Prozhefa.com

۸-۳-۱ طبقه‌بندی انواع سرریزهای مستطیلی

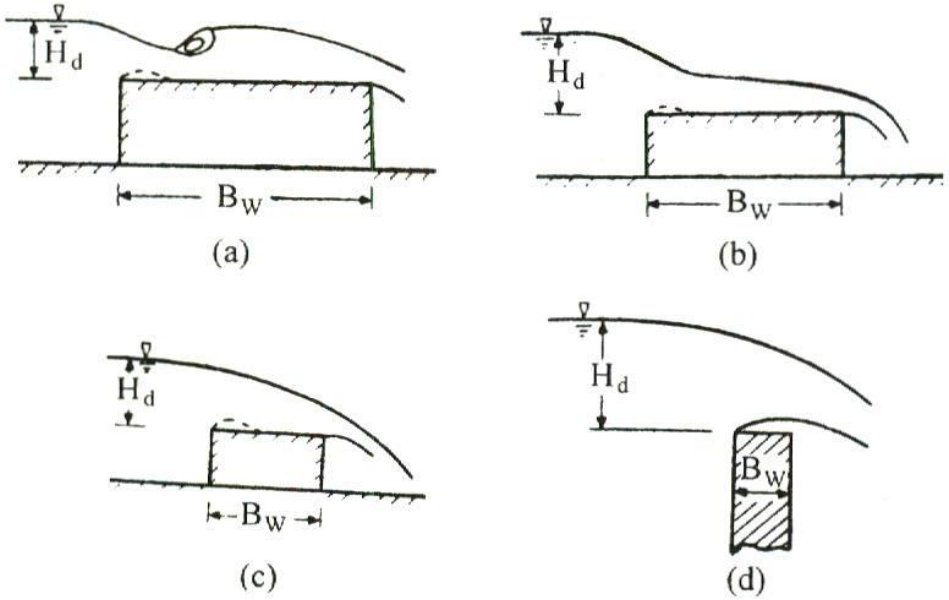
با توجه به مطالب گفته شده و براساس تغییرات $\frac{H_d}{B_w}$، جریان روی سرریز لبه پهن با گوشهٔ تیز به‌صورت زیر طبقه‌بندی می‌شود:

۱- $\frac{H_d}{B_w} \leq ۰/۱$: در این حالت عمق بحرانی در انتهای پایین‌دست سرریز ایجاد شده و مقاومت سطح سرریز در محاسبهٔ مقدار C_d نقش عمده‌ای را ایفا می‌کند (شکل ۸a-۱۳). این نوع از سرریزها به سرریز با تاج طولانی موسوم بوده و کمتر به عنوان یک وسیلهٔ اندازه گیری جریان به کار می‌رود.

۲- $۰/۱ < \frac{H_d}{B_w} \leq ۰/۳۵$: عمق بحرانی درنزدیکیهای گوشهٔ بالادست سرریز ایجاد شده و تغییرات C_d نسبت به $\frac{H_d}{B_w}$ تدریجی است (شکل ۸b-۱۳). این نوع می‌تواند سرریز لبه پهن حقیقی خوانده شود.

۳- حدود $۰/۳۵ < \frac{H_d}{B_w} \leq ۱/۵$: مقطع کنترل در گوشهٔ بالادست ایجاد شده و سرریز به سرریز تاج باریک مشهور است (شکل ۸c-۱۳).

۴- حدود $\frac{H_d}{B_w} > ۱/۵$: در این حالت جریان در قسمت بالادست سرریز جدا شده و به‌صورت آزاد در عرض سرریز می‌پرد. در این‌صورت سرریز همان سرریز لبه تیز نامیده می‌شود.



شکل ۸-۱۳ انواع سرریزهای مستطیلی براساس طبقه‌بندی ارائه شده

۸-۳-۲ ضریب شدت جریان C_d و C_{d1}

از معادلات ۸-۲۰ و ۸-۲۱ می‌توان نتیجه گرفت که:

$$C_d = \frac{Q}{\frac{۲}{۳}\sqrt{۲g}.L.H_d^{۳/۲}} \quad , \quad C_{d1} = \frac{Q}{۱/۷۰۵LH_e^{۳/۲}} \qquad (۲۲-۸)$$

Prozhefa.com

برای به‌دست آوردن مقادیر C_{d1} و C_d تجربیات زیادی صورت پذیرفته است که در میان آنها Govinda Rao و Muralidhar (۱۹۶۳) براساس مطالعات زیادی که در محدودهٔ $0 \leq \frac{B_w}{H_d} \leq 2$ و $0 \leq \frac{H_d}{B_w} < 1$ انجام داده‌اند، مقادیر زیر را برای C_d پیشنهاد می‌نمایند:

۱- برای سرریزهای طولانی ($\frac{H_d}{B_w} \leq 0/1$)

$$C_d = 0/561\left(\frac{H_d}{B_w}\right)^{0/022} \qquad (۸-۲۳)$$

۲- برای سرریزهای لبه پهن حقیقی ($0/1 \leq \frac{H_d}{B_w} \leq 0/35$):

$$C_d = 0/028\left(\frac{H_d}{B_w}\right) + 0/521 \qquad (۸-۲۴)$$

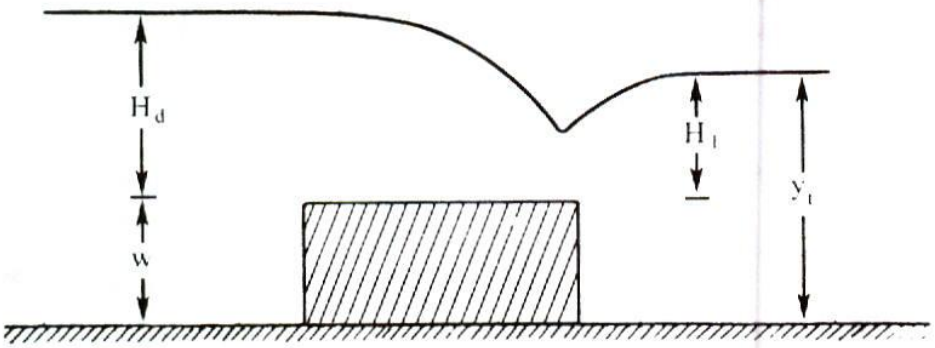
۳- برای سرریزهای تاج باریک (حدود $0/45 \leq \frac{H_d}{B_w} \leq 1/5$)

$$C_d = 0/12\left(\frac{H_d}{B_w}\right) + 0/492 \qquad (۸-۲۵)$$

در حد فاصل موارد ۲ و ۳ یک حالت تبدیلی وجود دارد که مقدار C_d بتدریج از معادلهٔ ۸-۲۴ به‌سمت معادلهٔ ۸-۲۵ تغییر می‌کند.

۸-۳-۳ جریان مستغرق (Submerged Flow)

اگر فاصلهٔ تراز پایاب تا تاج سرریز ($H_1 = y_t - w$) قابل‌ملاحظه باشد، (شکل ۸-۱۴) حالت جریان در روی سرریز ممکن است تماماً زیر بحرانی بوده و دبی در این حالت تابع مقادیر H_d و H_1 خواهد بود. حد جریان مستغرق در سرریزهای لبه پهن موقعی است که $\frac{H_d}{B_w}$ حداقل حدود ۶۵ درصد باشد که در این حالت سطح آب پایین‌دست عمق بحرانی را در خود غرق می‌نماید. برای حدود بیش از مقدار ذکر شده، که جریان مستغرق است، مقدار ضریب شدت جریان (C_{d1} یا C_d) با افزایش $\frac{H_1}{H_d}$ کاهش می‌یابد.



شکل ۸-۱۴ جریان مستغرق روی سرریز لبه پهن

Prozhefa.com

مثال ۸-۵

یک سرریز لبه پهن با بالادست راست گوشه، عرض یک کانال مستطیلی راکه برابر ۲m می‌باشد، می‌پوشاند. طول تاج ۲٫۵m و تراز آن ۱٫۲ متر بالای کف کانال است. مطلوب است محاسبهٔ تراز آب در بالادست موقعی‌که دبی الف: ۲m^3/s و ب : ۳٫۵m^3/s باشد.

حل

الف: $Q = ۲\text{m}^3/\text{s}$

فرض می‌گردد که سرریز، لبه پهن حقیقی بوده و لذا مقدار C_d در مرحلهٔ اول ۰٫۵۲۵ انتخاب می‌گردد. با توجه به معادلهٔ ۸-۲۱ داریم:

$$۲ = \frac{۲}{۳} \times ۰٫۵۲۵ \times \sqrt{۱۹٫۶۲} \times ۲ \times H_d^{۳/۲}$$

$$H_d = ۰٫۷۴۷\text{m}$$

$$\frac{H_d}{B_w} = \frac{۰٫۷۴۷}{۲٫۵} = ۰٫۲۹۹$$

$$C_d = ۰٫۰۲۸(۰٫۲۹۹) + ۰٫۵۲۱ = ۰٫۵۲۹$$

$$۲ = \frac{۲}{۳} \times ۰٫۵۲۹ \sqrt{۱۹٫۶۲} \times ۲ \times H_d^{۳/۲}$$

$$H_d = ۰٫۷۴۳\text{m}$$

$$C_d = ۰٫۵۲۹$$

لذا تراز آب در بالادست، معادل ۱٫۹۴۳m بالاتر از کف کانال است.

ب: $Q = ۳٫۵\text{m}^3/\text{s}$

از آن‌جا که مقدار Q نسبت به قسمت الف افزایش یافته است، احتمال می‌رود مقدار $\frac{H_d}{B_w} > ۰٫۳۵$ باشد. لذا فرض می‌گردد سرریز تاج باریک بوده و در مرحله اول $C_d = ۰٫۵۵$ انتخاب می‌گردد.

$$۳٫۵ = \frac{۲}{۳} \times ۰٫۵۵ \times \sqrt{۱۹٫۶۲} \times ۲ \times H_d^{۳/۲}$$

$$H_d = ۱٫۰۵\text{m}$$

$$\frac{H_d}{B_w} = \frac{۱٫۰۵}{۲٫۵} = ۰٫۴۲$$

جریان روی سرریز در محدودهٔ تبدیلی است بین سرریز لبه پهن حقیقی و سرریز تاج باریک. لذا با استفاده از معادلهٔ ۸-۲۵:

$$C_d = ۰٫۱۲(۰٫۴۲) + ۰٫۴۹۲ = ۰٫۵۳۴$$

Prozhefa.com

با اعمال این مقدار C_d در معادله دبی خواهیم داشت:

$$H_d^{۳/۲} = ۱/۱۰۹ \rightarrow H_d = ۱/۰۷۱\,m$$

$$\frac{H_d}{B_w} = ۰/۴۲۹$$

مجدداً از معادلهٔ ۸-۲۵:

$$C_d = ۰/۵۴۳$$

$$H_d^{۳/۲} = ۱/۰۹۱ \Rightarrow H_d = ۱/۰۶۰\,m$$

$$\frac{H_d}{B_w} = ۰/۴۲۴$$

$$C_d = ۰/۵۴۳$$

بنابراین $H_d = ۱/۰۶۰$ و سطح آب در فاصلهٔ $۱/۰۶ + ۱/۲ = ۲/۲۶۰\,m$ از بستر کانال قرار دارد.

۸-۳-۴ سرریز سدها (Spillways)

یکی از سازه‌های مهمی که همزمان با ساخت سدها مورد نیاز واقع می‌شود و امکان خروج سیلاب‌های اضافه بر ظرفیت سد را میسر می‌سازد، سرریز نام دارد. به عبارت دیگر یکی از کاربردهای مهم سرریزها، کنترل ارتفاع و حجم آب دریاچه پشت سد است که در این حالت شکل و ابعاد سرریز تابعی از موقعیت جغرافیایی و هیدرولوژیکی منطقه خواهد بود.

در طراحی این‌گونه سرریزها چه به‌منظور منحرف نمودن آب و چه به جهت ذخیرهٔ آب ساخته شوند می‌بایست دقت کافی مبذول داشت و هرگونه احتمال خطر بخصوص خطرهای جانی را مدنظر قرار داد. از انواع سرریزهای سد می‌توان سرریز سیفونی (Siphon Spillway)، سرریز نیلوفری (Morning Glory Spillway یا Shaft)، سرریز جانبی (Side-channel Spillway)، سرریز شیبدار (Chute Spillway) و سرریز لبه آبریز (Ogee Spillway یا Overflow Spillway) را نام برد.

سرریزهای سیفونی با استفاده از قانون سیفون‌ها عمل نموده و آب پشت سد را به‌سمت پایین‌دست می‌مکد. در دهانهٔ این سرریزها گاه از سازه‌ای بنام کلاه خود استفاده می‌شود که در هر صورت دهانهٔ سیفون در تراز نرمال آب دریاچه قرار می‌گیرد. اگرچه براساس قانون سیفون‌ها با افزایش یا کاهش ارتفاع آب در دریاچه، عمل سیفون شروع و یا خاتمه پیدا می‌نماید اما در بعضی مواقع از سیستمهای خاصی جهت این امور نیز استفاده می‌گردد. در هر حال ارتعاشات به‌وجود آمده توسط این سرریزها و هزینه‌های نسبتاً سنگین نگهداری و تعمیرات آن‌ها باعث شده است تا نسبت به سایر سرریزها کمتر مورد توجه قرار گیرند.

سرریز نیلوفری تشکیل می‌شود از یک دهانهٔ دایروی در داخل دریاچه، یک تبدیل دایروی قائم و

Prozhefa.com

یک تونل تحت فشار افقی (یا تقریباً افقی) که نهایتاً آب را از داخل دریاچه به‌قسمت پایین‌دست سد منتقل می‌کند. میزان شدت جریان در ارتفاع‌های کم تابعی است از ظرفیت دهانهٔ دایروی اما در ظرفیت‌های بالاتر تابع شرایط کانال تحت فشار افقی خواهد بود. کاربرد این نوع سرریزها بیشتر در دره‌های تنگ که امکان ساخت دیگر سرریزها نمی‌باشد و نیز در مواقعی که امکان استفاده از تونل انحراف به عنوان تونل تحت فشار میسر است، می‌باشد.

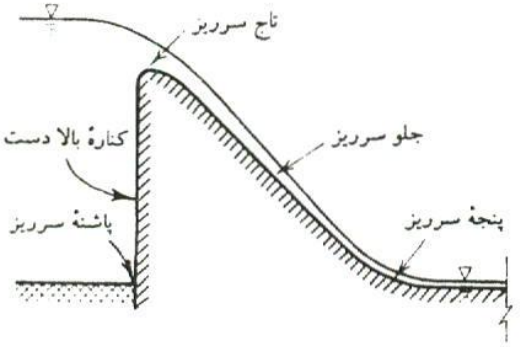
در سرریزهای جانبی، مقطع کنترل در کنار و به موازات کانال تخلیه قرار دارد و لذا جریان آب پس از عبور از روی مقطع کنترل و ورود به کانال تخلیه، با یک چرخش ۹۰° و از طریق کانال مربوطه، به‌قسمت پایین‌دست سد، هدایت می‌شود. جریان در داخل کانال تخلیه و در حدود مقطع کنترل، یک جریان متغیر مکانی بوده و عموماً در انتهای مقطع کنترل و در داخل کانال تخلیه دارای حالت بحرانی می‌باشد.

سرریزهای شیبدار از جمله سرریزهایی هستند که در مواقع سدهای خاکی کاربرد فراوانی دارند. جریان آب از داخل دریاچه و پس از عبور از روی یک سرریز لبه آبریز نسبتاً کوتاه وارد کانال تخلیه می‌شود که این کانال با شیبی تقریباً منطبق بر شیب کناره‌ها به رودخانهٔ پایین‌دست منتهی می‌گردد.

از جمله مشهورترین و پرکاربردترین سرریزها، سرریز لبه آبریز می‌باشد که در این قسمت به طراحی هیدرولیکی آن اشاره می‌شود.

۸-۳-۴-۱ سرریز لبه آبریز (Overflow Spillway) این سرریزها براساس محاسبات هیدرولیکی مربوط به سرریزهای با تاج مدور به گونه‌ای طراحی می‌گردند که پروفیل تاج و جلو ساختمان آنها (شکل ۸-۱۵) منطبق بر سطح زیرین آب لبریز شده از یک سرریز لبه تیز مستطیلی با همان مشخصات مورد نیاز در بالادست سرریز اصلی باشد.

بدین‌منظور یک سرریز مستطیلی لبه تیز با همان مشخصات کنارهٔ بالادست سرریز لبه‌آبریز انتخاب شده و همان مقدار دبی از روی سرریز لبه تیز عبور داده می‌شود. آب ضمن پرتاب از روی این سرریز دارای دو سطح زیرین و زبرین خواهد بود که در هر دو قسمت فشار اتمسفریک حاکم است. هر شکلی را

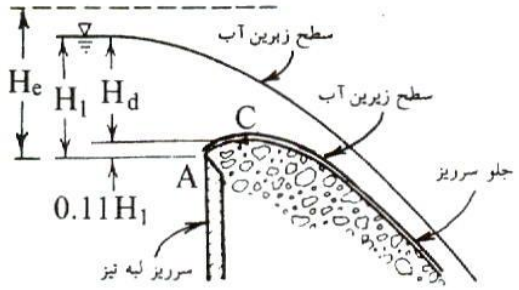


شکل ۸-۱۵ سرریز لبه آبریز

Prozhefa.com

که سطح زیرین آب در این حالت به خود اختصاص دهد برای تاج و جلو سرریز اصلی انتخاب نموده که در این صورت حداکثر دبی بدون ایجاد پدیده کاویتاسیون از روی سرریز عبور خواهد کرد. اضافه می‌نماید که تعیین این منحنی براساس دبی حداکثری که از روی سرریز عبور خواهد نمود و اصطلاحاً دبی طرح نامیده می‌شود، صورت می‌گیرد.

