌ای طول پرش هیدرولیکی بین ۶۰ تا ۷۰ درصد نسبت به حالتی که شیب‌شکن فاقد مستهلک‌کننده است، کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که در شیب‌شکن با مستهلک‌کننده‌ی شیاری راندمان استهلاك انرژی تا ۳۰ درصد و در شیب‌شکن با مستهلک‌کننده‌ی شبکه‌ای راندمان استهلاك انرژی تا ۴۵ درصد نسبت به حالت شیب‌شکن بدون مستهلک‌کننده، افزایش می‌یابد.



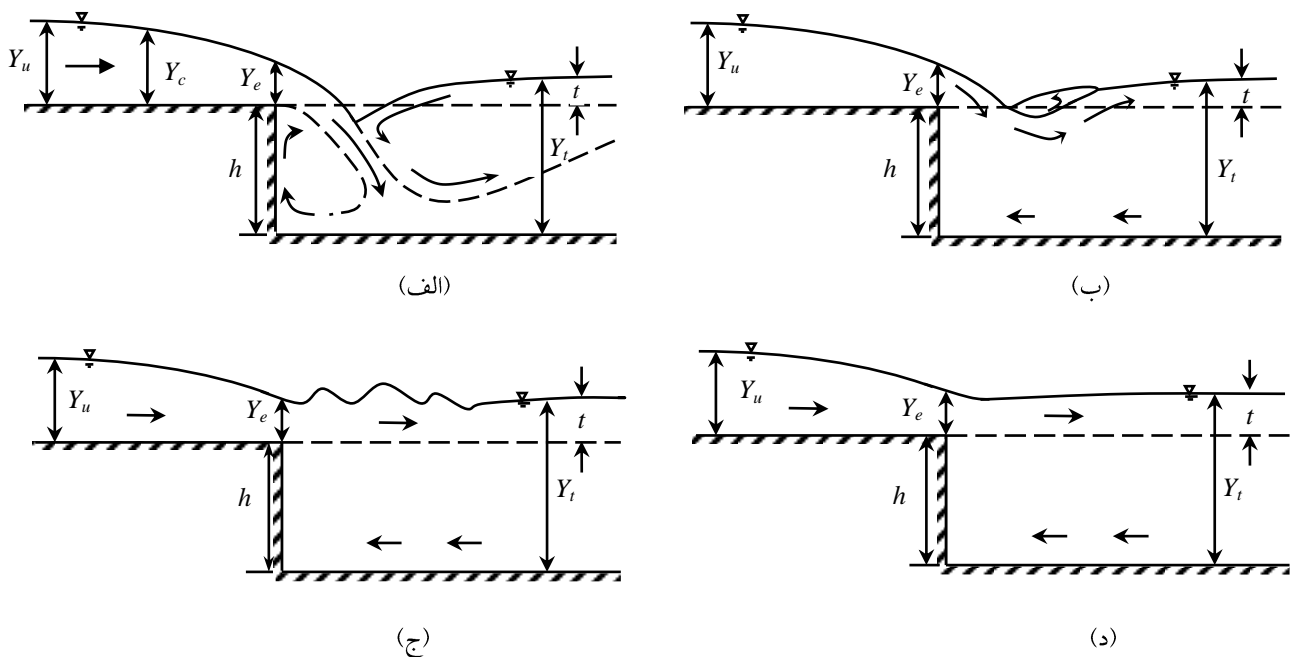
شکل (۳-۱): انواع سازه‌های استهلاک انرژی مورد نظر جهت مطالعه در این تحقیق، الف- مستهلک کننده شیار ب- مستهلک کننده شبکه‌ای

۱-۶- رژیم جریان^۵

تغییرات عمق پایاب در پایین دست سازه‌های هیدرولیکی سبب تغییر در پارامترهای هیدرولیکی جریان و شکل‌گیری رژیم‌هایی در پایین دست این سازه‌ها می‌شود. تغییرات عمق پایاب می‌تواند در اثر عوامل طبیعی نظیر بروز سیل و یا در اثر عوامل مصنوعی نظیر وجود دریچه در پایین دست سازه، ایجاد شود. سازه‌های مستهلک‌کننده‌ی جامی شیاردار به فراز آب در ترازهای کوچک پایاب حساس هستند. زیرا سبب نفوذ جت به زیر توده آب و فرسایش شدید می‌شوند. در عمق‌های خیلی زیاد پایاب پدیده‌ی شیرجه‌ای شدن اتفاق می‌افتد. در این حالت جت خارج شده از لبه‌ی جام صعود نمی‌کند و در سطح حرکتی ندارد، اما به طور متناوب به سطح آب سوار می‌شود و دوباره به کف رودخانه شیرجه می‌رود. در صورت شیرجه‌ای شدن جت، غلطاب سطحی تشکیل می‌شود. در صورت سوار شدن جت بر سطح آب، غلطاب زمینی تشکیل می‌شود. غلطاب زمینی سبب پر کردن نقاط گود شده در اثر فرسایش می‌شود. بنابراین حداکثر عمق پایاب باید محدود باشد تا جلوی پدیده‌ی شیرجه‌ای شدن را بگیرد. در شیب‌شکن‌های قائم با جریان فوق‌بحرانی در بالادست، افزایش تدریجی عمق پایاب سبب شکل‌گیری چهار رژیم مختلف می‌شود. این رژیم‌ها عبارتند از: پرش موج حداکثر، غوطه‌وری حداکثر و پرش محدود. پرش A، پرشی با یک غلطابه‌ی سطحی است که قسمت اعظم آن روی شیب‌شکن تشکیل می‌شود و در آن خطوط جریان همواره به سمت بالا هستند. پرش موج حداکثر به عنوان یک جریان غیرشکننده‌ی موجی در قسمت مرکزی کانال تعریف می‌شود و شکل موج در کانال به استثنای جداره‌های آن دو بعدی است. غوطه‌وری حداکثر، پرشی است که دارای یک غلطابه‌ی سطحی، درست قبل از تبدیل جریان غوطه‌ور به موجی است. خطوط جریان همواره به سمت پایین هستند و پنجه‌ی پرش روی شیب‌شکن تشکیل می‌شود. همچنین پرش محدود به عنوان حد پایین برای تشکیل جریان غوطه‌ور تعریف می‌شود. در شیب‌شکن‌های قائم با جریان زیربحرانی در بالادست، بسته به اینکه عمق پایاب کمتر و یا بیشتر از ارتفاع شیب‌شکن باشد، حالت‌های مختلفی از رژیم‌های جریان به وجود می‌آیند. چنانچه عمق پایاب کمتر از ارتفاع شیب

⁵ Flow Regims

شکن باشد، سه رژیم پرش تپه‌ای، پرش در پایه‌ی شیب‌شکن و پرش مستغرق اتفاق می‌افتند. اما اگر عمق پایاب مساوی و یا بیشتر از ارتفاع شیب‌شکن باشد، دو رژیم جت سقوطی و جریان سطحی در پایین‌دست شیب‌شکن تشکیل می‌شوند. در رژیم جت سقوطی جریان در پایاب فرو رفته، سپس مانند یک جت مستغرق پخش شده و نهایتاً به بستر کانال پایین‌دست ضربه می‌زند. در رژیم جریان سطحی، جریان به صورت یک جت روی سطح آب در کانال پایین‌دست باقی می‌ماند و ضخامت این جت در اثر اختلاط آشفته افزایش می‌یابد. بستر تحت تأثیر جریان‌های برگشتی ضعیفی قرار دارد و سرعت‌های بالا در سطح مشاهده می‌شوند. رژیم جریان سطحی خود به سه زیررژیم موج سطحی شکننده، موج سطحی و جت سطحی تقسیم‌بندی می‌شود (شکل ۴-۱).



شکل (۴-۱): رژیم‌های شکل‌گرفته در پایین‌دست یک شیب‌شکن قائم با جریان زیربحرانی بالادست

۷-۱- اهداف پژوهش حاضر و ساختار پایان‌نامه

همان‌طور که پیشتر اشاره شد، یکی از اهداف مهم احداث شیب‌شکن‌های قائم در شبکه‌های آبیاری و زهکشی کنترل و استهلاک انرژی جنبشی مخرب جریان آب است. محققین پیشین راهکارهای زیادی را برای افزایش میزان استهلاک این انرژی مخرب پیشنهاد نمودند که نصب مستهلک‌کننده‌های شیاری و شبکه‌ای بر روی لبه‌ی شیب‌شکن قائم نمونه‌ای از این راهکارها است. وجود این سازه سبب تغییر جهت جریان، اختلاط و آشفته‌گی شدید در حوضچه آرامش پایین‌دست و کاهش طول حوضچه می‌شود. در این تحقیق به بررسی و شناسایی رژیم‌های جریان شکل‌گرفته در پایین‌دست شیب‌شکن‌های مجهز به این نوع از مستهلک‌کننده‌ها پرداخته می‌شود و تأثیرات عمق پایاب بر شکل

گیری این رژیم‌ها و همچنین بر پارامترهای هیدرولیکی شیب‌شکن به طور دقیق مورد بررسی قرار می‌گیرد. بر این اساس در فصل دوم به مرور مطالعات گذشته پرداخته می‌شود و تحقیقات محققین پیشین در این زمینه مورد بررسی قرار می‌گیرد. در فصل سوم مدل آزمایشگاهی مورد استفاده در تحقیق حاضر، نحوه‌ی انجام آزمایشات و همچنین نحوه‌ی تشخیص رژیم‌های شکل گرفته در پایین دست شیب‌شکن و روند اندازه‌گیری پارامترهای مختلف شرح داده خواهد شد. در فصل چهارم مشاهدات صورت گرفته حین انجام آزمایشات و روند تغییرات رژیم‌های جریان و همچنین تغییرات پارامترهای هیدرولیکی شیب‌شکن مجهز به مستهلک‌کننده به طور مبسوط مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرند. همچنین در این فصل به آنالیز و بررسی داده‌های حاصل از مشاهدات آزمایشگاهی پرداخته شده و معادلاتی برای توصیف حدود تغییرات رژیم‌های جریان ارائه می‌شود. در نهایت در فصل پنجم، جمع‌بندی کلی از نتایج این تحقیق و پیشنهاداتی برای ادامه‌ی مطالعات ارائه می‌شود.

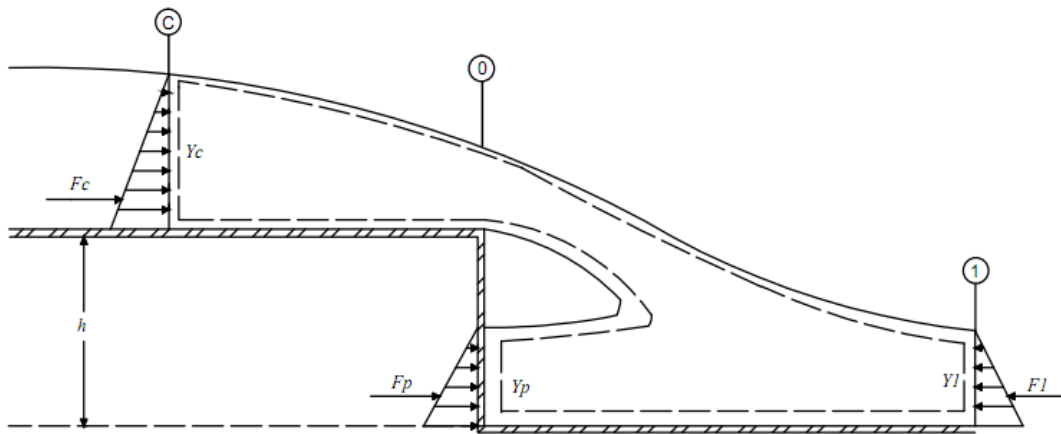
فصل دوم- مروری بر پژوهش‌های گذشته

۲-۱- مقدمه

مطالعه بر روی ساختار شیب‌شکن‌های قائم و بررسی پارامترهای مؤثر بر هیدرولیک جریان پیشینه‌ای طولانی دارد. تحقیقات آزمایشگاهی و تحلیلی بسیاری در این زمینه توسط محققین مختلف انجام شده است. در اکثر این تحقیقات با مدل کردن جریان ریزشی از لبه شیب‌شکن و پیش‌بینی وضعیت پیش‌آمده برای جریان پس از ریزش از لبه شیب‌شکن، به تخمین پارامترهای مؤثر بر وضعیت جریان در شیب‌شکن پرداخته شده است. همچنین پاره‌ای از تحقیقات به بررسی وضعیت پیش‌آمده برای جریان پس از ریزش از لبه شیب‌شکن، هیدرولیک جریان در پایین‌دست شیب‌شکن، رژیم‌های مختلف جریان و تحلیل آنها اختصاص داده شده است. در این فصل خلاصه‌ای از برخی مطالعات تحلیلی و آزمایشگاهی انجام شده در ارتباط با ساختار شیب‌شکن‌های قائم و رژیم‌های مختلف جریان در پایین‌دست آنها ارائه می‌شود.

۲-۲- تاریخچه مطالعاتی

اولین مطالعات در مورد شیب‌شکن‌های قائم، توسط بختف^۱ در سال (۱۹۳۲) انجام شده است. وی با نوشتن معادله انرژی برای حجم کنترل نشان داده شده در شکل (۱-۲)، به رابطه زیر برای محاسبه سرعت در پایین دست شیب‌شکنی با ارتفاع h دست یافت.



شکل (۱-۲): نمایی از شیب‌شکن قائم در مطالعه بختف [۳]

$$V_1 = C\sqrt{2g(E_0 - Y_1)} \quad (1-2)$$

که در رابطه بالا، C ضریب سرعت مربوط به افت انرژی و E_0 هد انرژی کل، نسبت به کف کانال در مقطع o است. بختف رابطه‌ی زیر را برای محاسبه عمق پایین دست شیب‌شکن ارائه داد. فرضیات وی برای اراییه‌ی این رابطه، هیدرواستاتیکی بودن توزیع فشار و یکنواختی توزیع سرعت بوده است [۳].

$$\left(\frac{Y_c}{Y_1}\right)^3 - C^2 \frac{Y_c}{Y_1} \left(\frac{2h}{Y_c} + 3\right) + 2C^2 = 0 \quad (2-2)$$

مور^۲ در سال (۱۹۴۳) مطالعات پایه‌ای را بر روی هیدرولیک جریان در شیب‌شکن‌ها انجام داد. وی با نوشتن معادله اندازه حرکت برای حجم کنترل نشان داده شده در شکل (۱-۲)، به رابطه زیر برای محاسبه عمق استخر در زیر جت ریزشی (Y_p) رسید [۴].

$$Y_p / Y_c = \sqrt{(Y_1 / Y_c)^2 + 2(Y_c / Y_1) - 3} \quad (3-2)$$

از نتایج دیگر این تحقیق آن است که انرژی مستهلک شده در شیب‌شکن‌ها به نسبت h/Y_c وابسته است و با افزایش این نسبت از ۱ به ۱۲، نسبت انرژی مستهلک شده از ۰ به ۰/۵۳ افزایش می‌یابد.

¹ Bakhmeteff

² Moore

رند^۳ در سال (۱۹۵۵) طی یک تحقیق آزمایشگاهی بر روی یک شیب‌شکن قائم به ارتفاع ۱۹۸ میلی‌متر، پارامترهای مؤثر در طراحی شیب‌شکن و حوضچه آرامش را مورد مطالعه قرار داد. وی با ساخت مدل آزمایشگاهی و زیر بحرانی در نظر گرفتن جریان در بالادست شیب‌شکن، پارامترهایی از قبیل طول شیب‌شکن (L_d)، طول پرش هیدرولیکی (L)، طول گرداب (L_p)، عمق گرداب (Y_p) و اعماق مزدوج پرش هیدرولیکی ایجاد شده (Y_2, Y_1) را محاسبه نمود. رند در مطالعات خویش ۳ حالت مختلف از رژیم‌های جریان را در پایین‌دست شیب‌شکن در نظر گرفت و به این نتیجه رسید که شکل‌گیری هریک از این رژیم‌ها به عمق پایاب و مشخصات هیدرولیکی کانال نظیر شیب، زبری و شعاع هیدرولیکی بستگی دارد. رند همچنین عدد بی‌بعدی را به نام عدد شیب‌شکن به صورت رابطه زیر تعریف نمود:

$$D = \frac{q^2}{gh^3} = \left(\frac{Y_c}{h} \right)^3 \quad (۴-۲)$$

وی نتایج آزمایشات خود را به صورت توابعی از عدد بی‌بعد D در صفحه لگاریتمی ترسیم نمود و با برازش منحنی-های حاصل از داده‌های آزمایشگاهی رابطه‌های زیر را به دست آورد:

$$\frac{Y_1}{h} = 0.54D^{0.425} = 0.54 \left(\frac{Y_c}{h} \right)^{1.275} \quad (۵-۲)$$

$$\frac{Y_2}{h} = 1.66D^{0.27} = 1.66 \left(\frac{Y_c}{h} \right)^{0.81} \quad (۶-۲)$$

وی با تقسیم رابطه (۶-۲) بر رابطه (۵-۲) به رابطه زیر رسید:

$$\frac{Y_2}{Y_1} = \frac{3.07}{D^{0.155}} = \frac{3.07}{\left(\frac{Y_c}{h} \right)^{0.465}} \quad (۷-۲)$$

رابطه (۷-۲) تطابق خوبی با رابطه بین اعماق مزدوج حاصل از رابطه زیر داشته است:

$$\frac{Y_2}{Y_1} = \frac{3.07}{D^{0.155}} = \frac{3.07}{\left(\frac{Y_c}{h} \right)^{0.465}} \quad (۸-۲)$$

همچنین رند رابطه بین عدد فرود و عدد شیب‌شکن را به شکل زیر بیان نمود:

$$D = Fr^2 \left(\frac{Y_1}{h} \right)^3 \quad (۹-۲)$$

رند برای محاسبه طول گرداب (L_p)، از رابطه سقوط آزاد برای ذره استفاده کرد و به رابطه زیر رسید:

$$\frac{L_p}{h} = 1.98 \sqrt{\frac{y_c}{h} (1 + 0.357 \frac{y_c}{h})} = 1.98 \sqrt{D^{1/3} + 0.357 D^{2/3}} \quad (۱۰-۲)$$

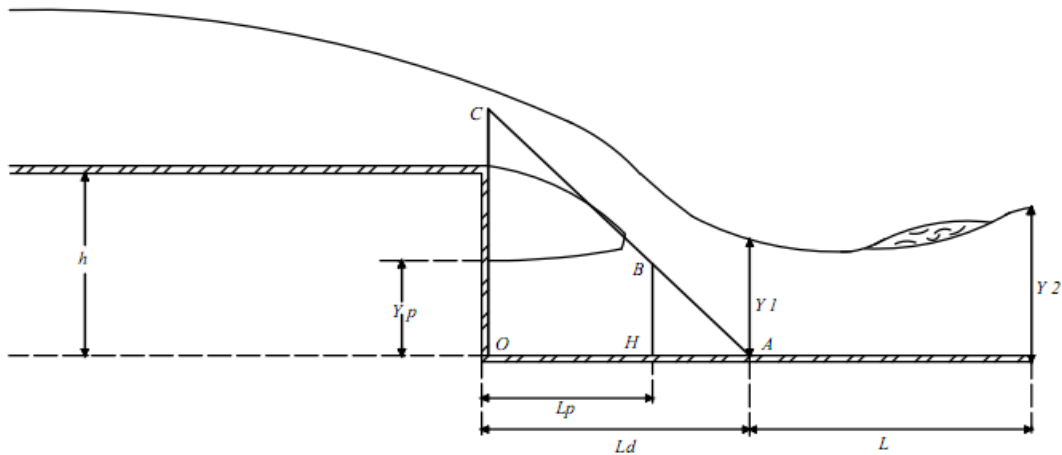
ممکن است منجر به L_d به جای L برای طراحی حوضچه آرامش حائز اهمیت است و جایگزینی L_d از آنجا که تعیین

³ Rand

یک طراحی نامناسب، به خصوص در دبی‌های پایین شود، رند با رسم نموداری بر روی دستگاه مختصات لگاریتمی بوده است و برازش منحنی به رابطه زیر دست یافت: L_d/h که محور افقی آن عدد شیب‌شکن و محور قائم آن

$$\frac{L_d}{h} = 4.3D^{0.27} \quad (11-2)$$

همچنین رند با نوشتن تشابه هندسی بین دو مثلث OAC و BHA در شکل (۲-۲)، به رابطه (۱۲-۲) دست یافت:



شکل (۲-۲): شکل استفاده شده توسط رند برای به دست آوردن L_d [۵]

$$\frac{h + \frac{Y_0}{2}}{L_d} = \frac{Y_p}{L_d - L_p} \quad (12-2)$$

و با جایگذاری $h - Y_p$ به جای h در رابطه (۱۰-۲) به رابطه (۱۳-۲) برای محاسبه L_p رسید:

$$L_p = 1.98 \sqrt{Y_c (h + 0.357 Y_c - Y_p)} \quad (13-2)$$

با جایگذاری رابطه (۱۳-۲) در رابطه (۱۲-۲)، رابطه (۱۴-۲) به دست می‌آید:

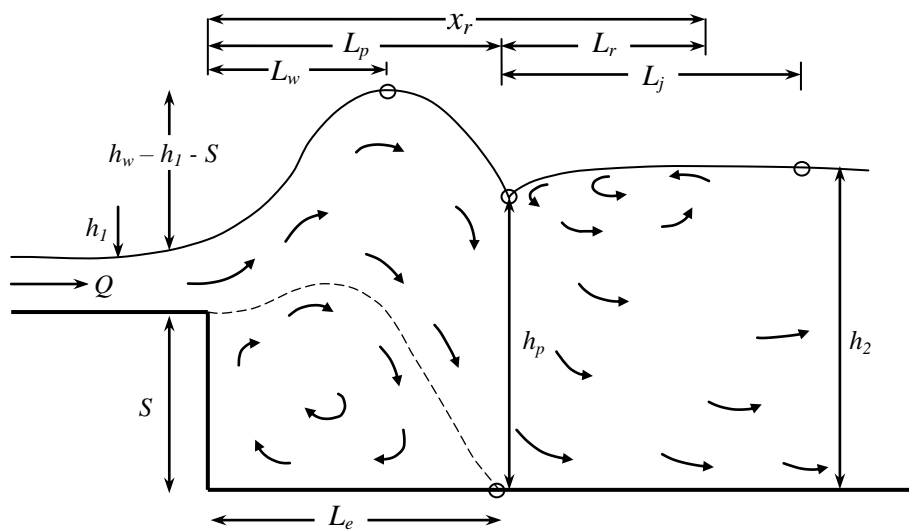
$$\frac{L_d}{h} = \frac{1.98(1 + 0.357 \frac{Y_c}{h}) \sqrt{\frac{Y_c}{h}}}{\sqrt{1 + 0.357 \frac{Y_c}{h} - \frac{Y_p}{h}}} \quad (14-2)$$

رند رابطه بین Y_p/h و عدد شیب‌شکن را با رسم این دو پارامتر نسبت به هم بر روی دستگاه مختصات لگاریتمی و برازش منحنی، به صورت زیر تعریف کرد:

$$\frac{Y_p}{h} = D^{0.22} \quad (15-2)$$

بدین ترتیب هندسه جریان در یک شیب‌شکن قائم، به شکل پارامترهای بی‌بعدی که تابعی از عدد شیب‌شکن بوده‌اند، بیان شدند [۵].

کاواگوشی^۴ و هگر^۵ در سال (۱۹۹۰) طی یک تحقیق آزمایشگاهی، مشخصات و ویژگی‌های جریان‌های موجی شکل را در شیب‌شکن‌های قائم به طور گسترده مورد بررسی قرار دادند. این محققین آزمایشات خود را در یک کانال مستطیلی افقی به طول ۱۰ متر، ارتفاع ۰/۷ متر و عرض ۰/۵ متر انجام دادند. دو شیب‌شکن به ارتفاع‌های ۵ سانتی‌متر و ۷/۷ سانتی‌متر در آزمایشات استفاده شده و یک دریچه‌ی قائم لبه‌تیز در ۲۰ سانتی‌متری بالادست شیب‌شکن برای کنترل هد جریان فوق‌بحرانی نصب شده بود. عمق پایاب در پایین‌دست شیب‌شکن، توسط یک سرریز مایل که در انتهای خروجی کانال تعبیه شده بود، تغییر می‌کرد. در این آزمایشات عمق پایاب به تدریج افزایش داده شده و تغییرات حاصل در جریان مورد بررسی قرار گرفتند. مشاهدات این محققین نشان می‌دهند که موج حداکثر^۶، موجی با حداکثر ارتفاع (h_{2w}) را ایجاد می‌کند و افزایش عمق پایاب به میزان بیشتر از h_{2w} سبب شکست امواج شده و نخستین پرش‌های A را ایجاد می‌کند. کاواگوشی و هگر پارامترهای مورد بررسی خود را به صورت شماتیک در شکل (۳-۲) نشان داده‌اند. در این شکل ارتفاع موج در نقطه‌ی حداکثر، L_e طول ناحیه‌ی جدایش کف، (h_p, L_p) مختصات نقطه‌ی غوطه‌وری، L_r طول غلتابه‌ی سطحی، L_w فاصله‌ی شیب‌شکن تا نقطه‌ی تشکیل موج حداکثر و L_j طول پرش است.



شکل (۳-۲): طرح شماتیک مشخصات جریان روی شیب‌شکن [۶]

همچنین نقطه‌ی پایان پرش ($x_r = L_p + L_r$) از روی محو شدن حباب‌های هوا تشخیص داده شده و نقطه‌ای که در آن حباب‌های هوا تقریباً از بین رفته بودند به عنوان نقطه‌ی پایان پرش در نظر گرفته شد. این محققین نسبت عمق ثانویه‌ی جریان را برای جریان‌های موجی شکل (Y_w) به صورت رابطه‌ی (۱۶-۲) تعریف کردند:

$$Y_w = Y^* + \Delta Y_w \quad (16-2)$$

⁴ Kawagoshi

⁵ Hager

⁶ Maximum Wave

که در رابطه‌ی فوق Y^* نسبت عمق ثانویه‌ی جریان در پرش‌های هیدرولیکی کلاسیک بوده و به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$Y^* = \frac{1}{2} \left[(1+8F_1^2)^{1/2} - 1 \right] \sim \sqrt{2}F_1 - \frac{1}{2}, \quad F_1 > 2 \quad (17-2)$$

همچنین ΔY_w توسط رابطه‌ی (۱۸-۲) تعریف می‌شود:

$$\Delta Y_w = S \left[1 - 0.135S^{-5/9}(F_1 - 1) \right] \quad (18-2)$$

نسبت عمق ثانویه‌ی جریان برای پرش $A (Y_A = h_2/h_1)$ نیز به صورت زیر تعریف شده است:

$$Y_A = Y^* + \Delta Y_A \quad (19-2)$$

که در آن $\Delta Y_A = (13/12)S \approx S$. کاواگشی و هگر با رسم پارامتر Y_w نسبت به پارامتر F_1 ، در یک نمودار، به این نتیجه رسیدند که عمق پایاب در جریان‌های موجی کمتر از عمق نظیر در پرش‌های هیدرولیکی کلاسیک بوده و در نتیجه افت انرژی در جریان‌های موجی بیشتر است. همچنین ایشان با تعریف پارامتری به نام عدد فرود شیب‌شکن به صورت رابطه‌ی (۲۰-۲) و تعریف پارامتر f به صورت رابطه‌ی (۲۱-۲)، تمامی پارامترهای موجود در شکل (۲-۳) را برحسب این دو پارامتر تعریف نمودند:

$$F_d = \frac{V_1}{[g(h_2 - S)]^{1/2}} = \left(\frac{h_1}{h_2 - S} \right)^{1/2} F_1 \quad (20-2)$$

$$f = \frac{V_1^2 h_2}{2g h_1} = \left(\frac{h_2}{2} \right) F_1^2 \quad (21-2)$$

$$h_w / f = 1.7 F_d^{-3.6} \quad (22-2)$$

$$L_w / f = 1.75 F_d^{-3.6} \quad (23-2)$$

$$h_p / f = 1.0 F_d^{-3.6} \quad (24-2)$$

$$L_p / f = 2.9 F_d^{-3.6} \quad (25-2)$$

$$x_r / f = 6.0 F_d^{-3.6} \quad (26-2)$$

$$x_j / f = 7.1 F_d^{-3.6} \quad (27-2)$$

$$L_e / f = 3.2 F_d^{-3.6} \quad (28-2)$$

در نتیجه:

$$L_j / L_r = (x_j - L_p) / (x_r - L_p) = (7.1 - 2.9) \times (6 - 2.9) = 1.35 \quad (31-2)$$

که این نسبت برای پرش‌های هیدرولیکی کلاسیک برابر $1/33$ است [۶].

راجاراتنام^۷ و چمنی در سال (۱۹۹۵) با مطالعه بر روی فرضیات وایت^۸ و گیل^۹، روابطی را برای تعیین افت انرژی در شیب‌شکن‌ها ارائه دادند. آنها مطالعات آزمایشگاهی خود را بر روی دو شیب‌شکن به ارتفاع‌های ۰/۲۵ متر و ۰/۶۲ متر انجام دادند و به اندازه‌گیری پارامترهای مربوط به شیب‌شکن پرداختند. این پارامترها و همچنین پروفیل‌های سرعت در بالادست و پایین‌دست شیب‌شکن محاسبه شدند و با برازش منحنی‌هایی بر روی این داده‌ها، به رابطه زیر برای تعیین افت انرژی دست یافتند:

$$\frac{\Delta E}{E_o} = 0.896 \left(\frac{Y_c}{h} \right)^{-0.766} \quad (32-2)$$

همچنین این دو محقق روشی را برای پیش‌بینی مشخصات شیب‌شکن ارائه دادند. آنها با استفاده از معادلات مومنتوم، انرژی و پیوستگی به چهار معادله (۲-۳۳) تا (۲-۳۶) رسیدند:

$$\rho q V \cos \theta + \frac{1}{2} \gamma Y_p^2 = \rho q V_1 + \frac{1}{2} \gamma Y_1^2 \quad (33-2)$$

$$h + \frac{3}{2} Y_c = \frac{V^2}{2g} + Y_p \quad (34-2)$$

$$\frac{1}{2} \gamma Y_c^2 + \rho q V_c = \rho q V \cos \theta \quad (35-2)$$

$$h + \frac{3}{2} Y_c = \frac{V^2}{2g} + Y_p \quad (36-2)$$

برای به دست آوردن پنج مجهول θ ، Y_p ، Y_1 ، V_1 و V یک معادله دیگر لازم بود. این معادله پنجم با برازش منحنی روی داده‌های آزمایشگاهی موجود به صورت رابطه‌ی (۲-۳۷) تعریف شده است:

$$\frac{Y_p}{h} = 1.107 \left(\frac{Y_c}{h} \right)^{0.719} \quad (37-2)$$

در نتیجه پنج مجهول ذکر شده با استفاده از معادلات فوق تعیین شدند. ΔE به دست آمده از روش نیمه‌تجربی فوق و نتایج حاصل از داده‌های آزمایشگاهی تطابق خوبی با یکدیگر داشته‌اند [۷].

و^{۱۰} و راجاراتنام در سال (۱۹۹۶) رژیم‌های مختلف جریان را در پایین‌دست یک سرریز لبه‌تیز مورد بررسی قرار دادند. آنها آزمایشات خود را در یک کانال آزمایشگاهی به طول ۹ متر، عرض ۰/۴۶۶ متر و ارتفاع ۰/۶ متر با دیواره‌های شیشه‌ای انجام دادند. شش سری آزمایش روی سرریزهایی به ارتفاع ۵۳/۵ میلی‌متر، ۱۰۰ میلی‌متر، ۱۵۰ میلی‌متر، ۲۰۳/۵ میلی‌متر، ۲۵۰ میلی‌متر و ۳۰۳/۵ میلی‌متر انجام شد. در هر سری از آزمایشات، یک سرریز با ارتفاع مشخص

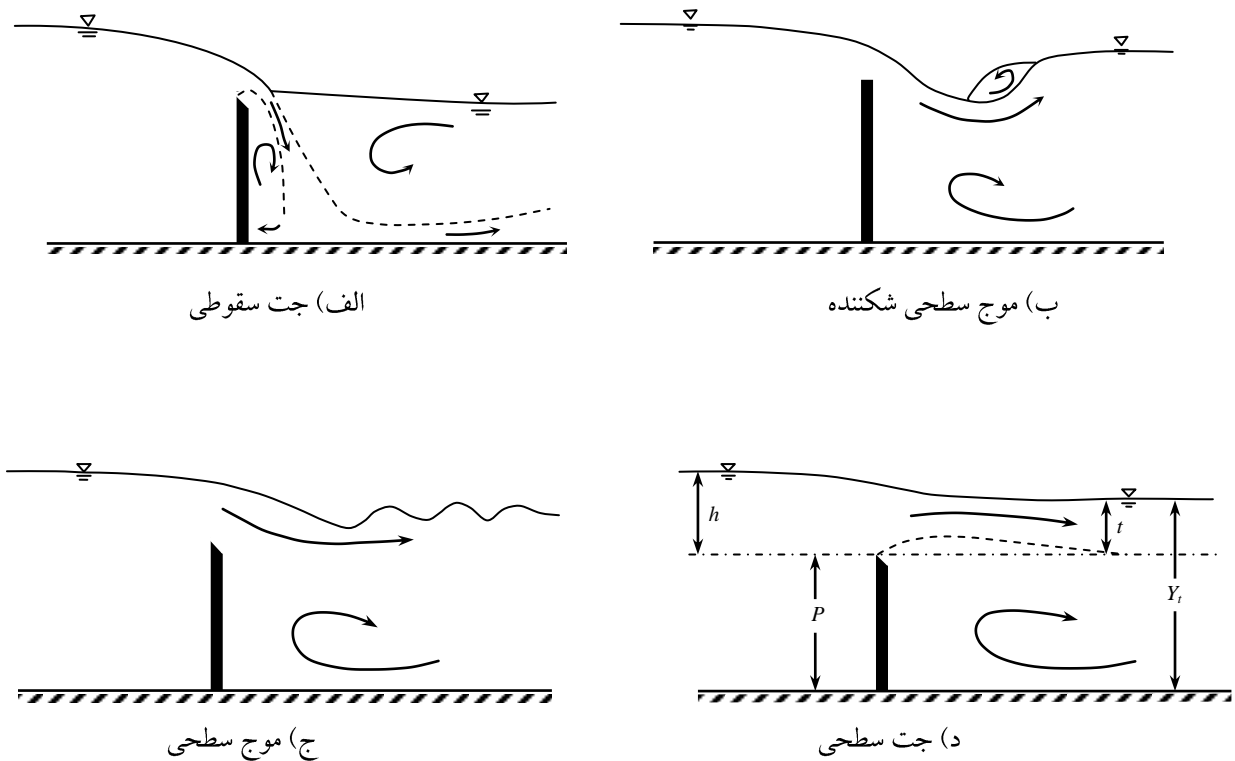
⁷ Rajaratnam

⁸ White

⁹ Gill

¹⁰ Wu

تحت دبی‌های متفاوت مورد آزمایش قرار گرفت و برای هر دبی سطحی که در آن رژیم‌های مختلف شکل می‌گرفتند، با استفاده از تکنیک ماده رنگی مشخص شد. مشاهدات این آزمایش‌ها نشان دادند که به ازای دبی ثابت، با افزایش نسبت t/h که t عمق جریان پایین دست بالاتر از سطح سرریز و h ارتفاع سرریز است، جریان مستغرق روی سرریز به ۴ رژیم مختلف تقسیم‌بندی می‌شود. این رژیم‌ها عبارتند از: (۱) جت سقوطی (۲) موج شکننده (۳) موج سطحی (۴) جت سطحی (شکل ۲-۴).



شکل (۲-۴): شمایی از وضعیت رژیم‌های جریان در سرریزهای لبه تیز [۸]

در رژیم جت سقوطی، جریان روی سرریز در کانال آب پایین دست فرو می‌رود، مثل یک جت سطحی پخش شده و نهایتاً به بستر کانال ضربه می‌زند. در سه رژیم دیگر که به عنوان رژیم جریان سطحی معرفی می‌شوند، جریان به صورت یک جت سطحی روی آب باقی می‌ماند و ضخامت این جت در اثر اختلاط‌های آشفته افزایش می‌یابد. وو و راجاراتنام با تعریف پارامتر λ به صورت $\lambda = [(g(h-t))^{1/2}/(q/y_1)]$ و رسم نمودار t/h نسبت به λ ، محدوده تغییرات رژیم‌های جریان را توسط منحنی‌های (۱) و (۲) مشخص نمودند (شکل ۲-۵). این دو منحنی حدود بالا و پایین ناحیه انتقال را مشخص می‌کنند. در محدوده بالای منحنی (۲) رژیم جریان سطحی و در ناحیه زیر منحنی (۱) رژیم جت سقوطی حاکم است. در ناحیه بین این دو منحنی جریان حالت انتقالی دارد. اگر عمق پایاب به تدریج افزایش یابد رژیم جت سقوطی به سمت منحنی (۲) رفته و به رژیم جت سقوطی تبدیل می‌شود. بالعکس با کاهش تدریجی عمق پایاب رژیم جت سطحی به سمت منحنی (۱) رفته و به رژیم جت سقوطی تبدیل می‌شود. این دو منحنی توسط دو رابطه‌ی زیر توصیف می‌شوند: