بسم الله الرحمن الرحیم

هیدرولیک و آزمایشگاه

محمّد یوسف روشنی

دانشگاه پیام نور – مرکز سنندج

شماره دانشجویی = ۹۷۰۱۱۰۹۸۵

فهرست مطالب

مقدمه ۲
۱- تعریف پرش هیدرولیکی..... ۳
۲- تقسیم بندی انواع پرش های هیدرولیکی..... ۳
۲-۱- بر اساس جریان آب بالادست (upstream) ٤
۲-۱-۱- پرش هیدرولیکی موجی (Undular Hydraulic Jump) ٤
۲-۱-۲- پرش هیدرولیکی ضعیف (Weak Hydraulic Jump) ٤
۲-۱-۳- پرش هیدرولیکی نوسانی (Oscillating Hydraulic Jump) ٥
۲-۱-٤- پرش هیدرولیکی پایدار (Steady Hydraulic Jump) ٥
۲-۱-٥- پرش هیدرولیکی قوی (Strong Hydraulic Jump) ٦
۲-۲- بر اساس جریان آب پایین دست (downstream) ٦
۲-۲-۱- پرش هیدرولیکی آزاد (Free Hydraulic Jump) ٦
۲-۲-۲- پرش هیدرولیکی اجباری (Forced Hydraulic Jump) ٦
۲-۲-۳- پرش هیدرولیکی مستغرق (Submerged Hydraulic Jump) ٦
۳- ارزیابی پرش هیدرولیکی ۷
٤- کنترل پرش هیدرولیکی..... ۸
٥- تحلیل جریان در پرش هیدرولیکی..... ۹
٦- افت انرژی در پرش هیدرولیکی..... ۱۲
۷- امواج جزر و مدی..... ۱۳

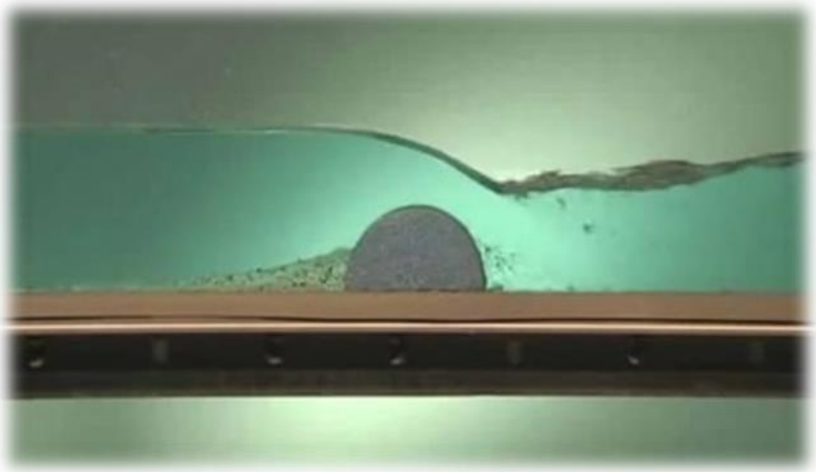
مقدمه

یکی از پدیده های جالبی که در طبیعت رخ می دهد، پرش هیدرولیکی است؛ این پدیده که به وفور در کانال‌های روباز و رودخانه‌ها دیده می‌شود، نخستین بار توسط **لئوناردو داوینچی** (Leonardo daVinci) مخترع و نقاش ایتالیایی در قرن شانزدهم میلادی، مشاهده و ثبت گردید.

پس از او اما تا اوایل قرن نوزدهم طول کشید تا جورجیو بیدون (Giorgio Bidone) مهندس ایتالیایی، اولین مقاله را در این زمینه منتشر کند. او در مقاله خود نشان داد هنگامی که جریانی تند به جریانی با سرعت آرام می‌رسد، انرژی جنبشی چگونه منتشر می‌شود. فرض کنید، سیالی با سرعت زیاد در یک کانال روباز جریان دارد. در این حالت ممکن است به علتی، جریان ناپایدار شود .اکنون بروز کوچکترین اعوجاجی می‌تواند سطح بالای جریان را به صورت ناگهانی، به ارتفاع بالاتری ببرد.

پرش هیدرولیکی، جهش هیدرولیکی یا **پرش آبی** پدیده‌ای در علم هیدرولیک است که در جریان کانال باز مورد بحث قرار می‌گیرد. هنگامی که در یک کانال با سطح آزاد، در بالادست جریان فوق بحرانی و در پایین‌دست جریان زیر بحرانی وجود داشته‌باشد، در مقطعی میان این دو جریان، پرش هیدرولیکی رخ می‌دهد که با استهلاک انرژی زیادی همراه است.

نوع پرش هیدرولیکی وابسته به سرعت اولیه سیال است. اگر سرعت اولیه سیال کمتر از سرعت بحرانی باشد، پرشی رخ نمی‌دهد. برای سرعت‌هایی نیز که چندان بالاتر از سرعت بحرانی نیستند، انتقال انرژی به صورت امواج متلاطم پدیدار می‌شود. بعد از این مقدار هرچه سرعت اولیه سیال افزایش یابد، انتقال انرژی سریع‌تر می‌شود، تا جایی که در سرعت‌های بالا، ذرات سیال از آن جدا شده و به سوی بالا پرت شده و به سمت جریان بازمی‌گردند. وقتی این اتفاق می‌افتد، پرش همراه با اثرات شدید تلاطم ناشی از جریان مانده و گردابی هوا و امواج سطحی می‌شود.



۱- تعریف پرش هیدرولیکی

پرش هیدرولیکی (Hydraulic Jump) یا جهش هیدرولیکی در علم هیدرولیک در حوزه جریان های با سطح آزاد مثل کانال های آب آزاد، رودخانه ها و... بررسی و بحث می شود چرا که سیالات همیشه آن طور که پیش بینی می شود رفتار نمی کنند و از طرفی کنترل جریان آب یکی از مهم ترین پارامتر های زیر ساخت های هیدرولیکی است که در هنگام طراحی سازه باید به آن توجه کرد.