با در نظر گرفتن این مطلب، مقدار H_d که به ارتفاع طرح موسوم است، از مقدار H_1 (شکل ۸-۱۶) کمتر بوده و هرگاه در عمل به جهت کاهش دبی، مقدار ارتفاع آب نسبت به تاج سرریز از H_d کمتر شود، فشار وارده بر سطح سرریز مثبت و در صورتی‌که مساوی H_d باشد، فشار صفر و چنانچه احتمالاً بیشتر از H_d گردد، فشار منفی خواهد بود. در صورت اخیر احتمال ایجاد پدیدهٔ کاویتاسیون و لذا خرابی سرریز بوده و بنابراین هرگز پیشنهاد نمی‌شود که سرریز را به گونه‌ای طراحی کنند که در عمل امکان ایجاد ارتفاعی بیشتر از H_d به‌وجود آید.



شکل ۸-۱۶ چگونگی تشکیل پروفیل تاج و جلو سرریز لبه آبریز

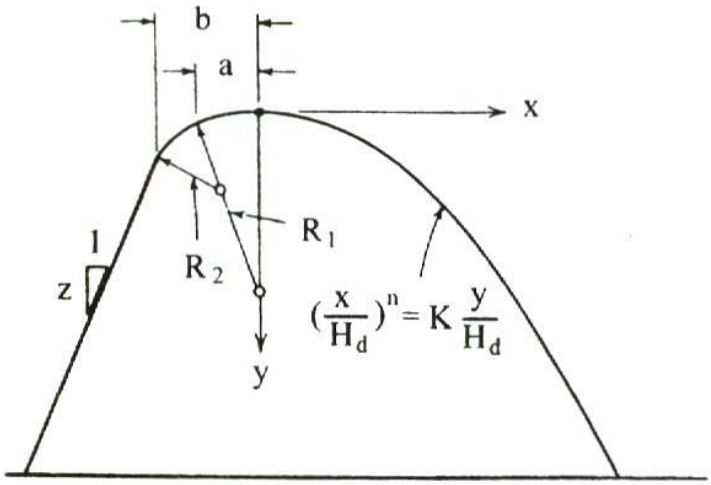
لازم به اشاره است که چنانچه در موقع طراحی، فشار وارده بر سرریز بیش از فشار اتمسفریک باشد، یعنی تاج و جلو سرریز بالاتر از سطح زیرین آب در نظر گرفته شوند، باعث کاهش دبی و اگر کمتر از فشار اتمسفریک باشد، باعث افزایش دبی و همزمان ایجاد پدیدهٔ کاویتاسیون می‌گردد.

برای طراحی این نوع سرریزها و با توجه به اصول فوق، تحقیقات بسیار ارزنده‌ای بوسیلهٔ USBR انجام گرفته که به روابط نسبتاً ساده‌ای برای تعیین منحنی تاج و جلو سرریز منتهی می‌گردد. چنانچه در حالت کلی یک سرریز لبه آبریز را مطابق شکل ۸-۱۷ در نظر گیریم، طبق پیشنهاد USBR، منحنی جلو سرریز می‌تواند معادلهٔ زیر را دارا باشد:

$$\left(\frac{x}{H_d}\right)^n = K\frac{y}{H_d} \qquad (۸-۲۶)$$

که مقادیر K و n تابعی از شیب سرریز در بالادست بوده و برای تعیین آنها و همچنین محاسبه پروفیل تاج سرریز در بالادست می‌توان از جدول ۸-۵ استفاده نمود. این منحنی تا نقطه‌ای ادامه خواهد داشت که مماس بر شیب پایین‌دست جلو سرریز گردد و این شیب خود براساس پایداری عمومی سازه تعیین می‌گردد.

Prozhefa.com



شکل ۸-۱۷ منحنی پروفیلهای جلو و تاج یک سرریز لبه آبریز

جدول ۸-۵ تعیین عوامل مختلف جهت طراحی سرریز لبه آبریز

z	n	K	R_1	R_2	a	b
∞(قائم)	۱٫۸۵	۲	$۰٫۵H_d$	$۰٫۲H_d$	$۰٫۱۷۵H_d$	$۰٫۲۸۲H_d$
۳	۱٫۸۳۶	۱٫۹۳۶	$۰٫۶۸H_d$	$۰٫۲۱H_d$	$۰٫۱۳۹H_d$	$۰٫۲۳۷H_d$
۱٫۵	۱٫۸۱	۱٫۹۳۹	$۰٫۴۸H_d$	$۰٫۲۲H_d$	$۰٫۱۱۵H_d$	$۰٫۲۱۴H_d$
۱	۱٫۷۷۶	۱٫۸۷۳	$۰٫۴۵H_d$	۰	$۰٫۱۱۹H_d$	$۰٫۱۱۹H_d$

Cassidy در سال ۱۹۷۰ برای قسمت بالادست تاج یک سرریز لبه آبریز قائم، منحنی زیر را پیشنهاد نمود که می‌تواند به‌جای عوامل موجود در جدول فوق برای سرریز با بالادست قائم استفاده شود:

$$\frac{y}{H_d} = ۰٫۷۲۴\left(\frac{x}{H_d} + ۰٫۲۷۰\right)^{۱٫۸۵} - ۰٫۴۳۲\left(\frac{x}{H_d} + ۰٫۲۷۰\right)^{۰٫۶۲۵} + ۰٫۱۲۶ \qquad (۲۷-۸)$$

که این معادله در محدوده $۰٫۲۷۰ - \geq \frac{x}{H_d} \geq ۰$ و $۰٫۱۲۶ \leq \frac{y}{H_d} \leq ۰$ قابل قبول است و نسبت به مورد قبل رجحان دارد.

۸-۳-۴-۲ دبی سرریزهای لبه آبریز از آن‌جایی‌که پروفیل سرریزهای لبه آبریز با استفاده از منحنی سطح زیرین آب جاری شده از روی سرریز لبه تیز مستطیلی به‌دست می‌آید، می‌توان برای تعیین دبی آن، از همان معادلهٔ دبی سرریزهای لبه تیز مستطیلی استفاده نمود:

$$Q = \frac{۲}{۳} C_d \sqrt{۲g}\,.L.H_d^{۳/۲} = CLH_d^{۳/۲} \qquad (۲۸-۸)$$

در این حالت به علت بلندی سرریز $\frac{H_d}{w} \approx ۰$ بوده و لذا:

$$C_d = ۰٫۶۱۱ + ۰٫۰۸\frac{H_d}{w} = ۰٫۶۱۱$$

Prozhefa.com

$$C = \frac{۲}{۳} \times ۰/۶۱۱ \times \sqrt{۱۹/۶۲} = ۱/۸$$

در عمل مقدار C از حدود ۱/۶ تا ۲/۲ تغییر نموده و تابعی است از H_d و H_e و w . از طرفی از آن‌جاکه این نوع سرریزها عموماً تنها قسمتی از عرض دریاچه را در بر می‌گیرند، لذا می‌بایست مقدار L به L_e تبدیل گردد و نهایتاً معادله‌ای که برای این منظور ارائه می‌گردد به‌صورت زیر خواهد بود:

$$Q = \frac{۲}{۳} C_d \sqrt{۲g} \, . L_e H_e^{۳/۲} = C L_e H_e^{۳/۲} \qquad (۲۹-۸)$$

که در معادلهٔ فوق $H_e = H_a + \frac{V_۰^۲}{۲g}$ ارتفاع معادل انرژی بالای تاج سرریز و L_e عرض مؤثر از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید:

$$L_e = L - ۲(NK_p + K_a) H_e \qquad (۳۰-۸)$$

جایی‌که:

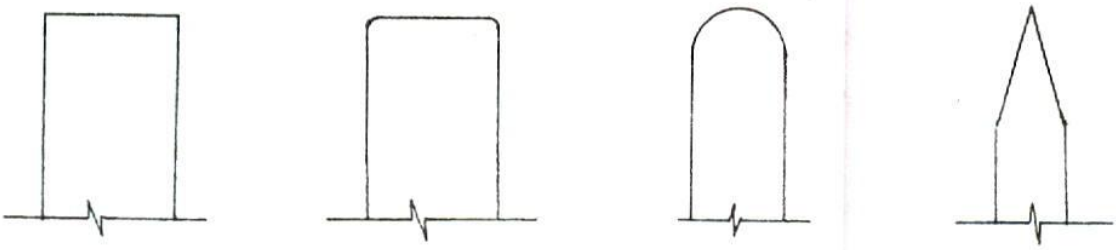
N = تعداد پایه‌های پل احتمالی موجود در روی تاج سرریز

K_p = ضریب انقباض پایه‌های پل

K_a = ضریب انقباض دو انتهای تاج سرریز

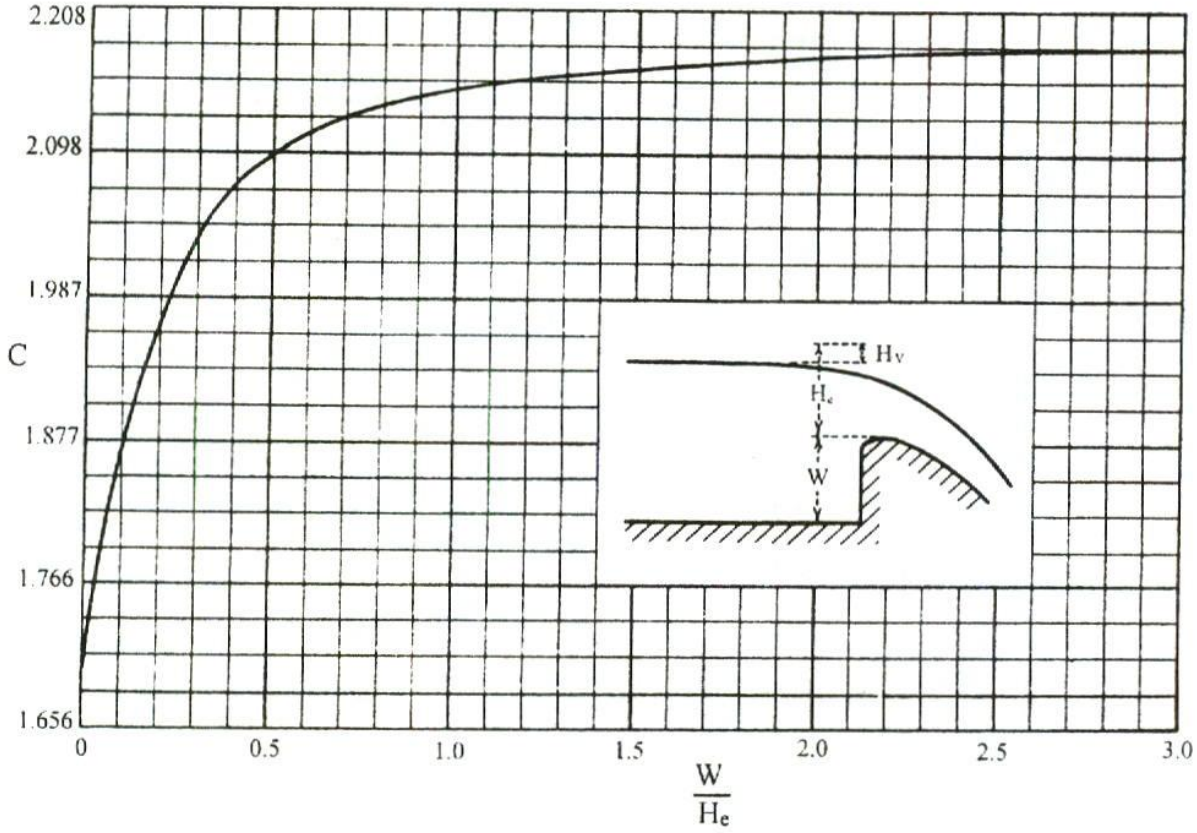
مقدار K_p تابعی از شکل پایهٔ پل در بالادست بوده و از صفر تا ۰/۱ مطابق شکل ۸-۱۸ تغییر می‌نماید. K_a نیز نظیر K_p براساس تغییرات شکل دو انتهای تاج تغییر می‌کند اما عموماً مساوی ۰/۲ برای کناره‌های راست گوشه و ۰/۱ برای کناره‌های گردگوشه در نظر گرفته می‌شود. مقدار C نیز همان‌گونه که قبلاً اشاره شد، متغیر بوده و در حالت سرریز قائم و مایل می‌تواند از نمودارهای اشکال ۸-۱۹ و ۸-۲۰ برحسب $\frac{w}{H_e}$ به‌دست آید.

همان‌گونه که در اشکال مذکور مشخص است، در صورتی‌که $\frac{w}{H_e} > ۱/۳۳$ باشد، مقدار C تقریباً ثابت و برابر ۲/۲ می‌باشد که در این حالت سرریز بلند نامیده شده و از $H_v = \frac{V_۰^۲}{۲g}$ صرفنظر شده و $H_e = H_d$ فرض می‌گردد.

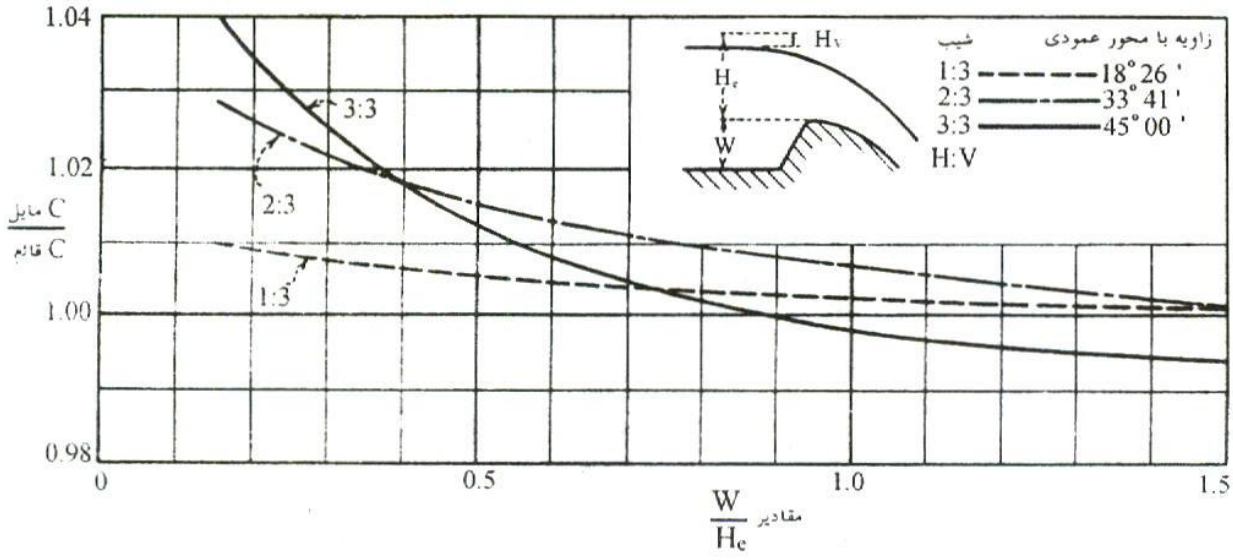


شکل ۸-۱۸ مقادیر K_p برای حالات مختلف

Prozhefa.com



شکل ۸-۱۹ تغییرات C برحسب $\frac{W}{H_e}$ برای سرریز لبه آبریز قائم



شکل ۸-۲۰ تغییرات ضریب C برای سرریز لبهٔ آبریز با شیب‌های متفاوت در بالادست

Prozhefa.com

یادآوری می‌نماید که سرریز برای دبی حداکثر و H_d طرح گردیده و در اکثر موارد میزان شدت جریان عبوری از روی آن کمتر از دبی طرح و به همان نسبت فاصلهٔ سطح آب تا تاج سرریز (H_1) کمتر از H_d خواهد بود. در این‌صورت معادلهٔ مقدار جریان به‌صورت:

$$Q_1 = C_1 L_{e1} H_{e1}^{3/2} \qquad (۳۱-۸)$$

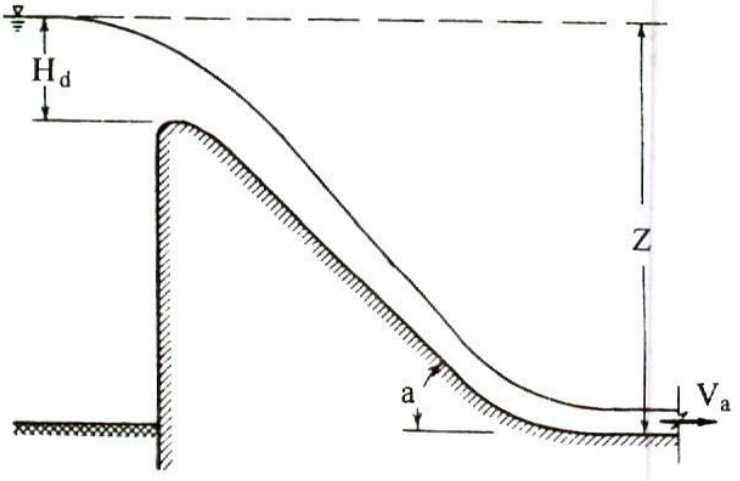
در آمده که L_{e1} و H_{e1} برحسب مقدار H_1 محاسبه و

$$C_1 = C \left(\frac{H_1}{H_d}\right)^{0/12} \qquad (۳۲-۸)$$

خواهد بود.

۸-۳-۴-۳ سرعت درپای سرریز از جمله نیازهای یک طراح عبارت است از تعیین سرعت آب در پای سرریز و پس از عبور از روی بدنهٔ آن که این می‌تواند در محاسبه عدد فرود و طرح حوضچه آرامش پس از سرریز نقش مهمی داشته باشد. از آن‌جاکه جریان در قسمتی از روی سرریز به‌صورت متغیر تدریجی بوده و از طرفی افت انرژیهای مختلف دیگر نیز در جریان تأثیر می‌گذارند، محاسبهٔ مقدار سرعت حتی اگر فرضیات درستی در نظر گرفته شده باشد نیز مشکل و از پیچیدگی خاصی برخوردار است. در سال ۱۹۵۷ تحقیقات زیادی به‌وسیلهٔ Bradley و Peterka روی این امر صورت گرفت که حاصل آن در شکل ۸-۲۲ آورده شده و می‌توان مقدار سرعت حقیقی را با تقریب بسیار خوبی حدس زد. با استفاده از منحنی‌های شکل مزبور و با داشتن مقادیر H_d و Z (نشان داده شده در شکل ۸-۲۱) می‌توان مقدار سرعت واقعی را برحسب سرعت تئوری و سرعت تئوری را از رابطهٔ زیر به‌دست آورد:

$$V_t = \sqrt{2g\left(Z - \frac{H_d}{2}\right)} \qquad (۳۳-۸)$$

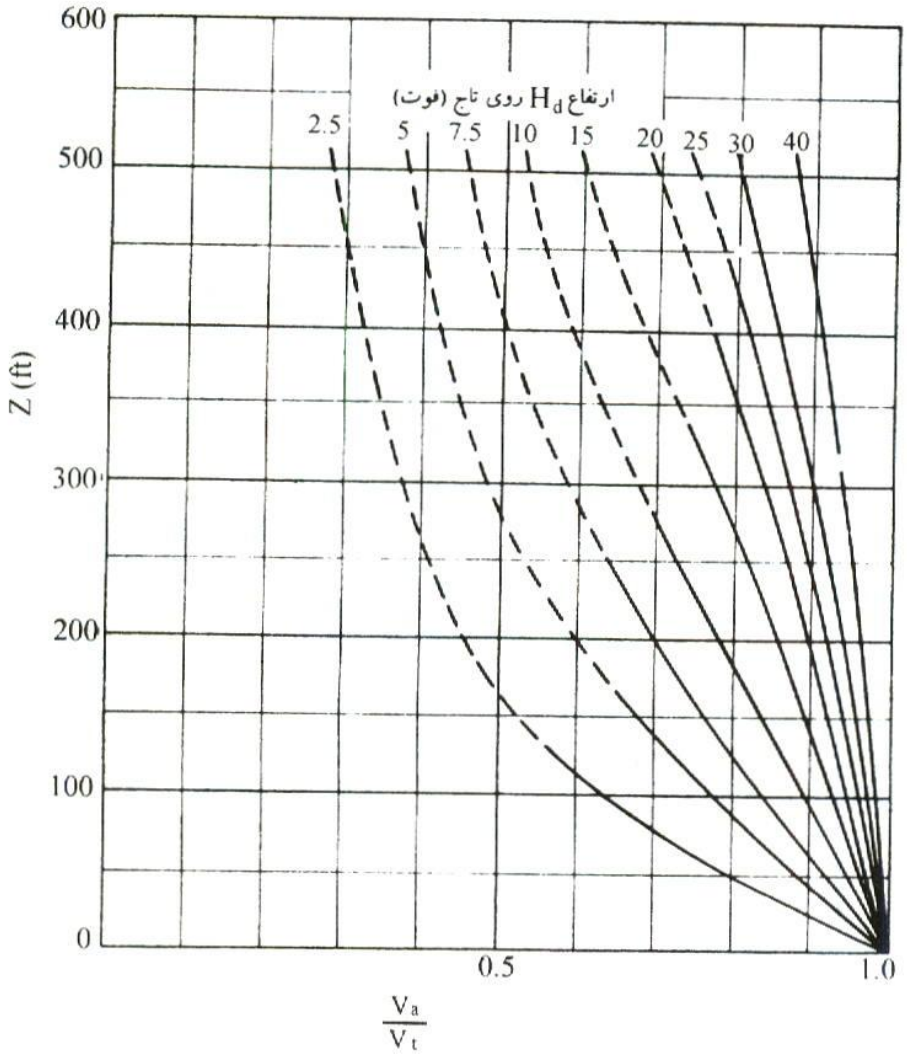


شکل ۸-۲۱ سرریز لبه آبریز

Prozhefa.com

لازم به ذکر است که منحنی‌های شکل ۸-۲۲ برای شیب‌های پایین‌دست در محدودهٔ (H)۰٫۸:(V)۱ و (H)۰٫۶:(V)۱ قابل استفاده بوده و همان‌گونه که شکل عمومی منحنی‌ها نشان می‌دهد با افزایش مقدار دبی و H_d ، سرعت به سرعت تئوری (V_t) نزدیکتر می‌شود.

از طرف دیگر با کاهش مقدار H_d و دبی، مقدار عمق جریان کاهش یافته و اثر اصطکاک ظاهرتر می‌گردد که در این حالت انتظار می‌رود در فاصله‌ای نه‌چندان دور از تاج، عمق جریان به‌عمق نرمال برسد.



شکل ۸-۲۲ سرعت در پای سرریز بعد از J.N. Bradley و A.J.Peterka

مثال ۸-۶

مطلوب است تعیین ارتفاع تاج و طرح پروفیل یک سرریز لبه آبریز که در بالادست قائم بوده و بتواند دبی معادل ۲۰۰۰m^3/s را از طول تاج خود که برابر ۷۰m می‌باشد عبور دهد در صورتی‌که تراز حداکثر آب در زمان این دبی برابر ۲۰۰m و تراز پاشنه سرریز ۱۷۰m باشد. حداکثر شیب در

Prozhefa.com

پایین‌دست ۰/۷ :۱ بوده و $C = ۲$ فرض می‌گردد.

حل :

$$Q = CL_e H_e^{۳/۲}$$

$$L_e = L - ۲(NK_p + K_a)H_e$$

با توجه به صورت مسأله $N = ۰$ و $K_a = ۰/۱$ فرض می‌گردد :

$$L_e = ۷۰ - ۰/۲H_e$$

$$۲۰۰۰ = ۲(۷۰ - ۰/۲H_e)H_e^{۳/۲}$$

$$H_e = ۵/۹۵۵\text{m}$$

با توجه به این‌که $w + H_d = ۲۰۰ - ۱۷۰ = ۳۰\text{m}$ بوده و مقدار H_d به H_e خیلی‌نزدیک است می‌توان یقین کرد که $\frac{w}{H_d} > ۱/۳۳$ بوده و لذا $V_۰^۲/۲g \approx ۰$ است که بدین‌ترتیب $H_d \approx H_e = ۵/۹۵۵\text{m}$ خواهد بود، اما برای دقت بیشتر می‌توان $H_v = V_۰^۲/۲g$ را به‌صورت زیر محاسبه نمود :

$$L_e = ۷۰ - ۰/۲ \times ۵/۹۵۵ = ۶۸/۸۱\text{m}$$

$$V_۰ = \frac{۲۰۰۰}{۶۸/۸۱(۳۰)} = ۰/۹۶۹\ \text{m/s}$$

$$H_v = \frac{V_۰^۲}{۲g} = ۰/۰۴۸\text{m}$$

$$H_d = ۵/۹۵۵ - ۰/۰۴۸ = ۵/۹۰۷\text{m}$$

$$w = ۳۰ - ۵/۹۰۷ = ۲۴/۰۹۳\text{m}$$

ارتفاع تاج سرریز

طرح پروفیل سرریز در پایین‌دست تاج :

$$\left(\frac{x}{H_d}\right)^n = K\frac{y}{H_d}$$

$$n = ۱/۸۵\ ,\ K = ۲$$

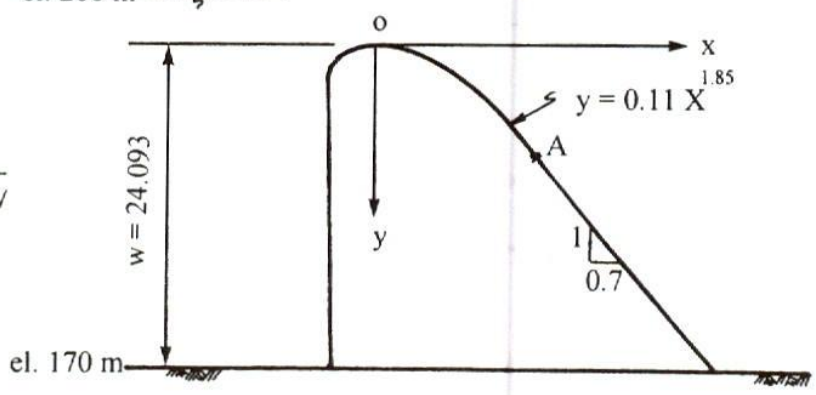
$$\left(\frac{x}{۵/۹۰۷}\right)^{۱/۸۵} = ۲\frac{y}{۵/۹۰۷}$$

$$y = ۰/۱۱x^{۱/۸۵}$$

$$\frac{dy}{dx} = \frac{۱}{۰/۷}$$

$$۰/۱۱ \times ۱/۸۵x^{۰/۸۵} = ۱/۴۳$$

$$x = ۹/۹۰\text{m}\ ,\ y = ۷/۶۵\text{m}$$



شکل ۸-۲۳

Prozhefa.com

لذا از نقطه O تا A پروفیل جلو سرریز دارای معادلهٔ $y = ۰/۱۱x^{۱/۸۵}$ بوده و از نقطهٔ A به مختصات $x = ۹/۹۰\text{m}$ و $y = ۷/۶۵\text{m}$ پروفیل به‌صورت خط مستقیم با شیب خواسته شده ادامه می‌یابد.

برای رسم پروفیل O تا A کافی است مختصات نقاط مختلف محاسبه گردد:

x(m)	۰	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۹/۹۰
y(m)	۰	۰/۱۱	۰/۴	۰/۸۴	۱/۴۳	۲/۱۶	۳/۰۳	۴/۰۳	۵/۱۵	۶/۴۱	۷/۶۵

برای تعیین منحنی تاج در بالادست می‌توان از معادله ۸-۲۷ و یا از مقادیر زیر استفاده نمود:

$$R_۱ = ۰/۵H_d = ۲/۹۵\text{m}$$

$$R_۲ = ۰/۲\ H_d = ۱/۱۸\text{m}$$

$$a = ۰/۱۷۵\ H_d = ۱/۰۳\text{m}$$

$$b = ۰/۲۸۲\ H_d = ۱/۶۷\text{m}$$

تعیین سرعت در پای سرریز:

$$V_t = \sqrt{۲g\left(Z - \frac{H_d}{۲}\right)}$$

$$V_t = \sqrt{۲ \times ۹/۸۱\left(۳۰ - \frac{۵/۹۰۷}{۲}\right)} = ۲۳/۰۴\ \text{m/s}$$

با توجه به منحنی‌های شکل ۸-۲۲

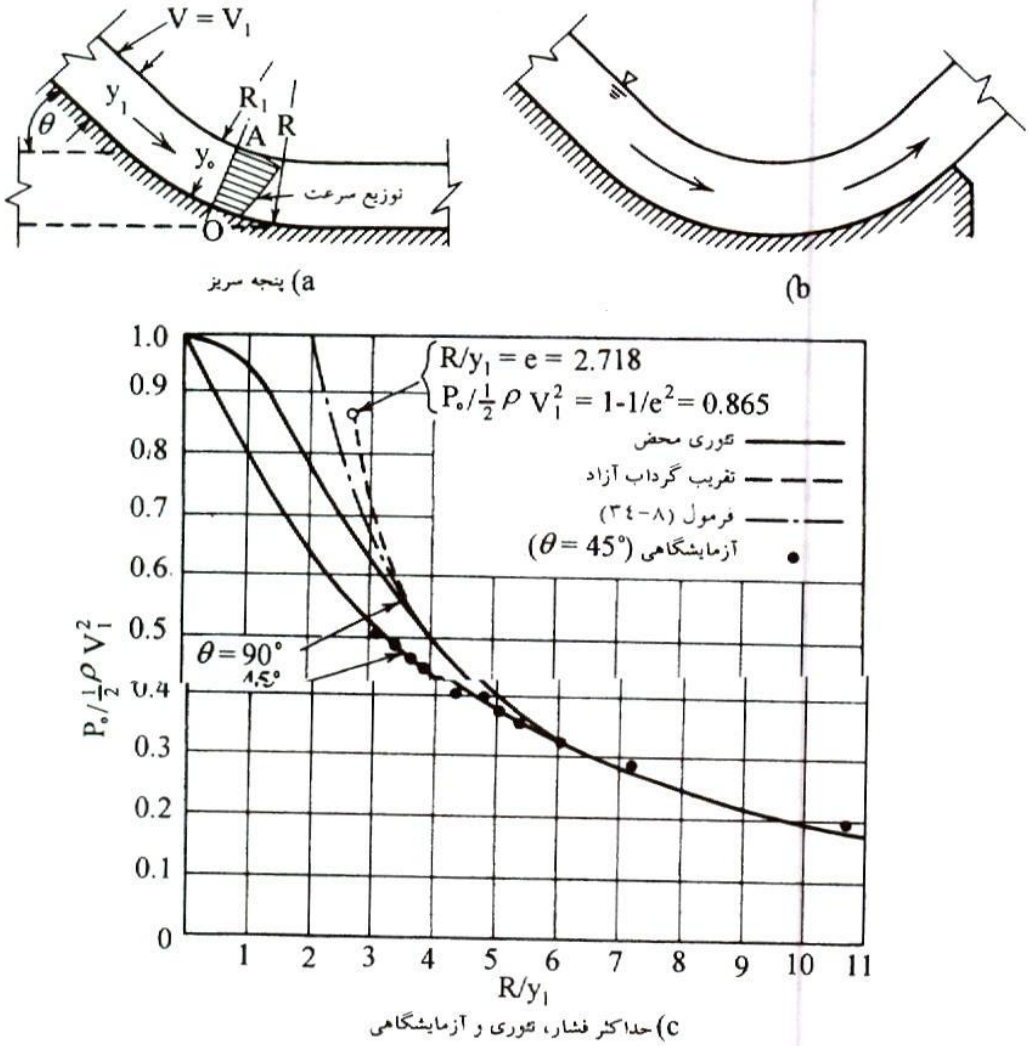
$$\frac{V_a}{V_t} = ۰/۹۴ \rightarrow V_a = ۲۱/۶۶\ \text{m/s}$$

۸-۳-۴-۴ جریان در پنجه سرریز زمانی‌که جریان به انتهای بدنهٔ پایین‌دست سرریز می‌رسد، تغییر جهت داده و وارد یک کف افقی و یا یک کف مقعر که جریان را به سمت بالا هدایت می‌کند می‌گردد (شکل ۸-۲۴). حالت اخیر پرش اسکی (Ski-jump) نام داشته و تأسیسات مربوط به انرژی گیرندهٔ جامی شکل مشهور است که برای اطلاعات بیشتر در این زمینه می‌توان به کتب مرجع مراجعه نمود.

در هر دو حالت، فشار خارج از مرکز ایجاد شده می‌تواند صدمات قابل‌ملاحظه‌ای را به‌دیواره‌های کناری سرریز وارد آورد. اگرچه این فشار نمی‌تواند به‌صورت دقیق محاسبه شود اما با فرضیاتی می‌توان آن را به شکل تقریبی معین نمود، به عنوان مثال اگر فرض گردد که عمق جریان $y_۰$ در مرکز منحنی (شکل ۸a-۲۴) مساوی عمق جریان در زمان رسیدن آب به پنجه می‌باشد، فشار خارج از مرکز در نقطهٔ O معادل خواهد بود با:

$$P_۰ = \frac{\rho V_۱^۲ y_۱}{R} \qquad (۸-۳۴)$$

Prozhefa.com



شکل ۸-۲۴ جریان در پنجه سرریز (بعد از F.M. Henderson و D.G. Tierney، ۱۹۶۳)

که V_1 و R در شکل ۸a-۲۴ معین شده‌اند. از آن‌جاکه مقدار فشار در طول AO افزایش می‌یابد، با استفاده از معادلهٔ برنولی می‌توان فهمید که این امر باعث کاهش سرعت گشته به گونه‌ای که نمودار سرعت تقریباً معادل آن‌چیزی است که در شکل ۸a-۲۴ نشان داده شده است. در نتیجه میانگین سرعت از مقدار V_1 کمتر و مقدار y_0 از y_1 بیشتر می‌باشد و لذا معادلهٔ ۸-۳۴ تنها به‌صورت یک تقریب قابل استفاده بوده و نمی‌تواند صحیح باشد.

