





دانشگاه آزاد اسلامی

واحد تهران مرکزی

دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران
پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد (M.Sc)

گرایش: مهندسی آب

عنوان :

مدل سازی عددی شیب شکن قایم
با جریان زیربحرانی در بالادست

استاد راهنما :

دکتر محمدرضا چمنی

استاد مشاور:

دکتر هومن حاجی کندی

پژوهشگر :

منیره السادات موسوی ریزی

زمستان ۱۳۹۱



ISLAMIC AZAD UNIVERSITY

Central Tehran Branch

Faculty of Engineering - Department of Civil Engineering

"M.Sc" Thesis

On Water Engineering

Subject:

Numerical modeling of vertical drop with subcritical flow in upstream

Advisor:

Dr.Mohammad Reza Chamani

Reader:

Dr.Hooman Hajikandi

By:

Monire sadat Mousavi

Winter 2013

تشکر و قدردانی:

بی‌شک آنچه ره‌گشای پویندگان راه علم و دانش می‌باشد بعد از یاری خداوند، اندوخته‌های خردمندانی است که با تجربه و علم و دانش خود روشنی‌بخش جهالت نوآموزان در این مسیر می‌باشد.

با سپاس از ایزد یکتا که مرا در همه مراحل زندگی یاری کرد.

و با سپاس از مادر مهربانم که همیشه یار و همراهم بود و مرا عشق آموختن، آموخت.

و با سپاس از استاد ارجمندم جناب آقای دکتر محمد رضا چمنی که در تهیه‌ی این پایان‌نامه مرا مساعدت و راهنمایی نموده و با نظرات ارزشمندشان مشکل‌گشای من در مراحل مختلف بوده‌اند.

تقدیم بہ :

مادر عزیزم

کہ الہام بخش من

در لحظات حساس

زندگی بود

و خواہرم

کہ مشوقم بود

فهرست مطالب

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
	فصل اول : کلیات
۳	مقدمه.....
۴	۱-۱- جریان در مجرای روباز.....
۴	۱-۲- وضعیت جریان در کانال‌های روباز.....
۵	۱-۲-۱- جریان فوق‌بحرانی.....
۵	۱-۲-۲- جریان زیربحرانی.....
۵	۱-۲-۳- جریان بحرانی.....
۵	۱-۳- شیب‌شکن‌ها.....
۷	۱-۴- انواع شیب‌شکن‌ها.....
۷	۱-۴-۱- شیب‌شکن‌های قائم.....
۷	۱-۴-۲- شیب‌شکن‌های مایل.....
۸	۱-۴-۳- شیب‌شکن‌های پلکانی.....
۹	۱-۵- انواع شیب‌شکن‌های قائم.....
۹	۱-۵-۱- تقسیم‌بندی شیب‌شکن‌های قائم از نظر نوع جریان در بالادست.....
۹	۱-۵-۱-۱- شیب‌شکن‌های قائم با جریان زیربحرانی در بالادست.....
۹	۱-۵-۱-۲- شیب‌شکن‌های قائم با جریان فوق‌بحرانی در بالادست.....
۹	۱-۵-۲- تقسیم‌بندی شیب‌شکن‌های قائم از نظر شکل هندسی.....

- ۱-۲-۵-۱- شیب شکن های قائم ساده..... ۱۰
- ۱-۲-۵-۲- شیب شکن های قائم مانع دار..... ۱۰
- ۱-۲-۵-۳- شیب شکن های قائم با شیب منفی در پایین دست..... ۱۰
- ۱-۲-۵-۴- شیب شکن های قائم با شیب مثبت در پایین دست..... ۱۰
- ۶-۱- هوادهی در شیب شکن ها..... ۱۱
- ۷-۱- اهداف تحقیق حاضر..... ۱۲

فصل دوم : پیشینه ی تحقیق

- مقدمه..... ۱۴
- ۱-۲- مطالعه ی بخمیتف (۱۹۳۲)..... ۱۵
- ۲-۲- مطالعه ی مور (۱۹۴۳)..... ۱۶
- ۳-۲- مطالعه ی وایت (۱۹۴۳)..... ۲۰
- ۴-۲- مطالعه ی راوز (۱۹۴۳)..... ۲۴
- ۵-۲- مطالعه ی رند (۱۹۵۵)..... ۲۵
- ۶-۲- مطالعه ی گیل (۱۹۷۹)..... ۲۸
- ۸-۲- راجاراتنام و چمنی (۱۹۹۵)..... ۳۰
- ۹-۲- راجاراتنام و وو (۱۹۹۸)..... ۳۳
- ۱۰-۲- فرو (۱۹۹۹)..... ۳۷
- ۱۱-۲- چمنی و بیرامی (۲۰۰۲)..... ۴۰
- ۱۲-۲- لین و همکاران (۲۰۰۷)..... ۴۳

فصل سوم : مدل سازی عددی

- مقدمه..... ۴۸

۴۹	۳-۱- مروری بر دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)
۴۹	۳-۲- آشنایی با روش حجم محدود
۵۰	۳-۳- نرم افزار Ansys Cfx
۵۰	۳-۳-۱- دلایل انتخاب نرم افزار Ansys Cfx
۵۱	۳-۳-۲- معادلات حاکم
۵۱	۳-۳-۲-۱- رابطه پیوستگی
۵۱	۳-۳-۲-۲- رابطه مومنتوم
۵۴	۳-۳-۲-۳- معادلات آشفته‌گی
۵۴	۳-۳-۲-۳-۱- مدل آشفته‌گی $k-\epsilon$
۵۵	۳-۳-۲-۴- روش‌های شبیه‌سازی جریان‌های چندفازی
۵۵	۳-۳-۲-۴-۱- روش اولری-لاگرانژی، استفاده از مدل <i>DPM</i>
۵۶	۳-۳-۲-۴-۲- روش‌های اولری-اولری
۵۶	۳-۳-۲-۴-۱- مدل VOF (حجم سیال) برای شبیه‌سازی جریان‌های لایه‌لایه
۵۶	۳-۳-۲-۴-۲- مدل Mixture
۵۷	۳-۳-۲-۴-۳- مدل اولری-اولری
۵۷	۳-۳-۳- مراحل عمومی برای شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم افزار Ansys Cfx
۵۸	۳-۳-۳-۱- ساخت هندسی مدل
۵۹	۳-۳-۳-۲- شبکه‌بندی مدل

- ۶۱.....۳-۳-۳- نوع تحلیل
- ۶۳.....۴-۳-۳- شرایط مرزی
- ۶۷.....۴- حل عددی نرم افزار
- ۶۹.....۵-۳- نتایج عددی

فصل چهارم : نتایج و بحث

- ۷۲.....مقدمه
- ۷۴.....۲-۴ - عمق گرداب
- ۷۶.....۳-۴ - طول گرداب
- ۷۷.....۲-۳-۴ - مقایسه‌ی نتایج عددی طول نسبی گرداب در دو حالت هوادهی و بدون هوادهی
- ۷۸.....۴-۴ - عمق پایاب
- ۷۹.....۲-۴-۴ - مقایسه‌ی نتایج عددی عمق نسبی پایاب در دو حالت هوادهی و بدون هوادهی
- ۸۰.....۳-۴-۴ - مقایسه‌ی نتایج عددی عمق نسبی پایاب در حالت هوادهی با نتایج عددی و آزمایشگاهی
- ۸۱.....۵-۴ - عمق لبه‌ی شیب‌شکن
- ۸۱.....۱-۵-۴ - مقایسه‌ی نتایج عددی عمق نسبی لبه‌ی شیب‌شکن در حالت هوادهی و بدون هوادهی با نتایج تئوری راوز(۱۹۴۳)
- ۸۲.....۶-۴ - افت انرژی نسبی
- ۸۲.....۱-۶-۴ - مقایسه‌ی نتایج عددی افت انرژی نسبی در حالت هوادهی با نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی
- ۸۳.....۲-۶-۴ - مقایسه‌ی افت انرژی نسبی در دو حالت هوادهی و بدون هوادهی

۴-۶-۳- مقایسه‌ی نتایج عددی افت انرژی نسبی در حالت هوادهی با نتایج عددی و

آزمایشگاهی..... ۸۶

فصل پنجم : نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۵-۱- نتیجه‌گیری..... ۹۱

۵-۲- پیشنهادات..... ۹۰

فهرست منابع..... ۹۱

چکیده انگلیسی..... ۹۴

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱ پروفیل طولی از مسیر کانال.....	۶
شکل ۲-۱ نمایی از شیب‌شکن قائم با اجزای هندسی و هیدرولیکی.....	۷
شکل ۴-۱ نمایی از شیب‌شکن پلکانی با اجزای مختلف هندسی و هیدرولیکی.....	۹
شکل ۵-۱ انواع شیب‌شکن قائم:الف) شیب‌شکن قائم ساده،ب) شیب‌شکن قائم مانع دار،ج) شیب‌شکن قائم با شیب منفی در پایین‌دست،د) شیب‌شکن قائم با شیب مثبت در پایین‌دست.....	۱۰
شکل ۱-۲ نمایی از شیب‌شکن قائم.....	۱۶
شکل ۲-۲ نمایی از شیب‌شکن قائم با اجزای مختلف هیدرولیکی و مقاطع بحرانی.....	۱۷
شکل ۲-۴ منحنی افت انرژی.....	۱۹
شکل ۲-۳ منحنی انرژی در بالادست و پایین‌دست کانال.....	۱۹
شکل ۲-۵ حجم کنترل استفاده شده توسط مور.....	۱۹
شکل ۲-۶ نمایی از برخورد جت به کف کانال پایین‌دست الف) برای شیب‌شکن ب) برای جت آزاد.....	۲۱
شکل ۲-۷ حجم کنترل استفاده شده توسط وایت.....	۲۱
شکل ۲-۸ حجم کنترل استفاده شده توسط روس.....	۲۴
شکل ۲-۹ شکل استفاده شده توسط رند.....	۲۵
شکل ۲-۱۰ مشخصات جت ریزشی استفاده شده توسط چانسون.....	۳۰
شکل ۲-۱۱ داده‌های آزمایشگاهی افت انرژی نسبی در مقابل عمق بحرانی.....	۳۱
شکل ۲-۱۲ حجم کنترل‌های استفاده شده توسط چمنی و راجاراتنام.....	۳۲
شکل ۲-۱۳ داده‌های آزمایشگاهی افت انرژی نسبی در مقابل عمق بحرانی.....	۳۳
شکل ۲-۱۴ رژیم‌های مختلف جریان.....	۳۴

- شکل ۲-۱۵ داده‌های آزمایشگاهی عمق لبه و عمق کانال پایین دست..... ۳۵
- شکل ۲-۱۶ ناحیه‌ی مختلف رژیمهای جریان..... ۳۶
- شکل ۲-۱۷ مقایسه‌ی داده‌های آزمایشگاهی و رابطه‌ی (۲-۷۷)..... ۳۸
- شکل ۲-۱۸ مقایسه‌ی داده‌های آزمایشگاهی و رابطه‌ی (۲-۸۱)..... ۴۰
- شکل ۲-۱۹ حجم کنترل استفاده شده توسط چمنی و بیرامی..... ۴۰
- شکل ۲-۲۰ مقایسه‌ی نتایج تئوری چمنی و بیرامی با داده‌های آزمایشگاهی در حالت جریان زیربحرانی الف) عمق نسبی گرداب، ب) افت انرژی نسبی..... ۴۲
- شکل ۲-۲۱ مقایسه‌ی نتایج تئوری چمنی و بیرامی با داده‌های آزمایشگاهی در حالت جریان فوق‌بحرانی الف) عمق نسبی گرداب، ب) افت انرژی نسبی..... ۴۳
- شکل ۲-۲۲ نمایی از مختصات استفاده شده در شیب‌شکن لین و همکاران..... ۴۴
- شکل ۲-۲۳ داده‌های آزمایشگاهی و تئوری سرعت جت..... ۴۴
- شکل ۲-۲۴ نمودار بیبعد شده‌ی پروفیل‌های سرعت..... ۴۵
- شکل ۲-۲۵ داده‌های آزمایشگاهی دبی چرخشی در گرداب شیب‌شکن..... ۴۶
- شکل ۲-۲۶ داده‌های آزمایشگاهی پروفیل سرعت در گرداب شیب‌شکن در حالت $d/h=0.146$ ۴۶
- شکل ۳-۱ شبکه‌بندی محدوده‌ی جریان..... ۶۰
- شکل ۳-۲ شمایی از المان‌های مثلثی و مستطیلی..... ۶۰
- شکل ۳-۳ شرایط مرزی تعریف شده برای مدل..... ۶۴
- شکل ۳-۴ الگوی جریان شبیه‌سازی شده در حالت هواده‌ی، توسط نرم‌افزار Ansys Cfx..... ۶۸
- شکل ۳-۵ الگوی جریان شبیه‌سازی شده در حالت بدون هواده‌ی، توسط نرم‌افزار Ansys Cfx..... ۶۸
- شکل ۴-۱ تغییرات عمق نسبی گرداب بر حسب دبی نسبی..... ۷۴
- شکل ۴-۲ تغییرات عمق نسبی گرداب بر حسب دبی نسبی..... ۷۵
- شکل ۴-۳ تغییرات طول نسبی گرداب بر حسب دبی نسبی..... ۷۶
- شکل ۴-۴ تغییرات طول نسبی گرداب بر حسب دبی نسبی..... ۷۷

- شکل ۴-۵ تغییرات عمق نسبی پایاب بر حسب دبی نسبی..... ۷۸
- شکل ۴-۶ تغییرات عمق نسبی پایاب بر حسب دبی نسبی..... ۷۹
- شکل ۴-۷ تغییرات عمق نسبی پایاب بر حسب دبی نسبی..... ۸۰
- شکل ۴-۸ تغییرات عمق نسبی لبه‌ی شیب‌شکن بر حسب دبی نسبی..... ۸۱
- شکل ۴-۹ پروفیل سرعت در محل d_1 برای دبی 40 lit/s..... ۸۳
- شکل ۴-۱۰ تغییرات افت انرژی نسبی بر حسب دبی نسبی..... ۸۴
- شکل ۴-۱۱ تغییرات افت انرژی نسبی بر حسب دبی نسبی..... ۸۵
- شکل ۴-۱۲ تغییرات افت انرژی نسبی بر حسب دبی نسبی..... ۸۶
- شکل ۴-۱۳ تغییرات افت انرژی نسبی بر حسب دبی نسبی..... ۸۷

فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان
۶۲.....	۱-۳ خصوصیات فیزیکی تعریف شده برای مدل
۶۴.....	۲-۳ شرط مرزی ورودی
۶۵.....	۳-۳ شرط مرزی خروجی
۶۵.....	۴-۳ شرط مرزی سطح آزاد
۶۶.....	۵-۳ شرط مرزی دیواره و بستر
۶۶.....	۶-۳ شرط مرزی تهویه‌ی شیب‌شکن
۶۹.....	۷-۳ نتایج عددی برای شیب‌شکن قائم به ارتفاع ۶۲ سانتی‌متر در حالت هوادهی شده
۷۰.....	۸-۳ نتایج عددی برای شیب‌شکن قائم به ارتفاع ۶۲ سانتی‌متر در حالت بدون هوادهی
۷۰.....	۹-۳ نتایج عددی برای شیب‌شکن قائم به ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر در حالت هوادهی
۸۷.....	۱-۴ افت انرژی محاسبه شده از رابطه‌ی (۲-۴) برای مدل ۱
۸۸.....	۲-۴ افت انرژی محاسبه شده از پروفیل سرعت در محل d_1 برای مدل ۱
۸۸.....	۳-۴ افت انرژی محاسبه شده از پروفیل سرعت در محل d_1 برای مدل ۲
۸۹.....	۴-۴ افت انرژی محاسبه شده از پروفیل سرعت در محل d_1 برای مدل ۳
۸۹.....	۵-۴ معادلات همبستگی به دست آمده بین پارامترهای بی بعد توسط محققان

چکیده

شیب‌شکن‌ها از جمله متداول‌ترین سازه‌های هیدرولیکی مستهلک‌کننده‌ی انرژی هستند که در شبکه‌های آبیاری و زه‌کشی، آبراهه‌های فرسایش‌پذیر، سیستم‌های تصفیه‌ی آب و جمع‌آوری و دفع فاضلاب استفاده می‌شوند. این سازه‌ها با توجه به توپوگرافی زمین برای انتقال آب از یک ارتفاع بالاتر به پایین‌تر، کاهش انرژی جنبشی ناشی از سقوط آب و اعمال سرعت بهینه در کانال‌ها و شبکه‌های آبیاری و زه‌کشی به‌کار می‌روند. از شیب‌شکن‌ها نیز در تصفیه‌خانه‌های آب و فاضلاب برای هوادهی طبیعی جریان استفاده می‌شود. جریان در بالادست شیب‌شکن ممکن است زیربحرانی یا فوق‌بحرانی باشد. در حالت جریان زیربحرانی در بالادست، عمق جریان در حوالی لبه‌ی شیب‌شکن، بحرانی می‌شود و پس از جاری شدن به پایین‌دست شیب‌شکن، جریان حالت فوق‌بحرانی پیدا می‌کند و اگر جریان بالادست شیب‌شکن فوق‌بحرانی باشد، رفتار آب به صورت جت آبی خواهد بود.

در این تحقیق، الگوی دوبعدی جریان در شیب‌شکن قائم با حالت زیربحرانی در بالادست، با استفاده از نرم‌افزار *Ansys Cfx* که جریان سیال را به روش حجم محدود تحلیل می‌نماید، شبیه‌سازی شده است. شبیه‌سازی الگوی جریان با بررسی مدل‌های مختلف آشفتگی، شرایط مرزی مختلف و سایر پارامترهای مؤثر در مدل عددی برای یک دبی در دو حالت هوادهی در زیر جت ریزشی و بدون هوادهی انجام شده و نتایج مربوط به عمق گرداب، طول گرداب، عمق پایاب، عمق لبه‌ی شیب‌شکن و در نهایت افت انرژی نسبی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است و مورد صحت‌سنجی قرار گرفته است. سپس مناسب‌ترین مدل آشفتگی و شرایط مرزی انتخاب شده و مدل‌سازی جریان برای دبی‌های مختلف انجام گرفته است. نتایج به‌دست آمده از تحلیل عددی به شکل منحنی‌های بی‌بعد برای نشان‌دادن تغییرات عمق نسبی لبه‌ی شیب‌شکن، عمق نسبی گرداب، طول نسبی گرداب، عمق نسبی پایاب و افت انرژی نسبی برحسب دبی نسبی بر روی نمودار رسم شده است. مقایسه‌ی این نتایج نشان می‌دهد که در حالت هوادهی، طول نسبی گرداب، عمق نسبی پایاب و افت انرژی نسبی تطابق بسیار خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. مقادیر عمق نسبی گرداب اختلاف بسیار کمی با نتایج آزمایشگاهی دارد که این موضوع به دلیل نوسان‌داشتن سطح آب است که اندازه‌گیری دقیق آن را دشوار می‌سازد. همچنین، عمق لبه‌ی شیب‌شکن اختلاف قابل‌توجهی با نتایج آزمایشگاهی دارد. در حالت بدون هوادهی، طول نسبی گرداب بیشتر از حالت هوادهی است، این موضوع به‌علت از بین‌رفتن فضای خالی زیر جت ریزشی در حالت بدون هوادهی است که باعث می‌شود زاویه‌ی پرتاب جت کمتر شود و برد افقی آن کاهش یابد. عمق پایاب و عمق لبه‌ی شیب‌شکن در دو حالت هوادهی و بدون هوادهی تطابق خوبی باهم دارند.

واژه‌های کلیدی: شیب‌شکن قائم، *Ansys Cfx*، پارامترهای هیدرولیکی، افت انرژی، روش حجم محدود

فصل اول :

کلیات

مقدمه

حیات و بقای بشر تمام موجودات زنده و انسان، بدون آب امکان‌پذیر نیست. آب شیرین و سالم و قابل دسترس در جهان هستی بسیار ارزشمند و کمیاب است. کشور ما جزو مناطق کم آب جهان به شمار می‌آید. به همین دلیل با توجه به نیازهای فزاینده‌ی بخش‌های مختلف مصرف، لازم است تا قسمت عمده‌ی آب قابل دسترس به نحو مناسبی استحصال و به درستی مدیریت شود. یکی از روش‌های استحصال و مدیریت بر منابع آب به منظور تأمین نیازهای شرب و بهداشت و صنایع و تولید محصولات کشاورزی و هم چنین کنترل سیلاب، احداث سازه‌های هیدرولیکی و انواع سدها است. سازه‌های هیدرولیکی برای کنترل، هدایت جریان و تثبیت سطح آب ساخته می‌شوند. امروزه از سازه‌های مختلفی نظیر مجاری روباز، لوله‌های تحت فشار، فلوم‌ها^۱، تنداب‌ها^۲، شیب‌شکن‌ها^۳، سیفون‌ها^۴، سرریزها^۵ و... استفاده می‌شود. هرکدام از این سازه‌ها کاربردهای خاص خود را دارا هستند و متناسب با کارایی و شرایط منطقه‌ای به کار گرفته می‌شوند. هنگامی که به علت وجود عوارض طبیعی، قسمت‌هایی از مسیر با شیب محاسبه شده برای بستر کانال باز، اختلاف زیاد داشته باشد، به طوری که با خاک‌برداری نتوان آن را اصلاح کرد، از شیب‌شکن استفاده می‌شود. چون شیب‌شکن‌ها معمولاً در قسمتی از مسیر کانال‌های روباز قرار می‌گیرند، ابتدا به تعریف جریان در مجاری باز پرداخته و سپس وضعیت جریان در این مجاری و پس از آن انواع شیب‌شکن‌ها بررسی می‌شود.

¹ Flumes

² Chutes

³ Drops

⁴ Siphons

⁵ Weirs

۱-۱- جریان در مجرای روباز

مجرای روباز به آن دسته از ساختمان‌های انتقال آب اطلاق می‌شود که آب در آن‌ها با سطح آزاد، جریان یافته و سطح آن با هواکره در تماس است. در تمام نقاط مسیر، فشار در سطح آزاد برابر فشار هواکره بوده و آب در تمام قسمت‌های مجرا، تحت فشار هواکره قرار می‌گیرد. کانال‌های روباز معمولی و کانال‌های بسته‌ی زیرزمینی که کاملاً پر نباشند از نمونه‌های مجاری روباز هستند.

۱-۲- وضعیت جریان در کانال‌های روباز

بر جریان آب در کانال‌های روباز، نیروهای مختلفی نظیر نیروهای ثقل، اینرسی، کشش سطحی و لزجت اثر می‌کند که در این میان از تأثیر نیروی کشش سطحی به علت ناچیز بودن، صرف‌نظر می‌شود. از بین نیروهای ثقل و لزجت، نیروهای ثقلی نقش مؤثرتری در کانال‌های روباز دارند.

تأثیر نیروهای ثقلی در قالب پارامتر دینامیکی بدون بعدی به نام عدد فرود^۱ مورد بررسی قرار می‌گیرد. عدد بدون بعد فرود متناسب با نسبت نیروی اینرسی به نیروی ثقل در هر مقطع از جریان در کانال‌های روباز به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gD}} \quad (1-1)$$

که در آن V سرعت متوسط جریان، g شتاب ثقل و D عمق هیدرولیکی در کانال‌ها است. عمق هیدرولیکی در کانال‌های روباز به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$D = \frac{A}{T} \quad (2-1)$$

که در آن A سطح مقطع جریان و T عرض مقطع جریان در سطح آزاد است. برای کانال‌های مستطیلی $D = d$ خواهد شد که d عمق جریان است. لذا، عدد فرود به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gd}} \quad (3-1)$$

¹ Froude Number

براساس تأثیر نیروی ثقل نسبت به نیروی اینرسی، سه وضعیت رفتاری مختلف از جریان در کانال‌ها
ی روباز مشاهده می‌شود:

۱-۲-۱- جریان فوق بحرانی^۱

اگر $Fr > 1$ باشد، جریان، فوق بحرانی می‌شود. به ازای دبی ثابت، عمق جریان، کم و سرعت، زیاد
است. جریان فوق بحرانی معمولاً توسط مقطع بالادست جریان کنترل می‌شود. جریان عبوری از زیر
دریچه‌ها با عمق بازشدگی کم و جریان در پایین دست سرریزهای لبه‌ی آبریز، نمونه‌های عملی از
این نوع جریان هستند. معمولاً سعی می‌شود که جریان در کانال‌های روباز به علت سرعت زیاد،
فوق بحرانی نشود.

۲-۲-۱- جریان زیر بحرانی^۲

اگر $Fr < 1$ باشد، جریان، زیر بحرانی می‌شود. در این حالت به ازای دبی ثابت، عمق جریان، زیاد و
سرعت آن کم می‌شود. جریان زیر بحرانی معمولاً توسط مقطع پایین دست جریان کنترل می‌شود. این
نوع جریان در شیب‌های ملایم و معکوس دیده می‌شود. جریان عبوری از روی آبشارها از نمونه
های عملی این جریان محسوب می‌شود.

۳-۲-۱- جریان بحرانی^۳

اگر $Fr = 1$ شود، جریان در کانال بحرانی است. جریان بحرانی حالت انتقال از جریان زیر بحرانی به
جریان فوق بحرانی و یا بالعکس است. در جریان بحرانی، عمق جریان برابر عمق بحرانی در کانال
است.

۳-۱- شیب شکن‌ها

در کانال‌های آبیاری پس از طرح و محاسبه‌ی ابعاد و مشخصات کانال، اگر شیب طبیعی زمین در
قسمت‌هایی از مسیر زیاد و تندتر از شیب مجاز کانال باشد و مخارج خاک‌ریزی و خاک‌کوبی در

¹ SuperCritical Flow

² SubCritical Flow

³ Critical

مقایسه با ایجاد پله‌های سقوط (آبشار) زیادتر باشد، از شیب‌شکن استفاده می‌شود، [شکل (۱-۱)]. این نوع سازه‌ها از جمله سازه‌های هیدرولیکی هستند که به سبب سادگی ساخت و بهره‌برداری از رایج‌ترین ساختمان‌های آبی جهت کاهش انرژی جریان آب در شبکه‌های آبیاری، آبراهه‌های فرسایش‌پذیر، سیستم‌های جمع‌آوری و تصفیه‌ی آب و فاضلاب هستند که معمولاً در ترکیب با انواع موانع و کف‌بند در پایین‌دست، می‌توانند حالت‌های متنوعی از سازه‌های هیدرولیکی مستهلک‌کننده‌ی انرژی را شکل دهند. هیدرولیک شیب‌شکن قایم به این صورت است که جریان فوق‌بحرانی یا زیربحرانی با عبور از روی شیب‌شکن به داخل حوضچه‌ی پایین‌دست ریزش می‌کند و باعث می‌شود تا انرژی مخرب آب به سه صورت اختلاط جریان با هوا، برخورد جریان با کف کانال پایین‌دست و چرخش آب در حوضچه‌ی گردابی از بین رود. به غیر از کاربرد اصلی فوق، ممکن است از شیب‌شکن‌ها در موارد زیر استفاده شود:

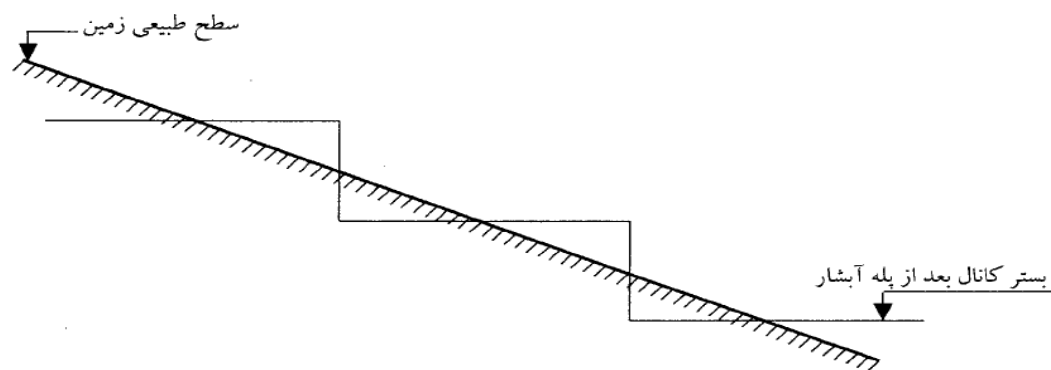
۱- تثبیت بستر آبراهه به دلیل تلف کردن انرژی اضافی.

۲- محدود کردن فرسایش جدار آبراهه‌ها.

۳- افزایش هوادهی جریان در اثر پرش هیدرولیکی و ایجاد تلاطم بیشتر (کاربرد در سیستم‌های تصفیه‌ی فاضلاب و پرورش آبزیان).

۴- استفاده از شیب‌شکن‌ها برای ایجاد تلاطم کنترل‌شده در آبراهه‌ها با اهداف تفریحی از جمله قایقرانی در آب‌های خروشان.

۵- ایجاد عمق در اثر پس‌زدگی آب و فراهم کردن شرایط مساعد، برای تغذیه‌ی آبخوان‌های زیرزمینی.



شکل (۱-۱): پروفیل طولی از مسیر کانال