اما جهش هیدرولیکی چه زمانی اتفاق می افتد؟

در جریان های سطح آزاد، وقتی آب از یک سطح با سرعت اولیه زیاد به سطحی دیگر از آب که سرعت پایین تری دارد وارد می شود، یک افزایش ناگهانی در سطح آب رخ می دهد؛ به این صورت که سرعت آب به طور ناگهانی کم شده و جریان کند می شود در نتیجه ارتفاع آب افزایش یافته و مقداری از انرژی جنبشی اولیه به انرژی پتانسیل در آب تبدیل می گردد؛ البته مقداری از آن هم به دلیل به وجود آمدن تلاطم، به گرما تبدیل می شود؛ به این پدیده که در اثر کاهش ناگهانی سرعت یک جریان سریع رخ می می دهد، پرش هیدرولیکی گفته می شود.

در این پدیده سرعت بحرانی سیال نقش مهمی دارد.

اگر سرعت اولیه آب کم تر از سرعت بحرانی آن باشد، هیچ پرشی در آن رخ نمی دهد و چنان چه سرعت اولیه به مقدار قابل توجهی بیشتر از سرعت بحرانی نباشد، تلاطم خود را به شکل موج های نوسانی نشان می دهد و رفته رفته با افزایش سرعت، تلاطم به سمت پرش هیدرولیکی پیش می رود

در واقع پرش هیدرولیکی هنگامی رخ می‌دهد که تغییر ناگهانی از حالت فوق بحرانی به حالت زیر بحرانی در جریان اتفاق بیفتد؛ در حالت فوق بحرانی، نیروی اینرسی غالب است. اما در حالت زیر بحرانی، نیروی گرانش غلبه می‌کند.

۲- تقسیم بندی انواع پرش های هیدرولیکی

پرش هیدرولیکی تحت تاثیر عوامل مختلف به شکل های متفاوتی اتفاق می افتد.

پرش های هیدرولیکی بر دو اساس کلی دسته بندی می شوند:

۲-۱- بر اساس جریان آب بالادست (upstream)

معیاری که برای تقسیم بندی جهش هیدرولیکی بر اساس جریان آب بالادست استفاده می شود و همچنین مهمترین عاملی که در پرش هیدرولیکی تأثیر می‌گذارد، عدد فرود (Froude number) نام دارد.

عدد فرود از رابطه زیر به دست می آید :

$$Fr = \mathcal{U}1/\sqrt{gD}$$

که در این رابطه:

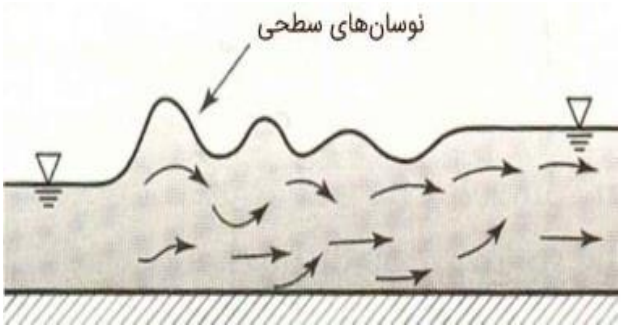
- Fr عدد فرود - بدون بُعد
- u_1 سرعت متوسط طولی در قسمت ابتدای جریان
- g شتاب گرانشی
- D عمق میانگین سیال (هیدرولیکی)

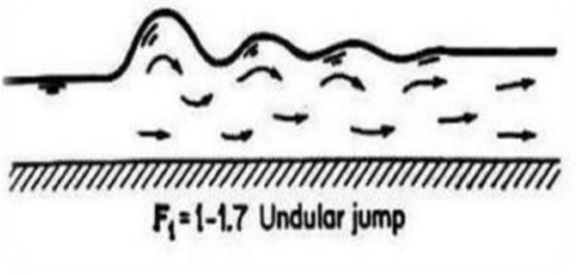
می باشد.

عدد فرود اولیه (Fr_1) را محاسبه می کنند و بر اساس آن پرش هیدرولیکی به انواع زیر تقسیم می شود:

۲-۱-۱- پرش هیدرولیکی موجی (Undular Hydraulic Jump)

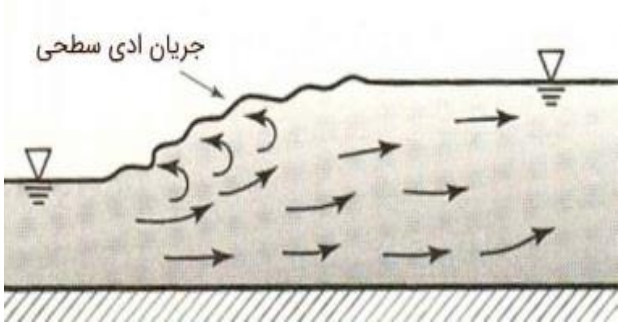
- این حالت زمانی اتفاق می افتد که عدد فرود در بازه ۱ تا ۱,۷ باشد.
- جهش هیدرولیکی در این حالت به صورت آشفتگی اندکی به شکل امواج کوچک در سطح آب دیده می شود؛ همچنین امواج به صورت جزئی تشکیل می‌شود، تفاوت عمق در بالا دست و پایین دست جریان کم است و حالت انتقال، ناگهانی نیست.

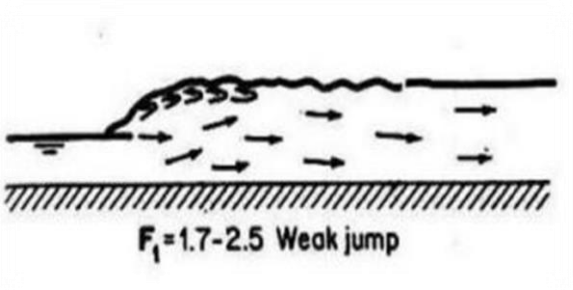




۲-۱-۲- پرش هیدرولیکی ضعیف (Weak Hydraulic Jump)

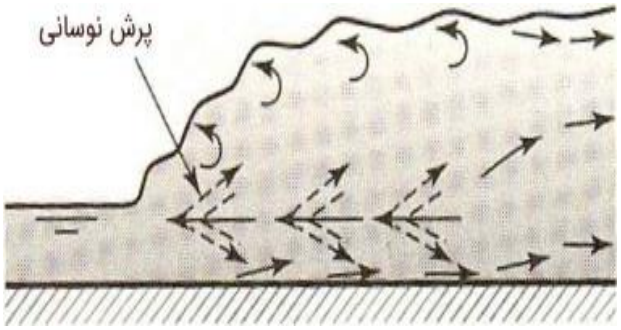
- زمانی پرش هیدرولیکی ضعیف اتفاق می افتد که عدد فرود در ۱,۷ تا ۲,۵ قرار بگیرد.
- در این حالت آشفتگی و نوسان های سطحی پدیدار می شود و سرعت جریان آب تقریبا یکنواخت می باشد، در این حالت جریان‌های ادی (Eddy) روی سطح تشکیل می‌شود؛ افت انرژی کم است و نسبت عمق نهایی به عمق اولیه، بین ۲ تا ۱/۳ است.

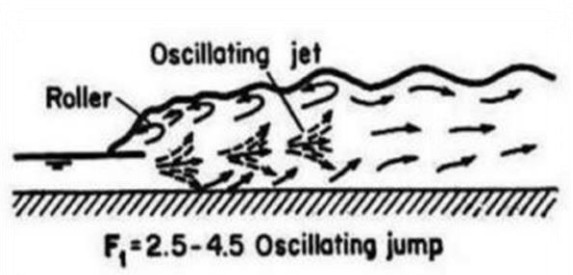




۲-۱-۳- پرش هیدرولیکی نوسانی (Oscillating Hydraulic Jump)

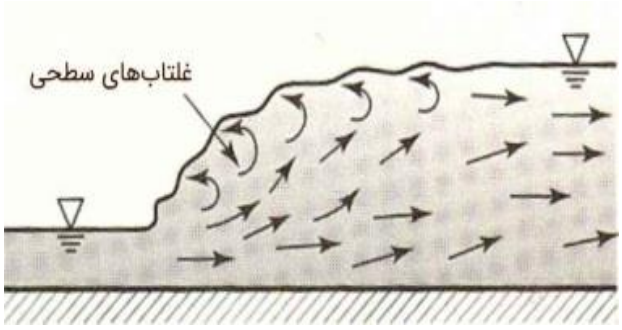
- اگر عدد فرود در بازه ۲,۵ تا ٤,٥ باشد، پرش نوسانی رخ می دهد
- نفوذ جریان آب از بالادست باعث ایجاد امواج نوسانی و نامنظم می شود که به سمت پایین دست حرکت می کند؛ به این معنا که جهت آب از بالا به پایین نوسان می‌کند و امواج سطحیِ تشکیل شده تا انتها ادامه می‌یابند. نسبت عمق نهایی به عمق اولیه، بین ۱/۳ تا ٥ است؛ این پرش ممکن است اثرات مخربی هم داشته باشد.





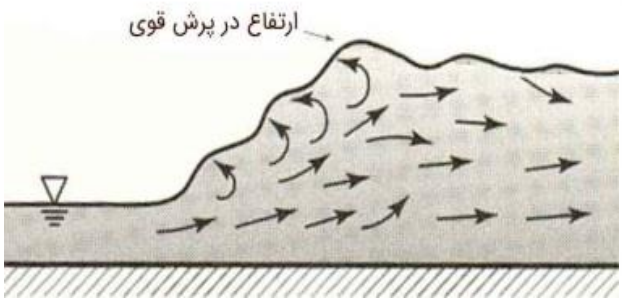
۲-۱-٤- پرش هیدرولیکی پایدار (Steady Hydraulic Jump)

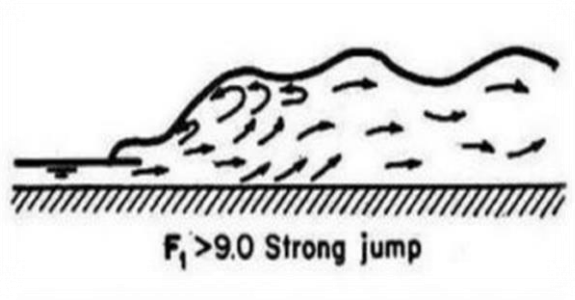
- این نوع پرش هنگامی پدیدار می شود که عدد فرود در ٤,٥ تا ۹ قرار بگیرد.
- پرش پایدار پرش شدیدی است که در یک منطقه محصور می شود؛ این پرش ها از شرایط پایین دست تاثیر نمی پذیرند یعنی محل وقوع پرش، صرف نظر از شرایط پایین دست جریان، ثابت می‌ماند البته سطح آب پایین دست به میزان قابل توجهی بالا می‌رود. نسبت عمق نهایی به عمق اولیه، بین ۹/٥ تا ۱۲ است و داخل ناحیه پرش، توربولانس بسیار محدود خواهد بود. در این حالت، غلتاب (Roller) هایی روی سطح تشکیل می‌شود



۲-۱-۵- پرش هیدرولیکی قوی (Strong Hydraulic Jump)

- در نهایت اگر Fr_1 بیشتر از ۹ باشد پرش قوی رخ خواهد داد
- ارتفاع پرش بسیار زیاد است، قدرت انتشار انرژی در بیشترین میزان خود قرار دارد و افت انرژی زیادی را به همراه دارد، این افت انرژی بیش از ۷۰ درصد خواهد بود؛ نسبت عمق نهایی به عمق اولیه از عدد ۱۲ فراتر می‌رود و ممکن است به ۲۰ هم برسد





۲-۲- بر اساس جریان آب پایین دست (downstream)

شرایط جریان آب پایین دست نیز می تواند در روی دادن جهش هیدرولیکی تاثیرگذار باشد.

بر این اساس پرش های هیدرولیکی به سه نوع پرش تقسیم بندی می شوند:

۲-۲-۱- پرش هیدرولیکی آزاد (Free Hydraulic Jump)

هنگامی که جریان پایین دست تاثیری روی بالادست نداشته باشد، جهش هیدرولیکی آزاد رخ می دهد.

۲-۲-۲- پرش هیدرولیکی اجباری (Forced Hydraulic Jump)

پرش اجباری در جاهایی رخ می دهد که آبشار یا آب پایه وجود داشته باشد؛ این سازه ها باعث کاهش طول حوضچه یا عمق پایین دست می شوند.

۲-۲-۳- پرش هیدرولیکی مستغرق (Submerged Hydraulic Jump)

پرش مستغرق هنگامی اتفاق می افتد که در بالادست، امکان تشکیل عمق مزدوج وجود نداشته باشد و پرش به سمت بالادست پیش روی کند. یعنی شرایط پایین‌دست به گونه‌ای است که امکان تشکیل عمق مزدوج در بالادست وجود ندارد. در نتیجه پرش به سوی بالادست پیشروی می‌کند و در صورت وجود مانع (مانند دریچه) پرش به صورت مستغرق انجام می‌شود و آشفتگی به درون جریان منتقل می‌شود

در این حالت چنانچه یک مانع مثل دریچه یا ... وجود داشته باشد، آشفتگی به درون جریان بر می گردد و در نتیجه پرش مستغرق پدیدار خواهد شد.

۳- ارزیابی پرش هیدرولیکی

جلوگیری از خسارات ناشی از انرژی فوق العاده آب، یکی از بحث های موردعلاقه دانش پژوهان و محققین است. از این رو شناخت عوامل ایجاد کننده این قبیل پدیده های هیدرولیکی که با تولید انرژی بالا همراه است و کنترل و مهار آن نیز بسیار حائز اهمیت است.

پدیده جهش یا **پرش هیدرولیکی** (Hydraulic Jump) که در کانال های رو باز مشاهده می شود ، از نوع جریان های متغیر سریع است که در بسیاری از کارهای عملی با آن روبرو بوده و آن عبارت است از تغییر حالت جریان از فوق بحرانی به زیر بحرانی . چنان چه آب در قسمتی از مسیر دارای حالت فوق بحرانی بوده و بنا به مشخصات و وقعیت خاص کانال بخواهد تغییر حالت دهد ، عمق جریان در مسیر نسبتا کوتاهی به میزان قابل ملاحظه ای افزایش یافته و در نتیجه ضمن ایجاد افت انرژی محسوس ، از میزان سرعت به اندازه قابل توجهی کم می شود.

این پدیده که یکی از پدیده های مهم جریان آب در کانال های باز بوده و از ابتدا تا انتهای آن یک تلاطم و پیچش سطحی آب وجود دارد، به پرش هیدرولیکی یا پرش آبی مرسوم است. در چنین حالتی و به تناسب شدت پرش ، آشفتگی هایی در سطح آب دیده می شود که به تدریج که به سمت انتهای پرش نزدیک می شویم از شدت آن ها کاسته شده و متناسب آن ، انرژی آب نیز کم می شود (جهت تبدیل انرژی به گرما)؛ علاوه بر این به جهت این تلاطم و آشفتگی و در اثر برخورد آب با هوا، مقداری هوا با آب در قسمت های سطحی مخلوط شده که به سمت پایین دست منتقل و در نهایت به شکل حباب هایی رها می شود.

به عبارت دیگر، نوع پرش هیدرولیکی وابسته به سرعت اولیه سیال است. اگر سرعت اولیه سیال کمتر از سرعت بحرانی باشد، پرشی رخ نمی‌دهد. برای سرعت‌هایی نیز که خیلی بیشتر از سرعت بحرانی نیستند، انتقال انرژی به صورت امواج متلاطم پدیدار می‌شود. بعد از این مقدار هرچه سرعت اولیه سیال افزایش یابد، انتقال انرژی سریع‌تر می‌شود، تا جایی که در سرعت‌های بالا، ذرات سیال از آن جدا شده و به سوی بالا پرت شده و به سمت جریان بازمی‌گردند.

وقتی این اتفاق می‌افتد، پرش همراه با اثرات شدید تلاطم ناشی از جریان باقی مانده و گردابی هوا و امواج سطحی می‌شود . پرش هیدرولیکی می تواند در دو حالت جریان آزاد یا سطح مقطعی از مایع یکنواخت و یا مایع پوشیده شده با وزن های مخصوص متفاوت تشکیل گردد که در هر دو حالت پرش با تلاطم جریان و از بین رفتن انرژی همراه است . از آنجایی که در واقع می توان هر تهدیدی را منجر به فرصت کرد.

جهش آبی در کانال های باز دارای کاربردها و خواص فراوانی است که می تواند به صورت زیر خلاصه گردد:

- کاهش انرژی در جریان سدها، سرریزها و دیگر سازه های هیدرولیکی و در نهایت حفاظت از قسمت های پایین دست؛
- ترمیم و افزایش سطح آب در کانال ها به منظور پخش و گسترش آب؛
- افزایش میزان دبی خروجی از زیر دریچه ها با دور نگه داشتن سطح پایاب (Tailwater) و در نهایت افزایش ارتفاع موثر در عرض دریچه؛
- کاهش فشار بالابرنده (Uplift Pressure) در زیر سازه ها با افزایش عمق در دامنه سازه؛
- مخلوط نمودن مواد شیمیایی جهت تصفیه آب یا فاضلاب و همین طور جهت مصارف کشاورزی؛
- هوادهی جریان ها و کلرزدایی فاضلاب؛
- جدا نمودن هوای محبوس از جریان های موجود در کانال های باز دایروی؛
- مشخص نمودن شرایط جریان های خاص مثل جریان های فوق بحرانی یا وجود یک سطح مقطع کنترل به منظور ایجاد ایستگاه های اندازه گیری کم خرج.

٤ـ کنترل پرش هیدرولیکی

در فرایند پرش هیدرولیکی تلاطم قابل توجهی رخ می‌دهد. این تلاطم ممکن است منجر به تخریب سازهٔ رودخانه یا کانال شود. همچنین موقعیت مکان رخداد پرش هیدرولیکی مشخص نیست و وابسته به مشخصات جریان است. برای جلوگیری از پیشروی پرش در کانال و نگه داشتن آن در یک محدودهٔ مشخص و حفاظت‌شده، از سازه‌های کنترل پرش استفاده می‌شود.

این سازه‌ها همچنین باعث اتلاف انرژی جنبشی اضافی جریان نیز می‌شوند و در نتیجه سازه‌های مستهلک کنندهٔ انرژی نیز نامیده می‌شوند.

لازم به توضیح است که در حالت کلی عموما دو روش برای از بین بردن انرژی مورد استفاده قرار می گیرد.

در روش اول از تبدیل های موضعی و یا اجزای دیگری استفاده می شود که باعث آشفتگی جدی در جریان شده و می توان تعریض ناگهانی محل در حین پرش هیدرولیکی را از این قِسم خواند.

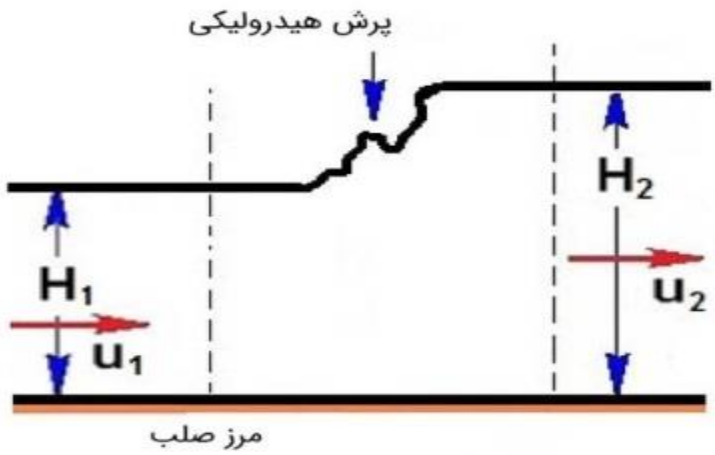
روش دوم بر اساس پرتاب آب به یک نقطه دوردست استوار است که در حین آن آب به ذرات کوچکتر تقسیم شده و بعد از برخورد با هوا و برگشت به زمین، مقدار زیادی از انرژی خود را از دست می دهد. از طرفی بدیهی است که هر گونه حائلی که در مسیر پرش هیدرولیکی واقع شود و به گونه ای باعث اتلاف انرژی آن گردد، می تواند در تغییر طول پرش تاثیر داشته باشد.

ایجاد برجستگی و فرورفتگی در مسیر کانال و در محل پرش و همچنین ایجاد حوضچه های پرش هیدرولیکی که در حقیقت این گونه سازه ها به عنوان عاملی برای کنترل پرش به کار می روند. گزینه های زیر می توانند به عنوان عوامل کنترل پرش هیدرولیکی موثر باشند.

- سرریز لبه تیز
- سرریز لبه پهن
- بالا آمادگی ناگهانی – پله(Sudden Rise)
- پایین افتادگی ناگهانی(Sudden Drop)
- سرریز شیب شکن(Drop Spillways)
- حوضچه های آرامش : (Stilling Basins) عبارت است از قسمت کوتاهی از یک کانال کف سازی شده که به صورت سازه ای خاص در انتهای سرریزها یا هر منبع دیگری که جریان فوق بحرانی ایجاد کند، ساخته می شود و هدف از ساختن آن به تشکیل **پرش هیدرولیکی** در داخل حوضچه خلاصه می گردد که در این صورت جریان فوق بحرانی ، قبل از رسیدن به قسمت های غیر کف سازه شده رودخانه به جریان زیر بحرانی تغییر حالت داده و از انرژی فوق العاده آن کاسته و از خرابی های احتمالی جلوگیری می گردد . هر حوضچه آرامش بر حسب شدت پرش ، احتیاج به اجزایی دارد تا ضمن شکل دادن پرش در یک موقعیت خاص تا حدالامکان از طول آن بکاهند . اجزایی که عبارتند از : بلوک های پای تندآب (Chute Blocks) ، آب پایه (Sill) که به صورت دندانه دار یا منفرد در انتهای حوضچه ساخته می شود ، بلوک های آرام کننده (Baffle Piers) که گاها بلوک کف هم نامیده می شوند که در قسمت میانی حوضچه کار گذاشته می شوند

۵- تحلیل جریان در پرش هیدرولیکی

برای تحلیل دقیق این پدیده، شکل زیر را در نظر بگیرید. در اینجا، سرعت متوسط جریان بالا دست و پایین دست را به ترتیب با u_1 و u_2 نشان داده‌ایم. همچنین عمق جریان در بالا دست و پایین دست به ترتیب با H_1 و H_2 نامگذاری شده است. حجم کنترل مطابق شکل، مرزهای بالا دست و پایین دست جریان را در بر گرفته است. معادلات پایستگی جرم و مومنتوم خطی را برای این حجم کنترل می‌نویسیم. برای سادگی محاسبات، عرض کانال را به اندازه واحد فرض کردیم.



جریان در این حجم کنترل، پایدار است. در نتیجه، پایستگی جرم به صورت زیر نوشته می‌شود :

$$u_1H_1 = u_2H_2 = Q$$

در رابطه بالا :

Q، نرخ دبی حجمی را نشان می‌دهد.

برای اعمال نظریه مومنتوم خطی در مسیر جریان، نیروهای هیدرواستاتیک را در دو طرف مشخص می‌کنیم. این نیرو در مرز بالا دست جریان، برابر $\rho g \frac{H_1^2}{2}$ است؛ در اینجا ρ چگالی سیال بوده و ثابت فرض می‌شود.

به طریق مشابه، نیروی هیدرواستاتیک در پایین دست جریان را هم با $\rho g \frac{H_2^2}{2}$ نشان می‌دهیم. بنابراین، تغییرات نیروی هیدرواستاتیک در طول این مسیر، برابر با $\rho g \frac{(H_2^2 - H_1^2)}{2}$ خواهد بود. از نیروهای ویسکوزی که ممکن است روی مرز صلب تأثیر بگذارند، چشم‌پوشی کرده‌ایم.

با تفاضل مومنتوم ورودی و خروجی در حجم کنترل، نظریه مومنتوم خطی را می‌توان به شکل زیر نوشت :

$$\rho u_2^2 H_2 - \rho u_1^2 H_2 = \frac{1}{2}\rho g\,(H_1^2 - H_2^2)$$

رابطه قبل را می‌توان با وارد کردن دبی، به طریق زیر بازنویسی کرد :

$$\frac{Q^2}{H_1H_2}(H_1-H_2) = \frac{g}{2}(H_1-H_2)(H_1+H_2)$$

حال، اگر $H_1 = H_2$ برقرار باشد،

هیچ پرشی رخ نداده است. در غیر این صورت، رابطه بالا را به صورت زیر ساده می‌کنیم :

$$\frac{2Q^2}{gH_1H_2} = (H_1+H_2)$$

(رابطه ۱)

رابطه بالا را می‌توان به عنوان یک معادله درجه دوم برحسب H_2 در نظر گرفت. بنابراین، با حل این معادله درجه دوم، عمق جریان در پایین دست، به دست می‌آید :

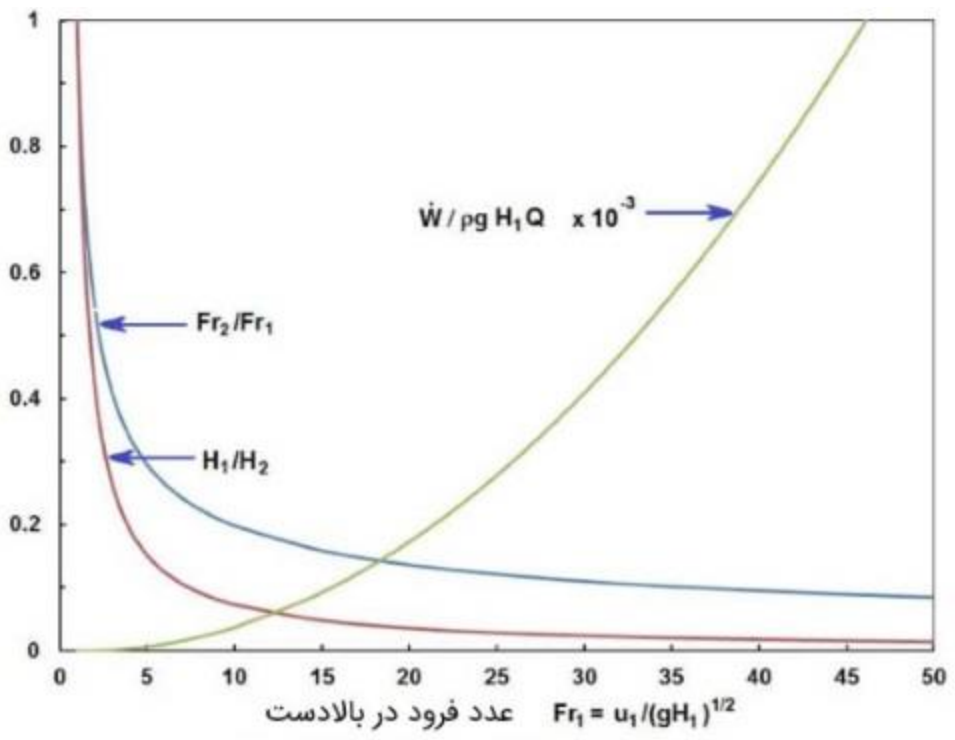
$$H_2 = -\frac{H_1}{2} \pm \sqrt{\frac{{H_1}^2}{4} + \frac{8Q^2}{gH_1}}$$

بدیهی است که تنها جوابی که در حالت واقعی قابل قبول است، با علامت + به دست می‌آید. در نتیجه، عمق محاسبه شده برای پایین دست جریان به صورت زیر است :

$$H_2 = -\frac{H_1}{2}\left(-1 + \sqrt{1 + \frac{8Q^2}{g{H_1}^3}}\right)$$

رابطه بالا، چگونگی ارتباط بین عمق در بالا دست و پایین دست جریان را نشان می‌دهد. از طرفی، در ابتدای این قسمت دیدیم که با توجه به قانون پایستگی جرم، نسبت $\frac{H_2}{H_1} = \frac{u_1}{u_2}$ برقرار است. پس به راحتی می‌توان بین سرعت جریان در بالا دست و پایین دست هم رابطه‌ای برقرار کرد. از طرف دیگر، با توجه به تعریف عدد فرود در ابتدای این مقاله، می‌توانیم با نوشتن این عدد برای بالا دست و پایین دست جریان، رابطه زیر را نتیجه‌گیری کنیم.

$$\begin{cases} Fr_1 = \dfrac{u_1}{\sqrt{gH_1}} \\ Fr_2 = \dfrac{u_2}{\sqrt{gH_2}} \end{cases} \Rightarrow Fr_2 = Fr_1\left(\frac{-1+\sqrt{1+8{Fr_1}^2}}{2}\right)^{-\frac{2}{3}}$$

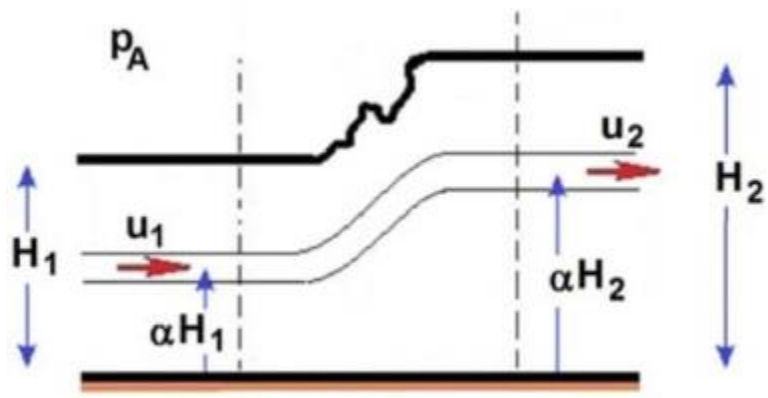


نسبت عدد فرود $\frac{Fr_2}{Fr_1}$ و نسبت عمق جریان $\frac{H_1}{H_2}$ در نمودار شکل بالا به عنوان تابعی از عدد فرود جریان بالا دست، رسم شده است. پارامتر $\dot{W}$ در شکل، نشان دهنده افت انرژی در عرض واحد کانال است. با توجه به نمودار و روابط بالا می‌توان به نتایج زیر رسید.

- عدد فرود بالا دست همیشه بزرگتر از واحد است.
- عدد فرود در جریان پایین دست همیشه کوچکتر از واحد است. در یک پرش هیدرولیکی، جریان بالا دست، همیشه فوق بحرانی است. در حالی که جریان پایین دست نیز همیشه زیر بحرانی است. این رفتار در موج شوک (Shock Wave) هم اتفاق می‌افتد. در موج شوک، جریان بالا دست همیشه در حالت فوق بحرانی است. در حالی که جریان پایین دست آن، در حالت زیر بحرانی قرار دارد.

٦- افت انرژی در پرش هیدرولیکی

برای محاسبه افت انرژی در این پدیده، شکل زیر را در نظر بگیرید. در این شکل، لوله جریان رسم شده است. فشار اتمسفر را روی سطح آزاد با $\mathbf{P_A}$ نشان می‌دهیم. در این صورت، فشار استاتیک $\mathbf{P_1}$ در ورود به لوله جریان با ارتفاع $\boldsymbol{\alpha H_1}$ با شرط $(\mathbf{0 < \alpha < 1})$ و فشار کل $\mathbf{P_1^T}$، به شیوه زیر محاسبه می‌شود:



$$p_1 = p_A + (1-\alpha)\rho g H_1$$

$$P_1^T = PA + (1-\alpha)\rho g H1 + \alpha\rho g H1 + \frac{1}{2}\rho u_1^2$$

$$\Rightarrow \; P_1^T = P_A + \rho g H_1 + \frac{1}{2}\rho u_1^2$$

به طور مشابه، فشار کل در پایین دست لوله جریان، به صورت زیر خواهد بود :

$$P_2^T = P_A + \rho g H_2 + \frac{1}{2}\rho u_2^2$$

به این ترتیب، افت فشار کل با عبور از پرش هیدرولیکی و در مسیر لوله جریان به طریق زیر به دست می‌آید :

$$P_1^T - P_2^T = \rho g(H_1 - H_2) + \frac{1}{2}\rho(u_1^2 - u_2^2)$$

اکنون با استفاده از قانون پایستگی جرم و رابطه شماره ۱، افت فشار کل را به شکل زیر می‌نویسیم :

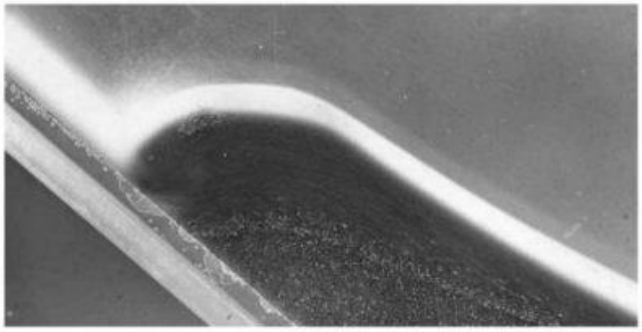
$$P_1^T - P_2^T = \frac{\rho g(H_2 - H_1)^3}{4H_2H_1}$$

بنابراین، افت انرژی در پرش هیدرولیکی و در عرض واحد کانال، به صورت زیر به دست می‌آید :

$$\dot{W} = (P_1^T - P_2^T)Q \Rightarrow \frac{\dot{W}}{\rho g H_1 Q} = \frac{(H_2 - H_1)^3}{4H_2H_1^2}$$

مقدار بی‌بُعد در سمت چپ مساوی، معرف افت انرژی است که در نمودار قبلی هم رسم شده بود. همان‌طور که ملاحظه می‌کنید، افزایش پرش، تأثیر قابل ملاحظه‌ای روی افت انرژی دارد. در شرایط واقعی، افت انرژی به صورت ترکیبی از تلاطم شدید و پرش پدیدار می‌شود. در رودخانه‌ها هنگامی که مانعی سر راه جریان قرار داشته باشد، جریان فوق بحرانی شده و به سمت پایین دست، شتاب می‌گیرد. در نهایت پس از پرش هیدرولیکی، انرژی‌اش پخش شده و دوباره به حالت زیر بحرانی برمی‌گردد.

تصویر سمت چپ در شکل زیر، مثالی رایج از این پدیده را نشان می‌دهد. اما تصویر سمت راست، نشان می‌دهد پرش هیدرولیکی فقط مختص سیالات نیست. در این تصویر، سرازیر شدن مواد گرانول را از یک سطح شیبدار مشاهده می‌کنید. لایه بالا دست جریان، نازک بوده و سرعت بسیار بالایی دارد .همین موضوع، عکس‌برداری از این پدیده را مشکل کرده است.



۷- امواج جزر و مدی

فرض کنید موجی از سمت اقیانوس وارد مسیر باریکی مانند دهانه رودخانه شود. جریان رودخانه و موج هر کدام در خلاف جهت یکدیگر در حال حرکتند. در این حالت، امواجی غیر عادی در دهانه رودخانه تشکیل می‌شود که جریان رودخانه را به عقب می‌زند. به این پدیده، موج جزر و مدی (Tidal Bore) گفته می‌شود.

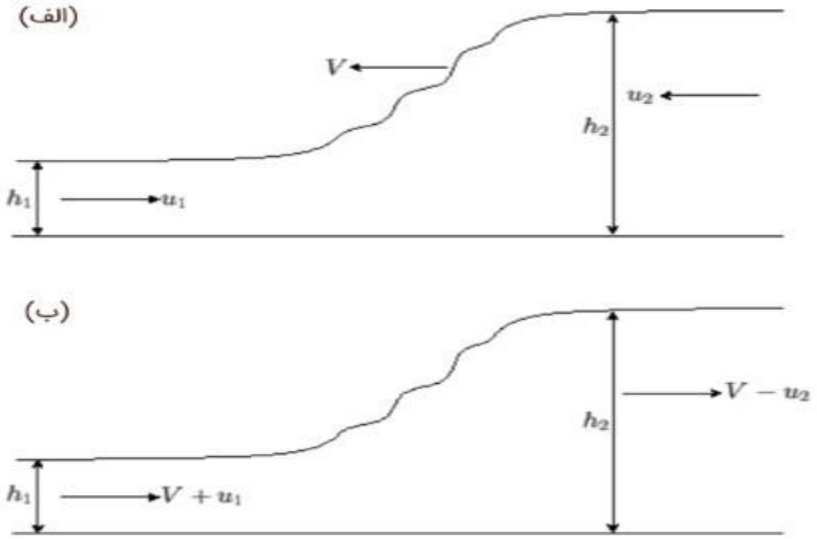
با این وجود، چنین پدیده‌ای فقط در نقاط انگشت‌شماری از کره زمین رخ می‌دهد. رودخانه باید نسبتاً کم‌عمق بوده و خروجی آن به اقیانوس یا دریا باریک و کم عرض باشد. در کنار این موارد، اگر دهانه رود هم مسطح و عریض باشد، شرایط برای تشکیل امواج جزر و مدی فراهم می‌شود. البته در برخی نقاط، استثناهایی هم برای تشکیل این امواج وجود دارد.

نمونه‌های از این پدیده را می‌توان در رودخانه‌های آمازون در برزیل، کیان‌تانگ در چین، مِرسی در انگلستان، کامپار در اندونزی و ساپانا در ایالات متحده آمریکا جستجو کرد .ارتفاع این امواج تا ۹ متر هم گزارش شده است. شکل زیر، وقوع این پدیده را در دهانه رودخانه کیان‌تانگ چین نشان می‌دهد.

برای تحلیل این امواج، شکل زیر را در نظر بگیرید.

در **تصویر الف**، دستگاه مختصات روی زمین ثابت شده است؛ موج جزر و مدی با سرعت V به سمت بالا دست رودخانه حرکت می‌کند. ارتفاع جریان رودخانه h_1 بوده و با سرعت u_1 به سمت پایین دست در حال حرکت است. جریان پشت موج جزر و مدی هم ارتفاعی برابر با h_2 دارد و سرعت آن با u_2 نشان داده شده است.

در **تصویر ب**، دستگاه مختصات روی موج گرانشی ثابت شده است؛ در این حالت، با پرش هیدرولیکی ایستا مواجه هستیم. عمق بالا دست برابر h_1 و سرعت آن برابر $v_1=V+u_1$ است. در سوی دیگر، عمق و سرعت جریان در پایین دست هم به ترتیب h_2 و $v_2=V-u_2$ است. با نوشتن پایستگی جرم، استفاده از تعریف عدد فرود و بازنویسی آن برای سرعت V، عبارت زیر محاسبه می‌شود.



می‌بینیم که سرعت پیشروی موج جزر و مدی، تابعی از عمق جریان در بالا دست و پایین دست است.

در شرایطی که $\mathbf{h_1 \approx h_2 \approx h}$ برقرار باشد، رابطه بالا به صورت $\mathbf{V \approx -u + \sqrt{gh}}$ ساده می‌شود. به عبارت دیگر، یک موج جزر و مدی ضعیف خواهیم داشت که با سرعت $\sqrt{\boldsymbol{gh}}$ نسبت به جریان رودخانه حرکت می‌کند.