در یک تقریب بهتر، می‌توان فرض نمود که خطوط جریانی که از OA می‌گذرند، تشکیل قسمتهایی از دایره‌های متحدالمرکز را می‌دهند و توزیع سرعت در طول این خط همانند توزیع سرعت در یک گرداب آزاد یا غیرچرخشی است یعنی:

$$V = \frac{C}{r} \qquad (۳۵-۸)$$

Prozhefa.com

جایی‌که C یک مقدار ثابت و r عبارت است از شعاع هریک از خطوط جریان. از آن‌جاکه خطوط جریان، دایره‌های متحدالمرکز هستند، r همچنین عبارت خواهد بود از مقدار فاصله در طول AO از A تا O . اگر R_1 شعاع خط جریان در A باشد، در نتیجه $C = V_1 R_1$ و از طرفی مقدار دبی q در طول AO به شکل زیر ارائه می‌گردد:

$$q = V_1 y_1 = \int_{R_1}^{R} V\,dr = V_1 R_1 \int_{R_1}^{R} r^{-1}\,dr = V_1 R_1 \log \frac{R}{R_1}$$

$$\frac{y_1}{R_1} = \log \frac{R}{R_1}$$

$$\frac{y_1}{R} = \frac{R_1}{R} \log \frac{R}{R_1} \qquad (۳۶-۸)$$

از آن‌جاکه مقادیر y_1 و R از قبل مشخص می‌باشند، می‌توان مقدار R_1 را از معادلهٔ فوق و با آزمون و خطا به‌دست آورد. با معلوم بودن $\frac{R_1}{R}$ می‌توان مقدار فشار در نقطهٔ O (P_0) را از شرط زیر به‌دست آورد:

$$P_0 + \frac{1}{2}\rho v_0^2 = \frac{1}{2}\rho v_1^2$$

یعنی:

$$\frac{P_0}{\frac{1}{2}\rho v_1^2} = 1 - \left(\frac{v_0}{v_1}\right)^2 = 1 - \left(\frac{R_1}{R}\right)^2 \qquad (۳۷-۸)$$

که فرض می‌گردد اتلاف انرژی بین A و O وجود ندارد و نتایج آزمایشگاهی نیز این امر را تأیید می‌کنند. روش «گرداب آزاد» به نتایج کاملاً دقیقی در یک محدودهٔ خاص منتهی می‌گردد اما این روش دارای محدودیتی است ناشی از این‌که تابع $\frac{\log_e x}{x}$ دارای حداکثر مقداری برابر $\frac{1}{e}$ و برای حالت $x = e$ (پایهٔ لگاریتم طبیعی) می‌باشد. با اعمال این نتیجه در معادلهٔ ۸-۳۶، ملاحظه می‌شود که نسبت $\frac{R}{y_1}$ حتی اگر یک متغیر مستقل باشد، زمانی‌که $\frac{R}{R_1} = e$ است، دارای حداقل مقداری برابر e می‌باشد. با این محدودیت، نمی‌توان از تئوری مزبور برای حالت $R/y_1 < e$ (و به تبع آن با توجه به معادلهٔ ۸-۳۷، $\frac{P_0}{(1/2)\rho V_1^2} = 1 - \frac{1}{e^2}$ است پایان پذیرد، در حالی‌که مقادیر کمتر R/y_1 نیز کاملاً امکان‌پذیر است.

برای حل کامل مسأله، Henderson و Tierney (۱۹۶۳) از تئوری ریاضی جریان غیرچرخشی برای حالتی که گالری (Sluice) باز از داخل سرریز می‌گذرد (خط‌چین نشان داده شده در شکل ۸a-۲۴) و نیز برای حالتی که پنجه سرریز به‌صورت منحنی می‌باشد، استفاده نموده که نتایج تئوری و آزمایشگاهی برای حالت اخیر در شکل ۸c-۲۴ ارائه گردیده است. در این شکل رفتار P_0 (فشار در O) برای زاویهٔ θ (شکل ۸a-۲۴) از ۴۵ تا ۹۰ درجه نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که روش گرداب آزاد و پاسخ معادلهٔ ۸-۳۴، برای مقادیر $\frac{R}{y_1} > 6$ نتایج تقریباً نزدیکی به آنچه از تئوری حاصل می‌گردد ارائه می‌نمایند.

Prozhefa.com

تمام مطالب بالا حاکی از این فرض است که جریان غیرچرخشی است و این فرض نیز یک فرض معقول است زیرا مقدار افت انرژی بایستی در طول کوتاهی از سرریز کوچک بوده و جریان بسیار آشفتهٔ رسیده به انتهای سرریز، بایستی توزیع سرعت عرضی کاملاً نزدیک به توزیع یکنواخت داشته باشد که این امر از خصوصیات جریان غیرچرخشی یک سیال کامل است.

اضافه می‌نماید که در بحث بالا از اثر شتاب ثقل صرفنظر شده و لذا فشارهای به‌دست آمده تنها در اثر عمل گریز از مرکز می‌باشند. برای در نظر گرفتن شتاب ثقل، می‌توان به سادگی فشار هیدرواستاتیکی را به فشار به‌دست آمده از روابط فوق اضافه نمود که این فشار اضافی ممکن است در حالت انرژی گیرنده‌های جامی شکل (شکل ۸a-۲۴) که سازهٔ مربوطه تحت تأثیر آشفتگی و گرداب‌های بعدی قرار دارد، قابل توجه باشد.

۸-۳-۴-۵ کنترل کاویتاسیون در سرریزهای بلند تجربه نشان داده است که سرعت زیاد آب برروی سطوح بتنی سرریزها، می‌تواند باعث ایجاد خرابی ناشی از پدیدهٔ کاویتاسیون گردد. برجستگی‌ها و ناصافی‌های سطح بتنی که به‌هنگام ساخت و یا پس از آن ایجاد می‌شود، باعث ایجاد انحراف خطوط جریان و همچنین مناطق کم‌فشار در بعضی نقاط می‌گردد که چنانچه این فشار کم به حد فشار تخیر برسد، پدیدهٔ کاویتاسیون ظاهر خواهد گشت. قابل ذکر است که اگرچه استفاده از بتن با مقاومت زیاد، خرابی حاصله از سرعتهای بالا را مانع می‌شود، اما چنانچه کاویتاسیون به‌وجود آید، چنین شرطی نیز قادر به‌ممانعت ازخرابیهای ناشی از آن نمی‌باشد.

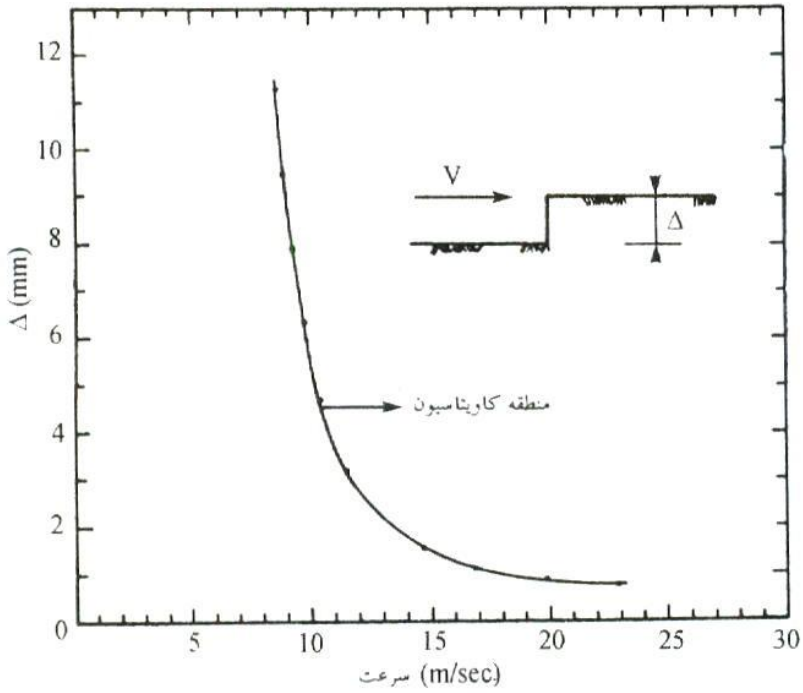
برای جلوگیری از چنین صدماتی، می‌بایست امکان ایجاد کاویتاسیون در یک سرعت خاص در حین طراحی و یا در ضمن اجرا و حتی مرمت سطح سرریز، بررسی گشته و با تخمین نسبتاً دقیق سرعت، میزان زبری مطلق مورد نیاز را به‌دست آورد. به عنوان مثال Elder در سال ۱۹۵۸ زبری مطلق مورد نیاز برای تونل Appalachia به قطر ۵٫۵۰ متر را ۰٫۷۸ میلیمتر تا ۱٫۰۹ میلیمتر معین نمود که این میزان احتمالاً صیقلی‌ترین سطح ممکنه بدون استفاده از پوشش فولادی می‌باشد.

امکان ایجاد پدیدهٔ کاویتاسیون در اثر جریان روی سطوح غیرمسطح، در سال ۱۹۶۳ توسط Johnson و در سالهای ۱۹۷۵ و ۱۹۷۶ توسط Ball بررسی گردید که نتایج تحقیقات آنها برای برجستگی‌ها و فرورفتگی‌های ناگهانی در شکلهای ۸-۲۵، ۸-۲۶ و ۸-۲۷ نشان داده شده است. جالب توجه آن‌که باتوجه به‌شکل ۸-۲۶، در سرعتی برابر ۳۰ m/s حتی در فرورفتگی‌هایی معادل ۳ میلیمتر نیز کاویتاسیون اتفاق خواهد افتاد. در سال ۱۹۷۹ تحقیقاتی در همین زمینه توسط Wang و Chou انجام گرفت که حاصل آن در شکلهای ۸-۲۸ و ۸-۲۹ برای تغییر ارتفاع‌های شیبدار و دایروی نشان داده شده است.

نتایج Wang و Chou برحسب عدد کاوتاسیون اولیه K_i بیان گردیده است که:

$$K_i = \frac{H_a + H + H_r - H_v}{\frac{V_0^2}{2g}} \qquad (۳۸-۸)$$

Prozhefa.com



شکل ۸-۲۵ کاویتاسیون اولیه برای جریان روی برجستگی‌ها (Ball، ۱۹۷۵)

که در آن H_a = ارتفاع معادل فشار اتمسفریک، H = ارتفاع معادل فشار استاتیکی به خاطر آب، H_v = ارتفاع معادل فشار تبخیر، g = شتاب ثقل، H_r = ارتفاع معادل فشار گریز از مرکز و V_0 = سرعت در نزدیکی بالای تغییر شکل.

فشار گریز از مرکز به‌صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$H_r = \frac{V_0^2 y}{gR} \qquad (۳۹-۸)$$

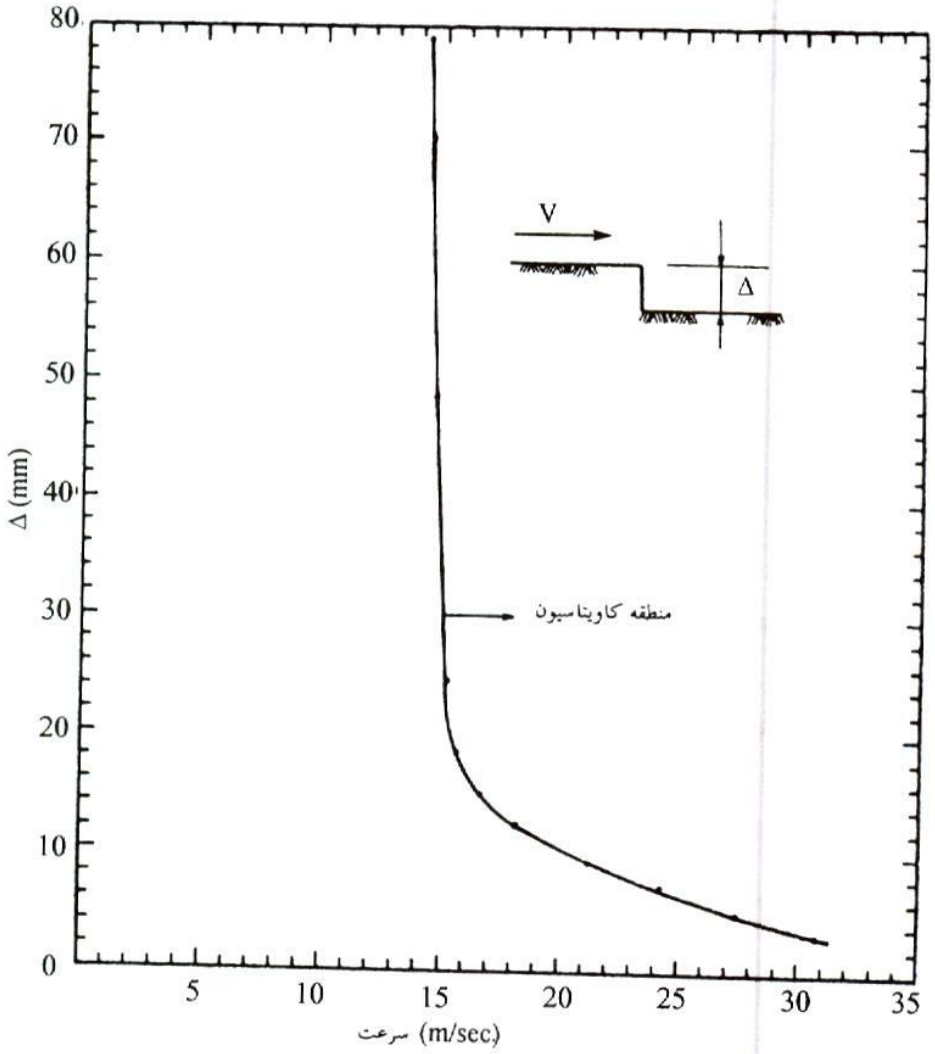
جایی که y = عمق جریان در جهت عمود بر افق و R = شعاع قائم مربوط به انحناء سطح سرریز. اضافه می‌نماید که از آن‌جایی‌که در صورت وجود تحدب، فشار گریز از مرکز منفی و در صورت وجود تقعر، فشار گریز از مرکز مثبت حاصل می‌گردد، می‌بایست علامت جبری (مثبت یا منفی) به H_r افزوده گردد. شایان ذکر است که اضافه نمودن H_r باعث ایجاد تقریب بهتر در محاسبه ارتفاع معادل فشار گشته و از این جهت نسبت به روش قدیمی و سنتی مربوط به‌محاسبه ارتفاع معادل فشار، برتری دارد.

Arnd (۱۹۶۷) نشان داده است که پدیدهٔ کاویتاسیون می‌تواند روی سطوح دارای زبری یکنواخت نیز تشکیل گردد که در این صورت عدد کاویتاسیون اولیه یا شاخص کاویتاسیون چنین سطوحی به‌صورت زیر خواهد بود:

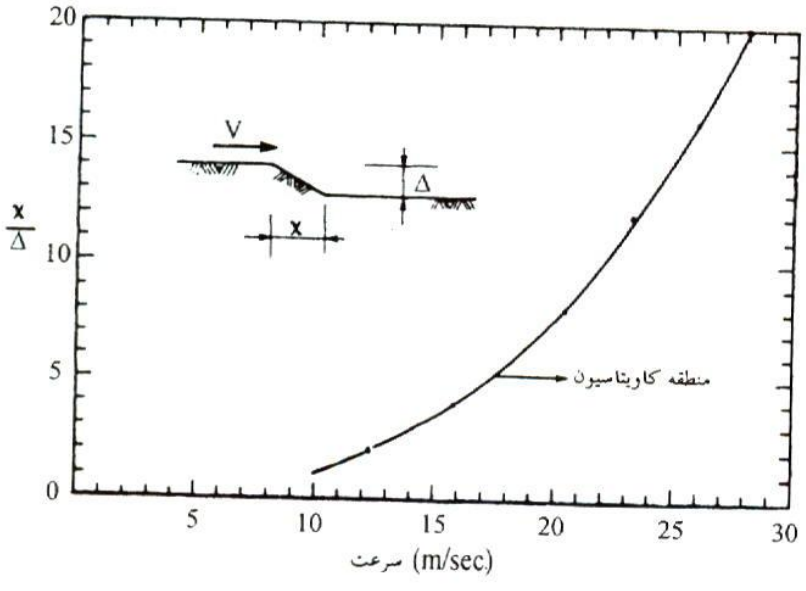
$$K_i = 4f \qquad (۴۰-۸)$$

و f = ضریب مقاومت دارسی - ویسباخ

Prozhefa.com

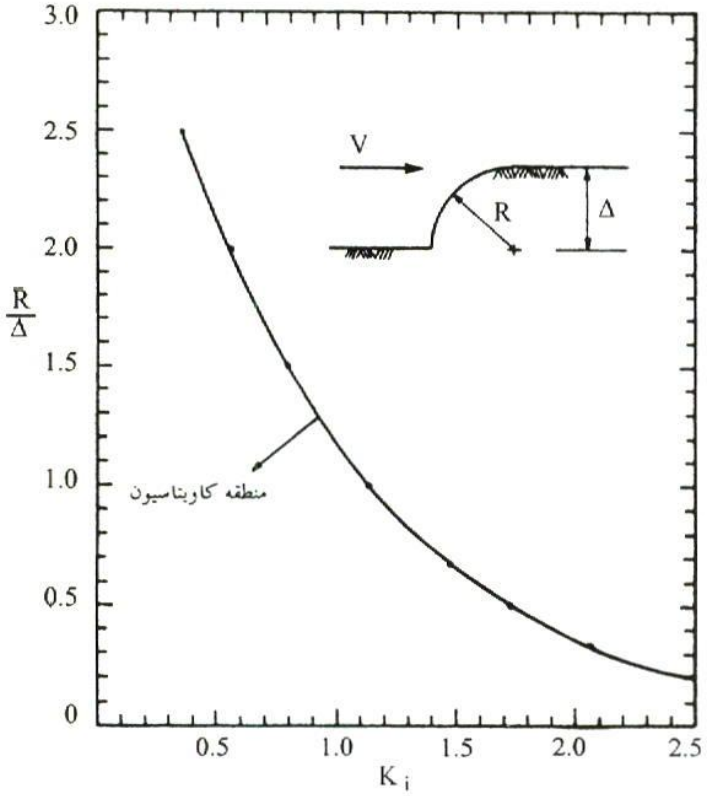


شکل ۸-۲۶ کاویتاسیون اولیه برای فرورفتگی‌های ناگهانی (Johnson، ۱۹۶۳)



شکل ۸-۲۷ کاویتاسیون اولیه برای فرورفتگی شیبدار (Ball ، ۱۹۷۵)

Prozhefa.com

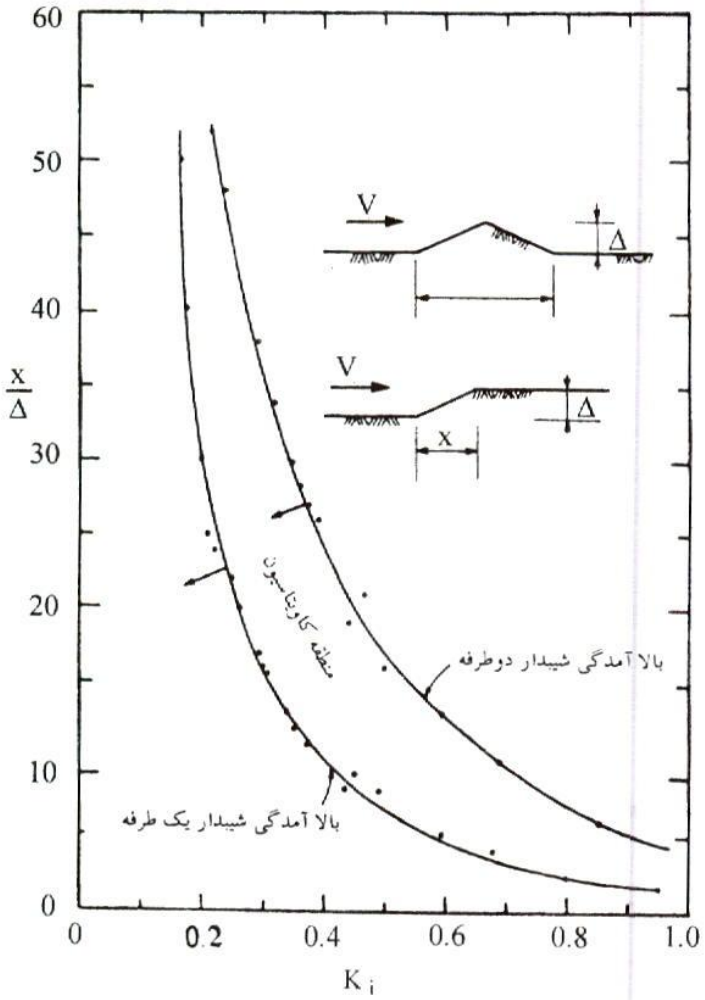


شکل ۸-۲۸ کاویتاسیون اولیه برای برجستگی گردگوشه (Wang و Chou، ۱۹۷۹)

با توجه به پدیدهٔ فوق، هوادهی سرریزها برای جلوگیری از صدمات ناشی از کاویتاسیون در سرعت بالا، امری مهم و همیشه مورد نظر بوده است. در صورتی‌که هوادهی صورت نپذیرد، چنانچه جریان وارد منطقه با فشار کم گردد، به محض رسیدن فشار به فشار تبخیر، در آن منطقه حباب یا بخار ظاهر گشته که با حرکت آنها به سمت پایین‌دست و وارد شدن به منطقه با فشار بالا، حباب یا بخار مذکور از بین رفته و فشار زیادی به منطقه وارد می‌شود. با مخلوط نمودن یک سیال تراکم‌پذیر (هوا) با غلظت ۶ تا ۸ درصد در داخل آب، اثر این تخریب می‌تواند از بین رفته که به همین علت حداقل از سال ۱۹۴۱ سعی می‌شده است تا با وارد کردن هوا در داخل آب، از میزان صدمات ناشی از کاویتاسیون به کاهند.

گزارشات مختلف نشان می‌دهد که استفاده از شیار (شکاف) و سطوح شیبدار برای وارد کردن هوا به داخل آب در جریانهای سریع حداقل در سدهای Yellowtail، Foz do Area Bratsk، Guri و Nurek با موفقیت توأم بوده است. اگرچه در هر یک از موارد فوق، از مدلهای مخصوص استفاده شده است، اما اخیراً تلاش گردیده است تا با تعمیم دادن طراحی هواده‌ها، از ایجاد کاویتاسیون در همان مرحله طراحی اولیه جلوگیری نمایند. برای این منظور می‌بایست زمانی که شیار برای جلوگیری از صدمات ناشی از کاویتاسیون لازم است، محلی که اولین شیار باید ساخته شود، شدت هوادهی مورد نیاز، و نهایتاً فاصله بین دو شیار متوالی معلوم باشد. اساس چنین تحلیلی را می‌توان از اشکال ۸-۲۵، ۸-۲۶، ۸-۲۷، ۸-۲۹ و نیز معادلهٔ ۸-۴۰ معین نمود.

Prozhefa.com

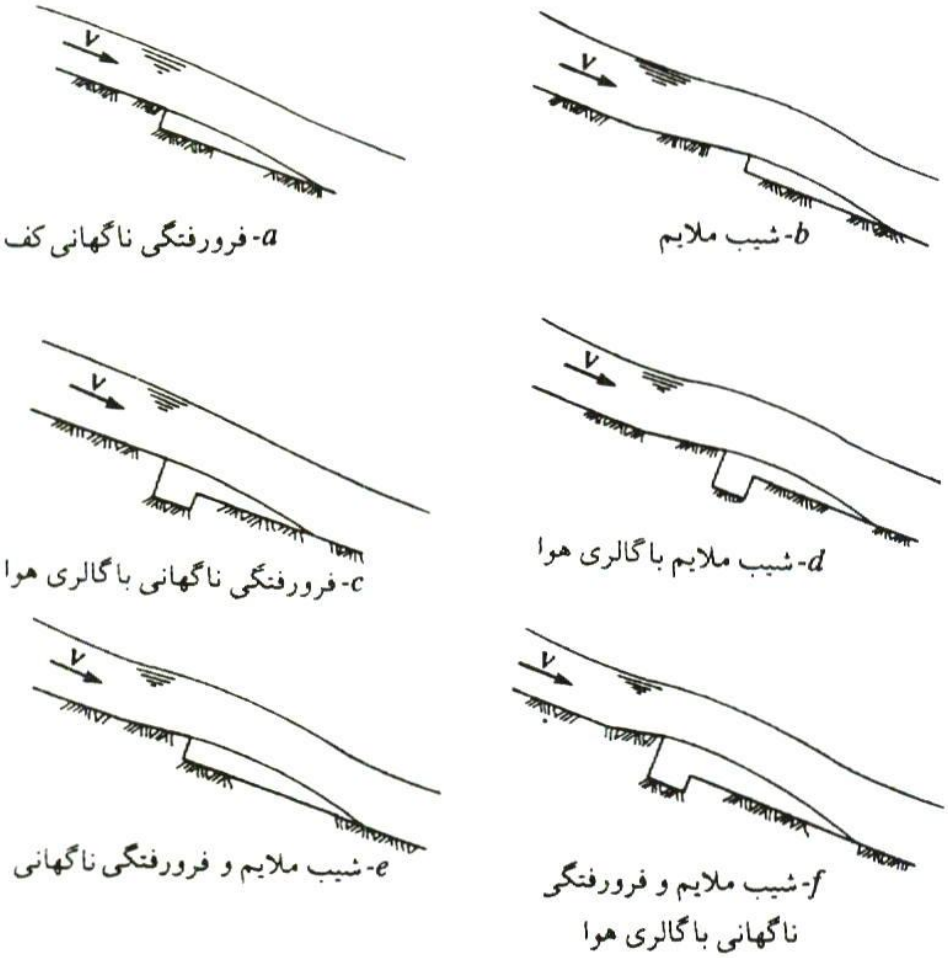


شکل ۸-۲۹ کاویتاسیون اولیه برای بالاآمدگی شیبدار (Wang و Chou، ۱۹۷۹)

Falvey (۱۹۸۲) نشان می‌دهد که سرریزهای تونلی USBR با شاخص کاویتاسیون ۰٫۲ یا بالاتر از صدمات ناشی از کاویتاسیون مصون هستند اما چنانچه شاخص کاویتاسیون کمتر از ۰٫۲ باشد، عموماً با چنین خرابیهایی روبرو هستند. بنابراین برای محاسبه محل اولین شیار، بایستی شاخص‌های سرعت و کاویتاسیون در طول سرریز محاسبه گردند و پس از آن اولین شیار هوا می‌بایست در بالادست نقطه‌ای که کاویتاسیون مقدماتی ظاهر می‌شود، ساخته شود.

مقدار هوای مورد نیاز جهت جلوگیری از خرابیهای کاویتاسیون حداقل تابعی‌است از مشخصات هندسی، سرعت جریان، کشش سطحی و چگونگی مخلوط کردن هوا. مطمئناً مشخصات هندسی شیار یا سطح شیبدار اولین و مهمترین عامل تعیین کننده است که در شکل ۸-۳۰ بعضی از انواع آنها رسم گردیده است.

Prozhefa.com



شکل ۸-۳۰ انواع امکانات هوادهی

Prozhefa.com

مسایل

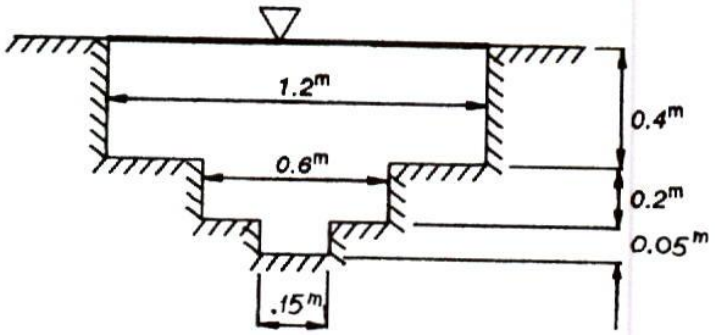
۸-۱ یک سرریز لبه تیز و هم عرض کانال دارای طولی معادل ۲٫۰۰m و ارتفاعی برابر ۰٫۶m می‌باشد چنانچه عمق آب در بالادست سرریز برابر ۰٫۹m باشد، مقدار دبی را محاسبه نمایید. اگر قرار باشد همان مقدار دبی از روی یک سرریز لبه تیز کوچک شده به طول ۱٫۵m و ارتفاع ۰٫۶m عبور نماید تغییر سطح آب در دو حالت را محاسبه نمایید.

۸-۲ در یک کانال مستطیلی به عرض ۲٫۰۰m و ارتفاع دیواره‌های ۱٫۰۰m، یک سرریز لبه تیز به‌ارتفاع ۰٫۱۵m کارگذاشته شده است. اگر حداقل ارتفاع آزاد (لبهٔ آزاد) برای کانال مذکور ۰٫۲m درنظر گرفته شود، حداکثر دبی که می‌تواند از روی سرریز عبور نماید را محاسبه نمایید.

۸-۳ با تقسیم سرریز مثلثی به نوارهای مستطیلی کوچک رابطهٔ بین دبی و ارتفاع آب روی سرریز را بدست آورید.

۸-۴ رابطهٔ بین دبی و ارتفاع آب روی سرریز را در یک سرریز ذوزنقه‌ای به‌دست آورید. این سرریز را به سرریزهای مستطیلی و مثلثی تجزیه نمایید.

۸-۵ در سرریز پله‌ای شکل زیر سطح آب منطبق بر لبه بالای سرریز می‌باشد. دبی جریان یافته از سرریز را محاسبه نمایید. اثر سرعت نزدیک شدن، انقباضات طولی و جانبی فواره و افت انرژی را در ضریب جریان مستتر دانسته و ضریب جریان برای تمام بخشها را ۰٫۶ فرض نمایید.



۸-۶ ارتفاع آب بر روی یک سرریز مثلثی با زاویه رأس ۶۰°، ۰٫۱۵m می‌باشد چه خطائی در اندازه گیری عمق آب در قبل از سرریز داشته باشیم، تا خطای نسبی حاصل از این عدم دقت با خطای حاصل از ۱° خطا در اندازه گیری زاویهٔ رأس سرریز برابر گردد.

۸-۷ در محلی از مسیر یک کانال مستطیلی، سرریز لبه‌تیز هم عرضی به طول ۳٫۵m و ارتفاع ۱٫۵m قرار دارد چنانچه در حالت خاصی از دبی زیاد، سرریز مستغرق گشته و ارتفاع آب در بالادست و

Prozhefa.com

پایین‌دست آن به ترتیب ۲٫۲۵m و ۱٫۶۸m گردد، دبی را محاسبه نمایید.

۸-۸ مطلوب است محاسبهٔ تراز سطح آب و خط انرژی برای حالتی که دبی ۵۰۰m³/s از روی یک سرریز لبهٔ آبریز با طول تاج مؤثر برابر ۴۲٫۰m و ارتفاع تاج معادل ۲۰٫۰m از کف رودخانه عبور نماید. همچنین ارتفاع معادل انرژی را برای حالتی که دبی به ۷۰۰m³/s افزایش یابد به‌دست آورید.

۸-۹ یک سرریز لبه آبریز قائم (شیب بالادست) که فاصلهٔ دو کنارهٔ تاج آن ۴۵٫۰m است برای عبور سیلابی با دبی حداکثر ۲۵۰m³/s به کار می‌رود. اگر برای ارتباط دو کنارهٔ تاج از یک پل باسه دهانه و پایه‌هایی با عرض ۱٫۲m استفاده گردد و محل تماس پایه‌ها با آب به‌صورت نیم دایره باشد، پروفیل تاج و پایین‌دست سرریز را معین نمایید. ارتفاع سرریز برابر ۱۰٫۰m می‌باشد.

۸-۱۰ مطلوب است طرح مقطع مناسبی برای یک سرریز لبه آبریز اجرا شده دریک سد وزنی که در سمت پایین‌دست دارای شیبی حداکثر معادل ۱ (قائم) : ۰٫۸ (افقی) باشد. شدت جریان طرح برای سرریز مزبور ۹۰۰۰m³/s و ارتفاع تاج سرریز در تراز ۲۰۵m حفظ میشود. ارتفاع متوسط بستر رودخانه ۱۰۱m و طول مؤثر تاج سرریز برابر ۵۵٫۱m فرض می‌گردد.

۸-۱۱ برای بالاآوردن سطح آب در یک کانال مستطیلی به عرض ۲٫۵m، از یک سرریز لبه پهن مستطیلی هم عرض کانال، با پهنای ۱٫۰m استفاده شده است. اگر ارتفاع سرریز معادل ۰٫۸m و حداکثر عمق آب در پشت آن برابر ۱٫۳m باشد، دبی جریان را محاسبه نمایید.

۸-۱۲ یک سرریز لبه پهن به ارتفاع ۲۰٫۰m و پهنای ۳٫۰m در داخل یک کانال مستطیلی به‌عرض ۴٫۰۰m قرارگرفته است و کانال مذکور به عنوان یک خروجی از مخزن آبی به مساحت ۰٫۵ هکتار به کار می‌رود. اگر در یک زمان معین، سطح آب در مخزن ۰٫۹m بالاتر از تاج سرریز باشد، مقدار دبی عبوری از روی سرریز را محاسبه نمایید. همچنین زمان لازم برای کاهش سطح آب به‌اندازهٔ ۰٫۶m را تخمین بزنید.

از ورود آب به داخل مخزن و نیز تغییر سطح مخزن در حدود مذکور صرفنظر می‌گردد.

Prozhefa.com

فصل ۹

تبـدیلهـا

جلیل ابریشمی - سیدمحمودحسینی

مقدمه

تبدیل (Transition) عبارت است از سازه هیدرولیکی کوتاهی که برای تغییر سطح مقطع و یا شکل جریان مورد استفاده قرار می‌گیرد. به عبارت دیگر هرگونه تغییر در جهت، شیب و یامقطع کانال که باعث تغییر در شکل و حالت جریان گردد، به‌وسیله تبدیل صورت پذیرفته که برخی از این تغییرات دائمی بوده و برخی نظیر خم در کانالها تنها یک تغییر زودگذر می‌باشد. طبق این تعریف هر سازه کنترل‌کننده جریان، نظیر پایه‌های پل، یک تبدیل بوده (اگرچه تمام تبدیلها کنترل‌کننده جریان نیستند) اما آنچه بیشتر تحت این نام مورد مطالعه قرار می‌گیرد سازه‌ای هیدرولیکی است که تغییر تدریجی سطح و شکل مقطع و لذا وضعیت جریان راباعث می‌شود. به‌طورکلی ساختمان تبدیل مانع ایجاد موج و سایر آشفتگی‌های جریان شده و در اینصورت، افت انرژی ناشی از تغییر مقدار حرکت به‌حداقل خود خواهد رسید. با این شرایط تغییرات در شکل وضعیت جریان تدریجی و به تعبیری خطوط جریان به نحوی هدایت می‌شوند که تقریباً موازی و جریان آب آرام باشد. به همین دلیل در طرح تبدیلها می‌توان از تئوری جریانهای متغیر تدریجی استفاده نمود.

تبدیلها می‌توانند به‌صورت رو باز و بسته و با مصالح بنایی یا از جنس خاکی ساخته شوند و بسته به نوع تبدیل سرعت و عمق جریان می‌تواند کاهش و یا افزایش یابد. تبدیل گاه باعث زیاد شدن سطح مقطع شده که در این‌صورت به تبدیل عریض کننده (Expansion) و گاه کم کردن سطح مقطع را به عهده دارد که به تبدیل تنگ کننده (Contraction) معروف است و در هر دو شکل می‌تواند برای دو نوع حالت جریان زیر بحرانی و فوق بحرانی مورد مطالعه قرار گیرد. آنچه در هیدرولیک تبدیلها مورد بحث قرار می‌گیرد و از اهمیت خاص برخوردار است میزان افت انرژی و محاسبه و طرح پروفیل تبدیل است تا بتواند نحوه پخش سرعت را در انتهای تبدیل به گونه مطلوب تأمین نماید.

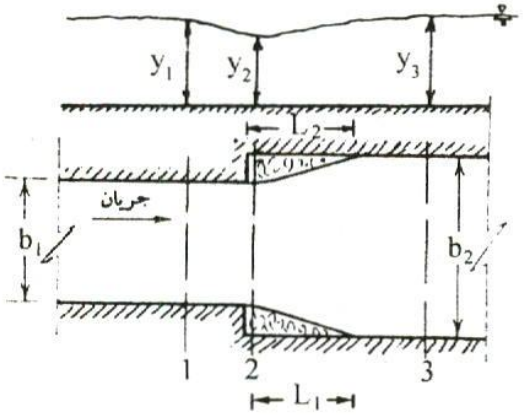
Prozhefa.com

۹-۱ جریان زیر بحرانی (Subcritical Flow)

۹-۱-۱ تبدیلهای عریض کننده (Expansions)

برای تعیین میزان افت انرژی در این‌گونه تبدیلها، نخست یک تبدیل عریض کننده ناگهانی (موضعی) راکه باعث افزایش ناگهانی سطح مقطع می‌گردد، مورد بررسی قرار می‌دهیم.به عنوان مثال چنانچه یک تبدیل عریض‌کننده موضعی مستطیلی راکه در شکل ۹-۱ نشان داده شده است در نظر گیریم، با اعمال $E_۱ = E_۲$ و $F_۲ = F_۳$ و با فرض این‌که: ۱-عمق جریان در عرض مقطع ۲ ثابت و برابر عمق جریان در مقطع ۱ است ($y_۲ = y_۱$)، ۲-عرض جت ایجاد شده در مقطع ۲ مساوی $b_۱$ است، ۳-اصطکاک مرزی قابل صرفنظر کردن می‌باشد، و ۴ - $Fr_۱$ به اندازهٔ کافی کوچک بوده و لذا می توان از $Fr_۱^۴$ صرفنظر نمود، میزان افت انرژی می‌تواند از معادلهٔ زیر به‌دست آید:

$$\Delta E = E_۱ - E_۳ = \frac{V_۱^۲}{۲g}\left[\left(۱ - \frac{b_۱}{b_۲}\right)^۲ + \frac{۲Fr_۱^۲\, b_۱^۳(b_۲ - b_۱)}{b_۲^۴}\right] \qquad (۹-۱)$$



شکل ۹-۱ جریان زیر بحرانی در تبدیل عریض کننده موضعی

جملهٔ دوم داخل کروشه که عبارت مخصوص کانالهای باز است، با کوچک شدن Fr کم‌کم از بین رفته و در حالت کلی تأثیر چندانی در مقدار انرژی محاسباتی ندارد مگر آنکه $Fr_۱ > ۰/۵$ و یا $\frac{b_۲}{b_۱} < ۱/۵$ باشد که شرط اول عموماً اتفاق نیفتاده و شرط دوم اگر هم اتفاق افتد، به جهت اختلاف کم عرض کانال در دو طرف تبدیل، کل افت انرژی کم و مقدار تأثیر جملهٔ دوم ناچیز خواهد بود. بنابراین معادلهٔ یاد شده می‌تواند با اطمینان به‌صورت رابطهٔ زیر تبدیل گردد:

$$\Delta E = \frac{V_۱^۲}{۲g}\left(۱ - \frac{b_۱}{b_۲}\right)^۲ \qquad (۹-۲)$$

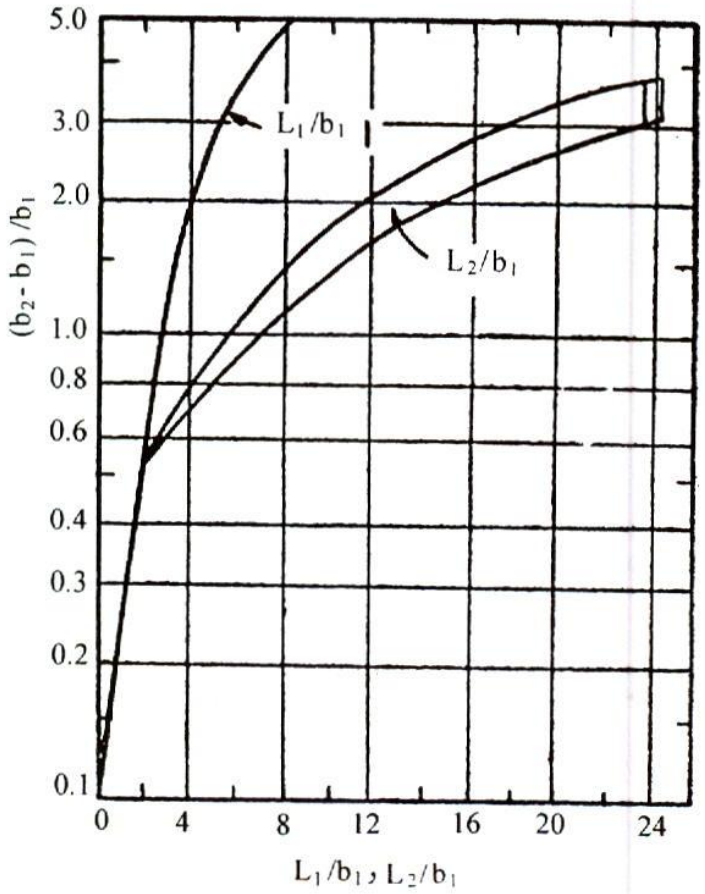
Prozhefa.com

در این حالت با توجه به تغییرات کم عمق جریان، عموماً فرض می‌گردد که $y_1 = y_2 = y_3$ و لذا:

$$\Delta E = \frac{1}{2g}\left(V_1 - \frac{V_1 b_1}{b_2}\right)^2 = \frac{1}{2g}\left(V_1 - \frac{Q/y_1}{b_2}\right)^2 = \frac{1}{2g}\left(V_1 - \frac{Q}{b_2 y_3}\right)^2$$

$$\Delta E = \frac{(V_1 - V_3)^2}{2g} \qquad (۹-۳)$$

نکتهٔ جالبی که در این جا قابل ذکر است آن‌که طبق تحقیقات Abbott و Kline (۱۹۶۲) طول گرداب به‌وجود آمده در دو طرف تا زمانی‌که $\frac{b_2}{b_1} \leq 1/5$ است مساوی بوده اما با افزایش این نسبت، طول مذکور در یک طرف بیش از طرف دیگر شده و دیگر محور تقارن کانال به عنوان محل سرعت ماکزیمم شناخته نمی‌شود (شکل ۹-۱). طول گرداب‌ها مستقل از عدد رینولدز و تابع $\frac{b_2}{b_1}$ بوده که در شکل ۹-۲ نشان داده شده است و در حقیقت زبری کناره‌ها باعث مخلوط شدن آب در طول خطوط جریان و باعث انحراف سریعتر به سوی یک طرف می‌گردد.



شکل ۹-۲ طول گرداب در یک تبدیل عریض کننده موضعی

Prozhefa.com

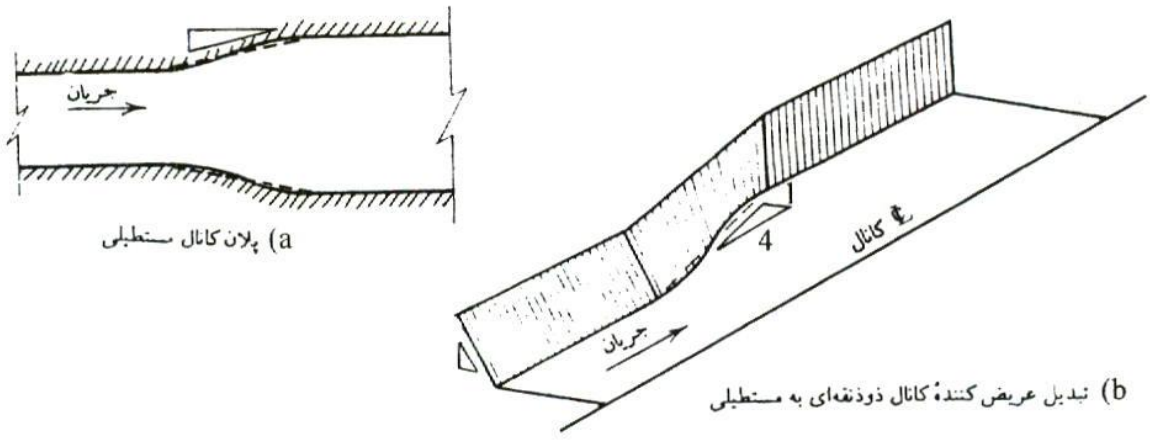
همان‌گونه که در لوله‌های تحت فشار نیز مطرح است، با ایجاد پخی در دیواره‌ها و تدریجی نمودن تغییر سطح مقطع، میزان افت انرژی کاهش پیدا نموده و به همین دلیل در عمل نیز از تبدیلهای عریض کننده تدریجی استفاده می‌شود. طول تبدیلها معمولاً از $۲(b_۲ - b_۱)$ تا $۲٫۵(b_۲ - b_۱)$ تغییر کرده و همان‌گونه که اشاره شد با افزایش شیب کناره‌ها (طول تبدیل) میزان افت انرژی از مقدار داده شده در معادلهٔ ۹-۳ کمتر شده تا حدی‌که در شیب کناره‌های ۱:۴ (شکل ۹-۳) که در آن طول تبدیل معادل $۲(b_۲ - b_۱)$ می‌باشد، مقدار افت انرژی حدود $\frac{۱}{۳}$ افت انرژی تبدیل موضعی بوده و از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید:

$$\Delta E = ۰٫۳ \frac{(V_۱ - V_۳)^۲}{۲g} \qquad (۹-۴)$$

در بعضی موارد به‌جای معادلهٔ ۹-۴ از رابطهٔ ۹-۵ استفاده می‌گردد که گرچه معادلهٔ ۹-۴ ترجیح داده می‌شود اما در محدوده $۱٫۵ < \frac{V_۱}{V_۳} < ۲٫۵$ اختلاف چندانی با یکدیگر ندارند.

$$\Delta E = ۰٫۱ \left(\frac{V_۱^۲}{۲g} - \frac{V_۳^۲}{۲g}\right) \qquad (۹-۵)$$

اضافه می‌نماید که برای شیب‌های تدریجی‌تر عموماً از میزان افت انرژی مربوط به شیب ۱:۴ چندان کاسته نمی‌شود وبدین جهت است که طول تبدیل‌برای جریان زیربحرانی تا حدود $۲(b_۲ - b_۱)$ و یا $۲٫۵(b_۲ - b_۱)$ بیشتر توصیه نمی‌شود. البته همان‌گونه که در شکل ۹-۳ نشان داده شده است در عمل کناره‌های تبدیل در عین تبعیت از شیب ارائه شده، دارای مختصری انحنا بوده که می‌تواند در کانالهای مستطیلی و یا غیرمستطیلی مورد استفاده قرار گیرد.



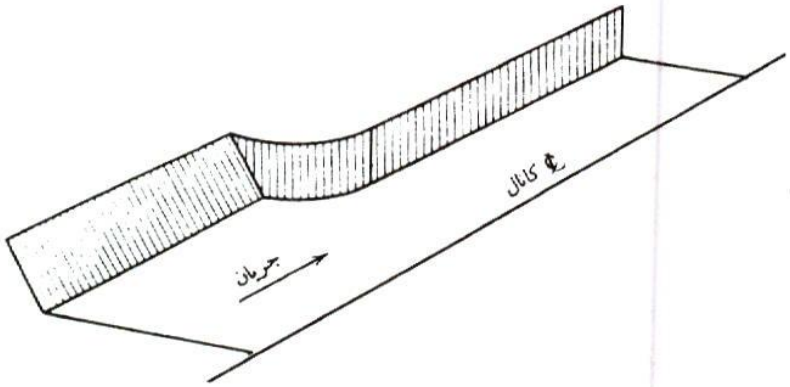
شکل ۹-۳ تبدیل عریض کننده برای کانالها در حالت جریان زیر بحرانی

۹-۱-۲ تبدیلهای تنگ کننده (Contractions)

در این حالت که تبدیل به منظور کوچک نمودن سطح مقطع به کار می‌رود، مقدار افت انرژی کمتر از تبدیلهای عریض کننده بوده و رابطهٔ مربوط می‌تواند مشابه آنچه در حالت قبل عمل شد، استخراج گردد.

Prozhefa.com

تجربیات انجام گرفته روی تبدیلهای تنگ کننده لبه گرد و لبه تیز (Formica، ۱۹۵۵) نشان می‌دهد که افت انرژی در این حالت می‌تواند از رابطهٔ $K\frac{V_3^2}{2g}$ به‌دست آید که در آن V_3 عبارت است از سرعت در مقطع ۳ جایی‌که جریان در پایین‌دست مجدداً یکنواخت گشته است و K عبارت است از ضریب افت انرژی که تابعی از شکل تبدیل و نسبت عمق جریان به‌عرض کانال می‌باشد. چنانچه $\frac{y_3}{b_2} = ۱/۳$ باشد مقدار K برای تبدیل با کناره‌های لبه تیز ۰/۲۳ و لبه گرد ۰/۱۱ می‌باشد و در صورتی‌که $\frac{y_3}{b_2} \leq ۱$ باشد مقادیر یاد شده به ترتیب تا حد ۰/۱ و ۰/۰۴ تقلیل می‌یابند.



شکل ۹-۴ یک تبدیل تنگ کننده برای جریان زیر بحرانی

مثال ۹-۱

آبی با دبی $۱۰ m^3/s$ در یک کانال مستطیلی به عرض ۲m و عمق نرمال ۲m جریان دارد. در قسمتی از مسیر و به منظور اتصال کانال مزبور به یک کانال مستطیلی دیگر به عرض ۵m از یک تبدیل با شیب کناره‌های ۱:۴ استفاده شده است. مطلوب است محاسبه افت انرژی در تبدیل.

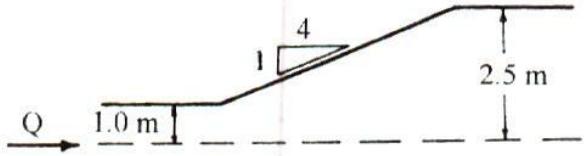
حل:

برای محاسبه میزان افت انرژی اگرچه می‌توان از معادلهٔ ۹-۴ استفاده نمود، اما در این‌جا برای مقایسه جوابها از روابط ۹-۱ و ۹-۵ نیز استفاده می‌شود.

$$\Delta E = ۰/۳ \frac{V_1^2}{2g}\left[\left(۱ - \frac{b_1}{b_2}\right)^2 + \frac{2Fr_1^2 b_1^3 (b_2 - b_1)}{b_1^4}\right]$$

$$V_1 = \frac{Q}{A_1} = \frac{۱۰}{۲ \times ۲} = ۲/۵ m/s$$

$$Fr_1 = \frac{V_1}{\sqrt{gy_1}} = \frac{۲/۵}{\sqrt{۹/۸۱ \times ۲}} = ۰/۵۶ < ۱$$



Prozhefa.com

$$\Delta E = ۰/۳\frac{۲/۵^۲}{۲ \times ۹/۸۱}\left[\left(۱ - \frac{۲}{۵}\right)^۲ + \frac{۲ \times ۰/۵۶^۲ \times ۲^۳(۵ - ۲)}{۵^۴}\right]$$

$$= ۰/۳ \times ۰/۳۱۹\,[۰/۳۶ + ۰/۰۲۴] = ۰/۰۳۶۷\text{m}$$

همان‌گونه که قبلاً اشاره شد، ملاحظه می‌شود که جمله دوم داخل کروشه در مقایسه با عدد اول بسیار کوچک و تأثیر آن ناچیز می‌باشد.

ب:
$$\Delta E = ۰/۳\,\frac{(V_۱ - V_۳)^۲}{۲g} = ۰/۳\,\frac{V_۱^۲}{۲g}\left(۱ - \frac{b_۱}{b_۲}\right)^۲$$

$$y_۳ \approx y_۱ = ۲\text{m}$$

$$V_۳ = \frac{۱۰}{۲ \times ۵} = ۱\text{m/s}$$

$$\Delta E = ۰/۳\frac{(۲/۵ - ۱)^۲}{۲ \times ۹/۸۱} = ۰/۰۳۴۴\text{m}$$

ج: از آن‌جاکه $\frac{V_۱}{V_۳} = ۲/۵$ می‌باشد و در مرز محدوده $۱/۵ < \frac{V_۱}{V_۳} < ۲/۵$ است، معادلهٔ ۹-۵ را نیز امتحان می‌کنیم:

$$\Delta E = ۰/۱\left(\frac{V_۱^۲}{۲g} - \frac{V_۳^۲}{۲g}\right)$$

$$\Delta E = ۰/۱\left(\frac{۲/۵^۲}{۲ \times ۹/۸۱} - \frac{۱^۲}{۲ \times ۹/۸۱}\right) = ۰/۰۲۶۸\text{m}$$

د: در به‌دست آوردن رابطهٔ ۹-۴ فرض گردید که $y_۱ = y_۳$ باشد، برای مشخص شدن میزان خطا در این فرض، می‌توان مقدار دقیقتر $y_۳$ را به‌صورت زیر تعیین نمود:

$$E_۱ = E_۳ + \Delta E$$

مقدار ΔE را از قسمت الف که $y_۳$ در آن نقشی نداشته انتخاب می‌کنیم:

$$y_۱ + \frac{V_۱^۲}{۲g} = y_۳ + \frac{V_۳^۲}{۲g} + ۰/۰۳۶۷$$

$$y_۳ = ۲/۲۴\text{m}$$

ملاحظه می‌شود که علی‌رغم افزایش عرض کانال، مقدار عمق جریان در انتهای تبدیل افزایش یافته و البته اختلاف چندانی با $y_۱$ ندارد.

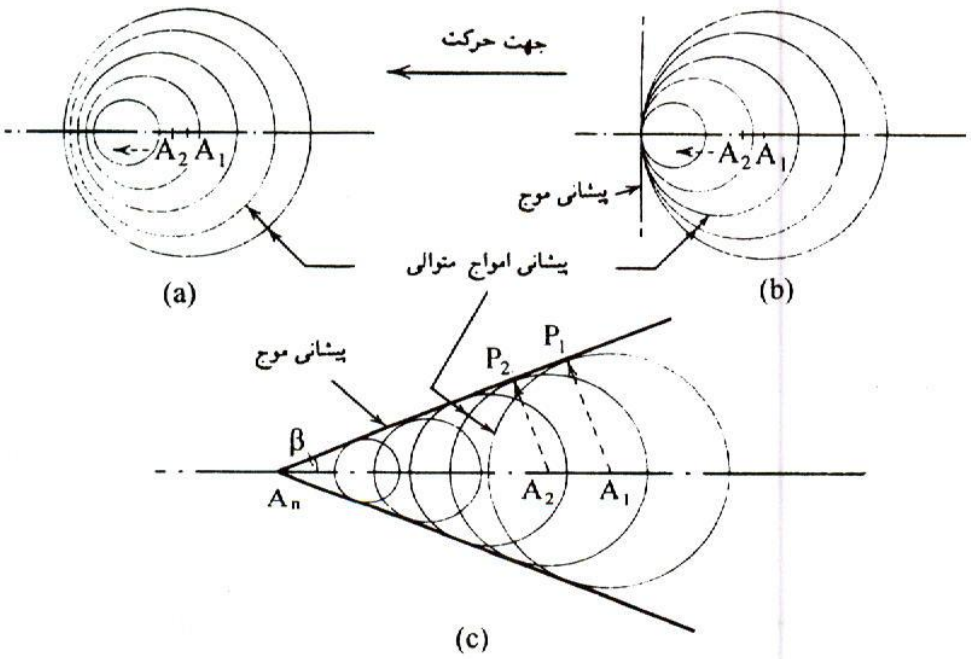
Prozhefa.com

۹-۲ جریان فوق بحرانی (Supercritical Flow)

در حالت جریان زیر بحرانی فرض شد که سرعت و عمق جریان در عرض هر مقطع از جریان ثابت می‌ماند که تقریباً درست بوده و تنها ممکن است در نزدیکی دیواره‌های کناری تبدیلهای تنگ‌کننده، سرعت اندکی زیادتر باشد. در جریانهای فوق بحرانی، شکل حرکت موج ایجاد شده، دارای پیچیدگی بیشتری بوده و آنچه اتفاق می‌افتد این است که هر مانع موجود بر سر راه باعث ایجاد یک موج سطحی شده که در عین حال که به سمت پایین‌دست حرکت می‌کند، در عرض جریان نیز پیش می‌رود.

برای بررسی موضوع، یک ذرهٔ جامد را که در نقطهٔ A_1 قرار دارد و با سرعت V در داخل یک حجم آب ساکن حرکت می‌کند در نظر می‌گیریم. ذرهٔ مزبور باعث ایجاد موجی در نقطه A_1 می‌گردد که این موج با سرعت C به تمام اطراف پخش می‌شود و لذا در هر زمان بعدی جلو موج که اصطلاحاً پیشانی موج نامیده می‌شود دارای شکل دایروی خواهد بود که مرکز آن A_1 می‌باشد. با حرکت ذرهٔ جامد و عبور از نقاط A_2، A_3 و... پیشانی موجهای مشابهی به‌وجود خواهد آمد. حال اگر $V < C$ باشد، ذره از موج عقب افتاده و شکل ۹a-۵ به‌وجود می‌آید.

اگر $V = C$ باشد، ذره با سرعتی مساوی سرعت موج حرکت نموده و شکلی نظیر ۹b-۵ را ایجاد خواهد نمود که از ترکیب پیشانی امواج حاصل شده از حرکت ذره، پیشانی تلاطم تشکیل می‌گردد. و نهایتاً



شکل ۹-۵ حرکت آشفتگی جریان در سرعتی کوچکتر، مساوی و بزرگتر از سرعت موج طبیعی

Prozhefa.com

اگر $V > C$ باشد، ذره همیشه جلوتر از پیشانی موج قبلی بوده و موقعی‌که به نقطهٔ A_n می‌رسد موج اولی به اندازهٔ $A_1 p_1$، دومی به میزان $A_2 p_2$ و... بزرگ شده و پیشانی امواج می‌تواند به‌وسیلهٔ خط مماسی، $A_n P_1$ که به همه دوایر امواج مماس است، پوشش داده شده‌که در این‌صورت این خط، خود حالت یک پیشانی موج مجزا را داشته و از آن‌جاکه حرکت موج از A_1 تا p_1 در همان زمان صورت می‌گیرد که ذره خود را از A_1 به A_n می‌رساند، می‌توان نوشت:

$$\sin\beta = \frac{A_1 p_1}{A_1 A_n} = \frac{C}{V} \qquad (۶-۹)$$

همان‌گونه که قبلاً اشاره شد، موجهای طولانی که آشفتگی زیاد جریان به‌وجود نمی‌آورند، با سرعت $C = \sqrt{gy}$ حرکت نموده و لذا:

$$\sin\beta = \frac{A_1 p_1}{A_1 A_n} = \frac{\sqrt{gy}}{V} = \frac{1}{F_r} \qquad (۷-۹)$$

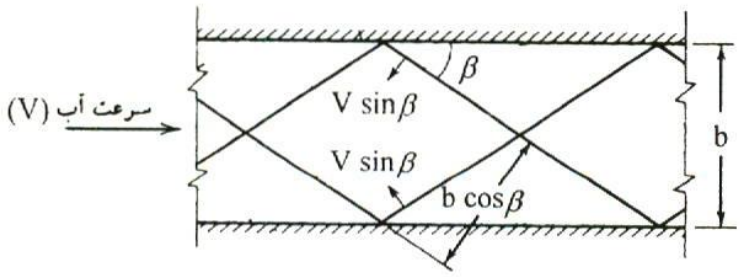
لازم به اشاره است که حالت مشابهی تحت عنوان موج ضربه‌ای (Shock Wave) برای گازهای تراکم‌پذیر در سرعتهای بالاتر از سرعت صوت (Supersonic Speeds) پیش می‌آید که در آن صورت $\sin\beta$ معادل $\frac{1}{M_a}$ بوده که M_a عدد Mach نامیده می‌شود.

موقعی‌که آب با سرعت V در حرکت و ذره ثابت باشد (مثلاً یک برجستگی کوچک روی دیواره‌های کنار کانال)، پیشانی‌های امواج واضح و ثابتی مطابق آنچه در شکل ۹-۶ نشان داده شده است به‌وجود خواهد آمد، اما آنچه مهم است این‌که در اعمال معادلهٔ ۹-۷ در این شکل، می‌بایست دقت‌های دیگری را در نظر گرفت. به‌عبارت دیگر امواج و آشفتگی‌های شدیدتر با سرعتی بیش از $\sqrt{gy}$ حرکت نموده به‌صورتی‌که برای موجهای نوسانی نظیر امواج دریا (شکل ۹-۷) داریم:

$$C^2 = \frac{gL}{2\pi} \tanh \frac{2\pi y}{L} \qquad (۸-۹)$$

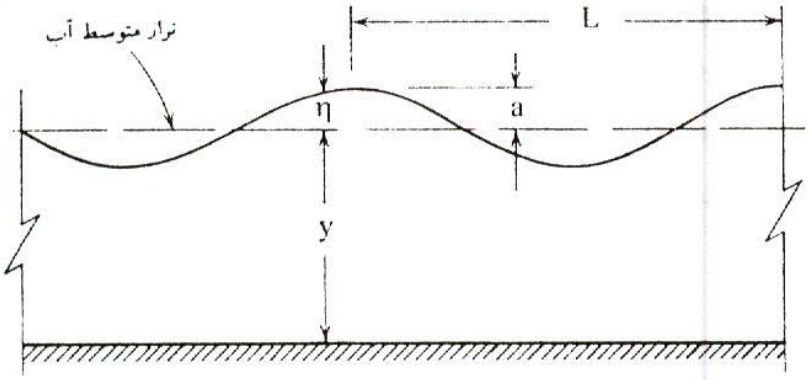
که در آن L = طول موج و y = عمق آب می‌باشد. موقعی‌که L طول موج زیاد باشد (در مقایسه با y)، مقدار $\frac{2\pi y}{L}$ کم شده و لذا $\tanh\frac{2\pi y}{L}$ به سمت $\frac{2\pi y}{L}$ میل می‌کند و در نتیجه:

$$C^2 = \frac{gL}{2\pi} \times \frac{2\pi y}{L} = gy \qquad (۹-۹)$$



شکل ۹-۶ الگوی یک موج ایستاده در کانال مستطیلی

Prozhefa.com



شکل ۹-۷ موج نوسانی

با توجه به شکل ۹-۶ ملاحظه می‌شود که در چنین شرایطی، L محدود بوده و تابعی است از عرض کانال (b) که در نتیجه $\sin\beta$ مساوی $\frac{۱}{Fr}$ نبوده و می‌بایست تصحیحاتی روی آن انجام پذیرد. چنانچه جریان آب زیر بحرانی باشد، $(۰<V<\sqrt{gy})$ سرعت آب کمتر از سرعت موج بوده و لذا کناره‌های تبدیل باعث تغییر سطح و ارتفاع آب هم در بالادست و هم در پایین‌دست تبدیل می‌گردد، به‌عبارت دیگر هرگونه به‌هم خوردگی و تغییر سطح به پایین‌دست و بالادست منتقل خواهد شد در صورتی‌که در جریان فوق بحرانی، $(V>\sqrt{gy})$ تأثیر تبدیل تنها در پایین‌دست می‌باشد. شکل ۹-۸ یک مثال از آشفتگی و به‌هم زدگی نسبتاً بزرگ و پیشانی موج که در جریان فوق بحرانی و در اثر انحراف دیوار قائم کانال به اندازهٔ $\Delta\theta$ به‌وجود آمده است را نشان می‌دهد. پیشانی موج به‌وجود آمده باعث تغییر عمقی به اندازهٔ Δy شده که چنانچه انحراف پیشانی نسبت به جهت اولیهٔ سرعت برابر $\beta_۱$ باشد و با توجه به این‌که نیروی اضافی در طول پیشانی وارد نمی‌شود، می‌توان از معادلهٔ مقدار حرکت، رابطهٔ زیر را نتیجه گرفت:

$$V_۱ \cos\beta_۱ = V_۲ \cos(\beta_۱ - \Delta\theta) \qquad (۹-۱۰)$$

با استفاده از معادلهٔ پیوستگی و برای واحد طول پیشانی موج و در نظر گرفتن تصویر مؤلفه سرعت عمود بر پیشانی موج:

$$V_۱ y_۱ \sin\beta_۱ = V_۲ y_۲ \sin(\beta_۱ - \Delta\theta) \qquad (۹-۱۱)$$

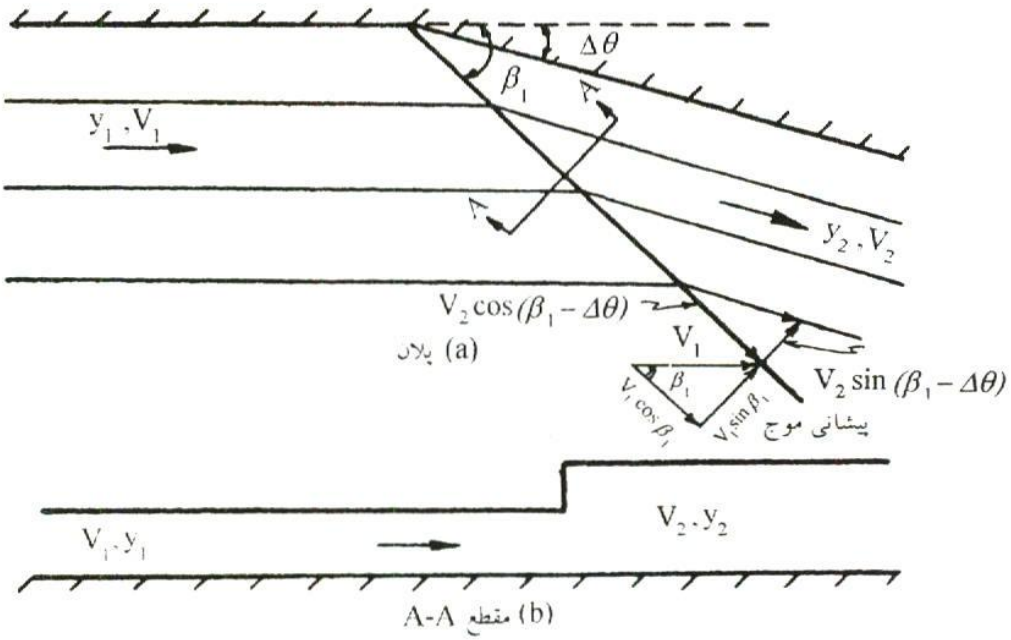
چنانچه معادلهٔ مقدار حرکت برای همان واحد طول نوشته و از اصطکاک کناره‌ها و نیروی وزن صرفنظر گردد، داریم:

$$\frac{\rho g y_۱^۲}{۲} - \frac{\rho g y_۲^۲}{۲} = \rho y_۲ V_۲^۲ \sin^۲(\beta_۱ - \Delta\theta) - \rho y_۱ V_۱^۲ \sin^۲\beta_۱ \qquad (۹-۱۲)$$

با ترکیب معادلات ۹-۱۱ و ۹-۱۲:

$$\sin\beta_۱ = \frac{۱}{Fr_۱}\sqrt{\frac{۱}{۲}\frac{y_۲}{y_۱}\left(۱+\frac{y_۲}{y_۱}\right)} \qquad (۹-۱۳)$$

Prozhefa.com



شکل ۹-۸ پیشانی موج به جهت انحراف دیوار

که در مواقع امواج و آشفتگی‌های کوچک (زمانی‌که $\frac{y_2}{y_1}$ به سمت یک میل کند)، به همان رابطهٔ ۹-۷ منتهی می‌گردد. برای یک حالت خاص از امواج با ارتفاع کم و از ترکیب معادلات ۹-۱۰ و ۹-۱۱ می‌توان به معادلهٔ زیر دست یافت:

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{\tan\beta_1}{\tan(\beta_1 - \Delta\theta)} \qquad (۹-۱۴)$$

که در چنین صورتی $y_2 = y_1 + \Delta y$ بوده اگر $\Delta\theta$ به سمت صفر میل کند:

$$\lim_{\Delta\theta \to 0} \frac{\Delta y}{\Delta\theta} = \frac{dy}{d\theta} = \frac{V^2}{g} \tan\beta \qquad (۹-۱۵)$$

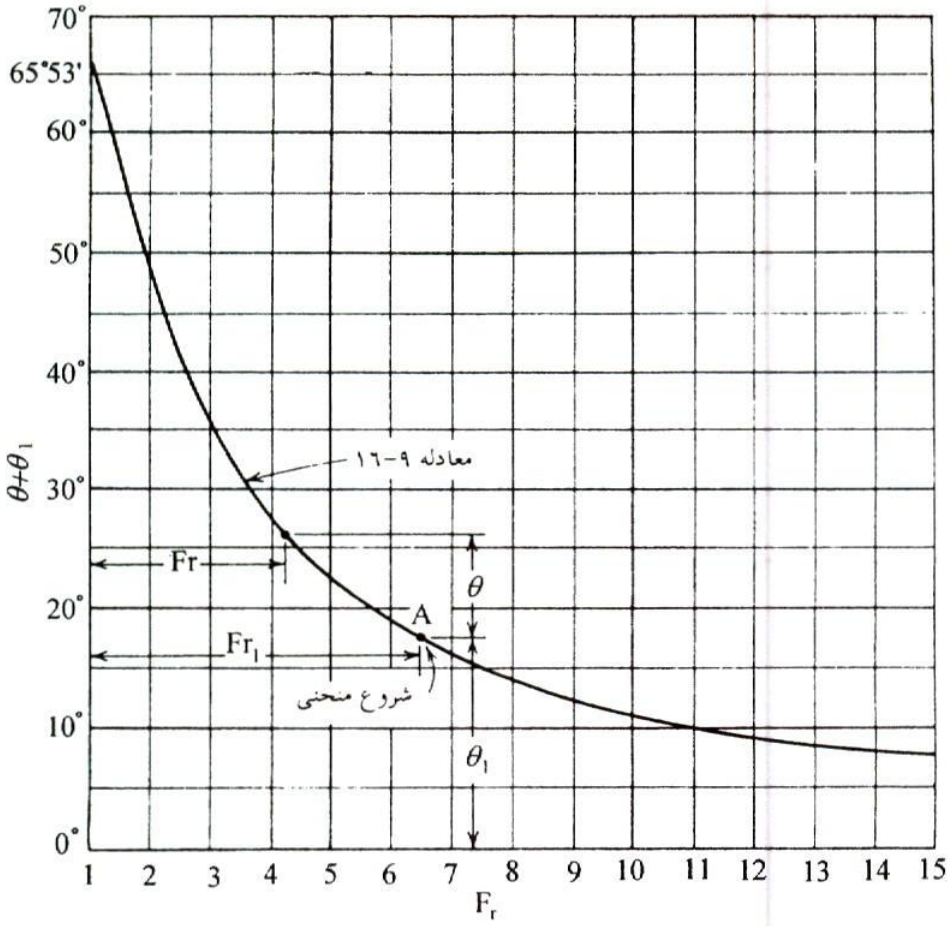
انتگرال‌گیری از رابطهٔ فوق و با فرض ثابت بودن انرژی مخصوص و غیرقابل ملاحظه بودن افت انرژی (به جهت تغییر عمق ممتد) به معادلهٔ ذیل منتج می‌گردد:

(۹-۱۶)

که در آن θ_1 ثابت انتگرال بوده و با قرار دادن مقدار y_1 به‌جای y (در مقدار Fr) و $\theta = 0$ به‌دست می‌آید. معادلهٔ ۹-۱۶ را می‌توان به‌صورت منحنی $\theta + \theta_1$ برحسب Fr_1 (شکل ۹-۹) رسم نمود که با استفاده از این شکل و جداکردن مقدار Fr_1 روی محور افقی مقدار θ_1 به‌دست می‌آید و از آن پس با انتخاب Fr_1 و کسر کردن θ_1 از $\theta + \theta_1$، زاویهٔ θ معین می‌گردد.

از معادلهٔ ۹-۱۶ و شکل ۹-۹ واضح می‌شود که برای انحراف کناره‌ها به‌صورت منحنی (θ غیرثابت)،

Prozhefa.com



شکل ۹-۹ تغییرات عدد فرود و زاویهٔ انحراف در طول کناره منحنی شکل در جریان فوق بحرانی

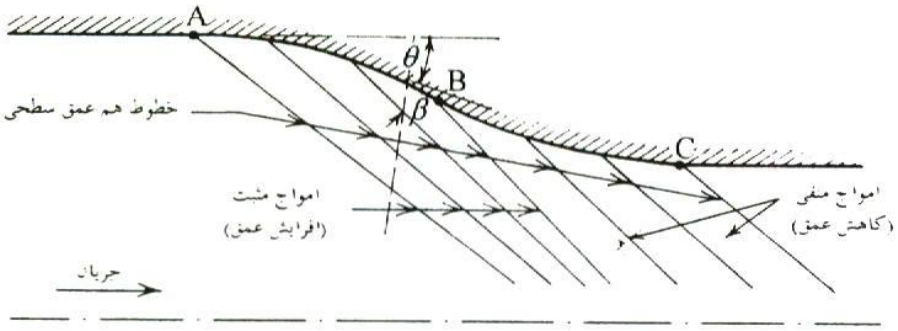
در صورتی‌که θ به سمت پایین‌دست بتدریج افزایش پیدا نماید، (شکل ۹-۱۰ دیوارهٔ مقعر) عدد فرود کاهش و عمق جریان نیز تدریجاً افزایش می‌یابد و این علاوه بر آن‌که در دیواره‌ها صادق است در طول خطوط به‌وجود آمده از دیوارها نیز صادق است. و از آن‌جاکه $\sin\beta = \frac{۱}{Fr}$ ، کاهش Fr ، افزایش β را به دنبال داشته و بنابراین عمق جریان از کناره‌ها به سمت دور از آنها و در جهت حرکت بتدریج افزایش و شیب پروفیل سطح تندتر می‌گردد. عکس موضوع فوق در مورد کاهش تدریجی θ اتفاق می‌افتد که در شکلهای ۹-۹ و ۹-۱۰ مشهود است.

در این حالت برای به‌دست آوردن عمق جریان می‌توان به‌صورت زیر عمل نمود:

$$E = E_۱ = y + \frac{V^۲}{۲g} = y\left(۱ + \frac{Fr^۲}{۲}\right)$$

$$y = \frac{E_۱}{۱ + Fr^۲/۲} \qquad (۱۷-۹)$$

Prozhefa.com



شکل ۹-۱۰ الگوی امواج در اثر جریان فوق بحرانی در طول یک کنارهٔ منحنی شکل

مثال ۹-۲

در مسیر یک کانال دارای جریان فوق بحرانی با سرعت ۴٫۴۳m/s و عمق ۰٫۱۲m، به یک کنارهٔ منحنی شکل با زاویهٔ انحراف کل ۵° می‌رسیم. تعیین کنید عدد فرود، عمق جریان و جهت خط بهم خوردگی β بلافاصله پس از منحنی اگر کناره نسبت به جریان الف: مقعر، ب: محدب باشد (کانال افقی و بدون اصطکاک فرض می‌شود).

حل:

$$Fr_1 = \frac{۴٫۳۴}{\sqrt{۰٫۱۲ \times ۹٫۸۱}} = ۴٫۰$$

$$\beta_1 = \sin^{-1}\frac{۱}{۴} = ۱۴٫۴۷۸°$$

برای تعیین تأثیر کناره روی جریان، می‌توان از معادلهٔ ۹-۱۶ و یا شکل ۹-۹ استفاده نمود.

الف: دیوار مقعر:

برای $Fr_1 = ۴$ و با استفاده از منحنی:

$$\theta + \theta_1 = ۲۷٫۲۶°$$

$$\Delta\theta = +۵°$$

و لذا در انتهای منحنی:

$$\theta + \theta_1 = ۲۷٫۲۶ + ۵ = ۳۲٫۲۶°$$

برای این مقدار و با استفاده ازشکل ۹-۹، $Fr_2 = ۳٫۳۲$ به دست آمده و نظر به‌ثابت بودن انرژی مخصوص:

$$E = E_1 = E_2 = y_1\left(۱ + \frac{Fr_1^2}{۲}\right) = y_2\left(۱ + \frac{Fr_2^2}{۲}\right)$$

$$y_2 = \frac{۰٫۱۲\left[\frac{۱ + ۴^2}{۲}\right]}{\left[۱ + \frac{(۳٫۳۲)^2}{۲}\right]} = ۰٫۱۶۶\,\text{m}$$

Prozhefa.com

$$\beta_۲ = \sin^{-۱}\frac{۱}{۳٫۳۲} = ۱۷٫۵۳^\circ$$

ب : دیوار محدب :

$$\Delta\theta = -۵^\circ$$

و لذا در انتهای منحنی:

$$\theta + \theta_۱ = ۲۷٫۲۶ - ۵ = ۲۲٫۲۶^\circ$$

از شکل ۹-۹

$$Fr_۲ = ۴٫۹۵$$

$$y_۲ = \frac{۰٫۱۲\left(۱+\frac{۱۶}{۲}\right)}{\left(۱+\frac{۴٫۹۵}{۲}\right)} = ۰٫۰۸۲\,\mathrm{m}$$

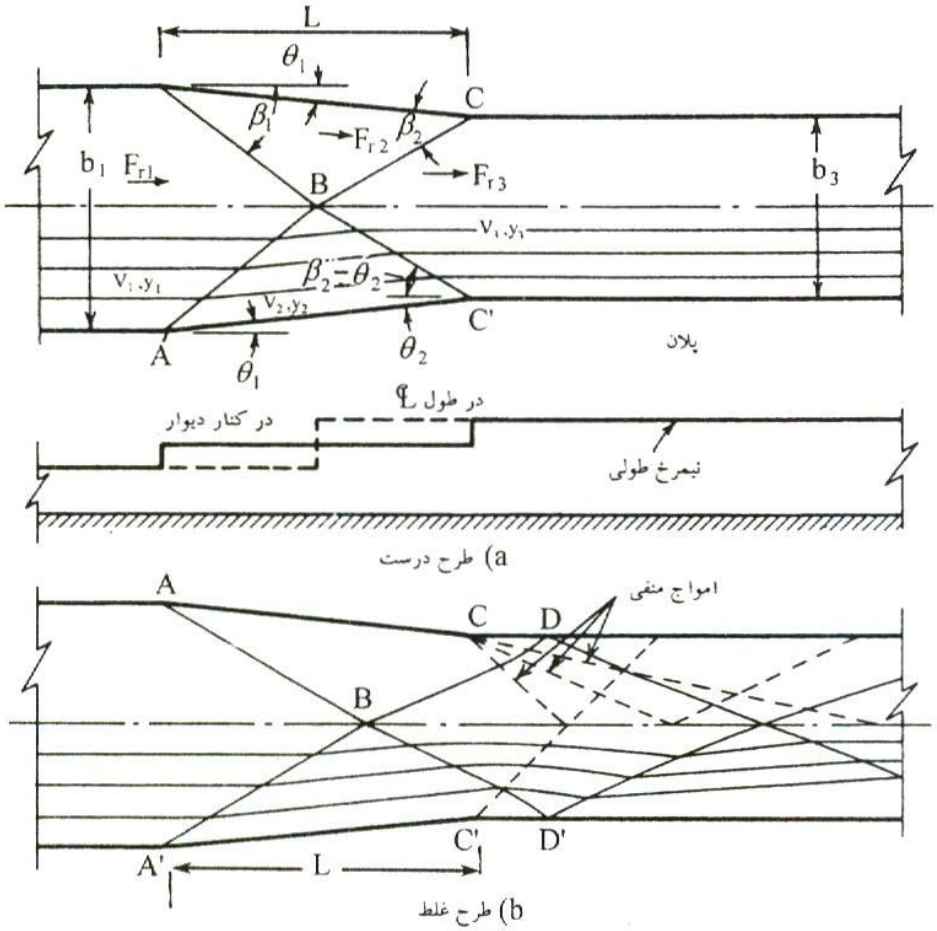
$$\beta_۲ = \sin^{-۱}\frac{۱}{۴٫۹۵} = ۱۱٫۶۵۵^\circ$$

۹-۲-۱ تبدیلهای تنگ کننده (Contractions)

از مباحث گذشته روشن می‌شود که معادلهٔ ۹-۱۶ و یا شکل ۹-۹ می‌تواند برای محاسبهٔ کامل الگوی جریان در داخل یک تبدیل تنگ کننده نظیر شکل ۹-۱۰ به کار رود. در این حالت در طول AB، Fr کاهش و y و β افزایش می‌یابند اگرچه شدت افزایش β به اندازهٔ θ نخواهد بود. برعکس در قسمت BC ، عمق کاهش پیدا می‌نماید. Rouse (۱۹۵۰) نشان داد که تبدیلهای s شکل در مقایسه با تبدیلهای دیوار مستقیم تولید عمق جریان بیشتری نموده و دیواره‌های کناری بلندتری نیاز دارد و لذا تبدیلهای دیوار مستقیم به مراتب مناسب‌تر بوده و تنها در این‌صورت است که در پایین‌دست تبدیل جریان یکنواخت ایجاد می‌شود (شکل ۹-۱۱a). اگر زاویه θ ، دقیق انتخاب شود موجهای BC و BC' که از نقطهٔ B محل برخورد دو موج AB و $A'B$ منعکس می‌شوند در نقاط C و C' (انتهای تبدیل)، به دیواره‌ها می‌رسند که در این‌صورت امواج انعکاسی دیگری تشکیل نخواهد شد اما اگر در نقاط دیگری نظیر D و D' به دیواره‌ها برخورد کنند (شکل ۹-۱۱b)، انعکاسات پیچیدهٔ دیگری به دنبال خواهد داشت.

در طراحی تبدیلها، اعم از جریان فوق بحرانی یا زیر بحرانی، چنانچه مقطع پایین‌دست بیش از اندازه باریک باشد، عمل انسداد به‌وجود می‌آید. در این حالت در داخل تبدیل جریان بحرانی ایجاد شده و باعث افت انرژی نسبتاً زیاد می‌گردد. در جریانهای فوق بحرانی، علاوه بر این مورد و به جهت پیچیدگی امر، امکان ایجاد عمل انسداد به گونه دیگری نیز هست که در حالت اخیر در بالادست تبدیل پرش هیدرولیکی رخ داده و سپس حالت بحرانی در داخل تبدیل به‌وجود می‌آید (شکل ۹-۱۲ بالا سمت راست) که محاسبات مربوطه براساس روابط $E_۲ = E_۳$ و $F_۱ = F_۲$ صورت می‌پذیرد.

Prozhefa.com

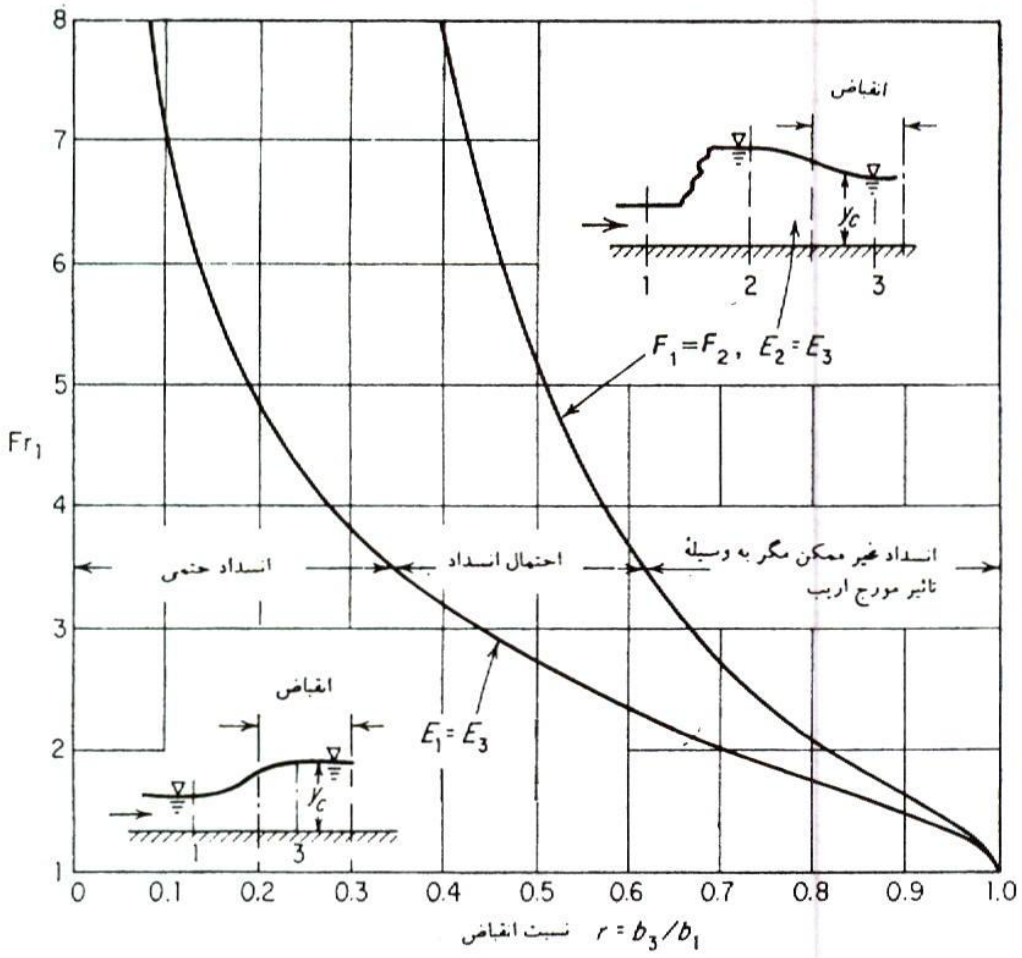


شکل ۹-۱۱ موج فوق بحرانی در یک تبدیل تنگ کنندهٔ دیوار مستقیم

با توجه به دو محدودیت یاد شده و نظر به شکل ۹-۱۲، ملاحظه می‌شود که برای مقادیر Fr_1 یک منطقهٔ میانی وجود دارد که به ازای این مقادیر Fr_1 ، عمل انسداد ممکن است اتفاق بیفتد و یا نیفتد. اما با توجه به این‌که در جریانهای فوق بحرانی، امواج به‌وجود آمده مایلند تا عمل انسداد را به‌وجود آورند، لذا می‌بایست برای جلوگیری از عمل انسداد Fr_1 به اندازهٔ کافی زیاد و یا نسبت تنگ شدگی کم باشد ($\frac{b_3}{b_1}$ نسبتاً زیاد باشد). با اعمال این موضوع، Fr_3 به میزان کافی بالاتر از واحد خواهد بود که این امر برای چنین تبدیلهایی ضروری است. در هر حال پلان یک تبدیل تنگ کننده فوق بحرانی با دیواره‌های مستقیم، در قسمت بالای شکل ۹-۱۱ نشان داده شده است که جریان در داخل آن نسبت به محور تبدیل متقارن است. با در نظر گرفتن جهت‌های عمود بر پیشانی امواج AB و $A'B$ و با استفاده از معادلهٔ ۹-۱۳، نسبت عمق جریانهای y_1 و y_2 از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید:

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2}\left(\sqrt{1 + 8Fr_1^2 \sin^2\beta_1} - 1\right) \qquad (۹-۱۸)$$

Prozhefa.com



شکل ۹-۱۲ انسداد در یک تبدیل تنگ کنندهٔ فوق بحرانی

که در آن، β_1 عبارت است از زاویهٔ انحراف امواج AB و $A'B$ نسبت به جهت اولیهٔ جریان. به‌روش مشابه، برای امواج BC و BC' داریم:

$$\frac{y_3}{y_2}=\frac{1}{2}\left(\sqrt{1+8Fr_2^2\sin^2\beta_2}-1\right) \qquad (۹-۱۹)$$

که β_2 زاویهٔ موج BC نسبت به دیوار منحرف شده است. از طرفی برای این حالت تبدیل، رابطهٔ ۹-۱۴ و همچنین مشابه آن برای $\frac{y_3}{y_2}$ به‌صورت زیر در می‌آید:

$$\frac{y_2}{y_1}=\frac{\tan\beta_1}{\tan(\beta_1-\theta)} \qquad (۹-۲۰)$$

$$\frac{y_3}{y_2}=\frac{\tan\beta_2}{\tan(\beta_2-\theta)} \qquad (۹-۲۱)$$

با حذف نسبت $\frac{y_2}{y_1}$ از معادلات ۹-۱۸ و ۹-۲۰، خواهیم داشت: