خسارات کاویتاسیون در سرریزها وراههای جلوگیری از آن

امید فرقانی دانشجوی کارشناسی عمران، دانشکده صنعت آب و برق(شهید عبّاسپور)، تهران[1]
ضیاءالدین ایدی دانشجوی کارشناسی عمران، دانشکده صنعت آب و برق(شهید عبّاسپور)، تهران[2]

چکیده

با توجه به رشد مخازن سدها، نیاز به سرریزها نیز روز به روز افزایش می‌یابد. امّا مشکلی که در این سازه وجود دارد وقوع کاویتاسیون است. در سال ۱۹۱۵ کاویتاسیون اشکالاتی در تونل تخلیه بوجود آورد و در سال ۱۹۴۱ مشاهده شد که سرریزها نیز همین مشکل را پیدا میکنند. البتّه در آن زمان کاویتاسیون بعنوان دلیل اصلی این خرابیها شناخته نشد، امّا امروزه مشخّص شده که وقوع کاویتاسیون در مناطقی که سرعت سیّال زیاد می‌باشد باعث این خرابیهاست و راههایی نیز برای برطرف کردن این مشکل پیشنهاد شده و اجرا می‌شود.

ناهمواریهای سطحی باعث جدا کردن جریان از سطح و تشکیل حباب می‌شوند این حبابها در پایین‌دست به علّت افزایش فشار دچار درونفجاری شده، باعث افزایش بیشتر فشار می‌شوند و موجب کنده شدن و وارد آمدن خسارت به مواد و مصالح کف می‌شوند.

هدف از این مقاله بررسی خرابیها و راههای مؤثّر مقابله با اثرات کاویتاسیون روی سرریزها می‌باشد و شامل تشریح پدیده، عوامل مؤثّر و تشدید کننده، خرابیها و راههای جلوگیری از این خرابیها از جمله روش هوادهی می‌باشد همچنین در آن به بررسی این موارد در سرریزهای سد کارون نیز پرداخته شده است.

واژه‌های کلیدی: کاویتاسیون، سرریزهای پلکانی، هوادهی

۱-مقدمه

وجود ناصافی‌ها و ناهمواری‌های کف سرریز باعث می‌شود که در سرعتهای بالا، جریان از بستر جدا شده و یک جریان گردابی بوجود آید و به علّت کاهش فشار، تا فشار بخار آب، حبابهای بخار آب بوجود آیند. این فشارها در پایین دست که به فشار بیشتری می‌رسند منفجر می‌شوند. مایع اطراف آن برای پر کردن حفره ایجاد شده, به داخل آن هجوم می‌برد، در اثر این عمل فشار ناحیه‌ای زیادی بوجود می آید, که در برخورد با کف سرریز نیروی زیادی را به آن وارد می‌نماید. با تکرار این عمل خسارتهای بسیاری به کف وارد می‌شود که به تدریج به حفره‌های بسیار بزرگی تبدیل می‌شوند. فشاری که حبابها در طی این فرایند تولید می‌کنند برابر با $۲۴۶۰۰\ kg/cm^2$ می‌باشد (Merrit.S.F,1976).

در سایهٔ پیشرفتهایی که احداث سدهای بلندتر را ممکن ساخته، هم دبی مشخصه سرریزها و هم سرعت جریان آب بر شوت افزایش یافته و باعث بالا رفتن خطر کاویتاسیون در این سازه شده است.

برای مقابله با خسارتهای این پدیده، راههای گوناگون پیشنهاد شده و اجرا می‌شود که معمولاً مطالعات انجام شده روی مدلهای ۱/۱۰ تا ۱/۵۰ انجام می‌گیرد.

-E-mail: yalatif@noavar.com
[2]E-mail: z_aidi2000@yahoo.com

۲-شروع کاویتاسیون و خسارات ناشی از آن

آب با سرعت و انرژی خیلی زیاد به انتهای شوت می‌رسد ولذا توان بالقوّه عظیمی خواهد داشت بعنوان مثال ظرفیّت طراحی سرریز سد کرخه بیش از ۱۸ هزار مترمکعب در ثانیه بوده وارتفاع فروریزش آن می‌تواند ۱۰۰ تا ۱۵۰ متر باشد. با فرض عدم استهلاک انرژی در طول مسیر شوت، آب با سرعتی در حدود ۴۵ m /s (تقریباً ۱۶۰ km/h) به ابتدای حوضچه آرامش خواهد رسید در هنگام فعّالیت سرریز با ظرفیّت کامل، این انرژی قدرتی معادل دو میلیارد کیلوگرم متر در ثانیه (بیش از بیست و هفت میلیون اسب بخار) خواهد داشت و در صورتیکه می‌شد آنرا با همان ضرایب نیروگاه به برق تبدیل کرد می‌توانست حدود ۱۶۰۰ مگاوات (چهل برابر ظرفیّت نیروگاه) برق تولید کند. در مورد سرریز سد کارون ۳ هم اگر سرریز با دبی طراحی کار کند قدرتی حدود پنجاه میلیون اسب بخار در حوضچه استغراق مستهلک می‌شود (حسن زاده، پاییز ۸۱).

هنگامی که اندیس کاویتاسیون جریان، کمتر یا مساوی اندیس کاویتاسیون ناهمواری‌های سطح باشد، پدیده کاویتاسیون رخ می‌دهد، اندیس کاویتاسیون به طریق زیر محاسبه می‌شود و همانطور که مشاهده می‌شود با مجذور سرعت جریان نسبت عکس دارد.

$$Ca=\frac{P-Pv}{1/2\rho V^2}$$

که در آن:

P: فشار مطلق در نقطه مورد نظر

P_v: فشار بخار آب

ρ : چگالی سیّال

V: سرعت آب

می‌باشد.

برخی اوقات گفته می‌شود که سطوحی که بیش از ۴۰ متر زیر آب قرار دارند در معرض خطر حفره‌زایی می‌باشند یا هنگامی که اندیس کاویتاسیون کمتر از ۰/۲ می‌شود سرریز دچار کاویتاسیون می‌شود (وایلی، استریتر).

۳-عوامل تشدید کننده کاویتاسیون

اگر اندیس کاویتاسیون بیشتر از ۰/۲ باشد پدیده کاویتاسیون بوجود نیامده و در نقاتی که این اندیس کمتر از ۰/۲ باشد احتمال وقوع پدیده زیاد می‌باشد. اگر اندیس کاویتاسیون بین ۰/۲ و ۰/۱ باشد وجود سیستم هواده برای جلوگیری از خسارتهای احتمالی کاویتاسیون ضروری به نظر می‌رسد و اگر کمتر از ۰/۱ باشد سرریز مجدداً باید طراحی شود (Frizell.k.H and Mefford.B.w,1991).

وقوع کاویتاسیون در اثر ترکیبی از علل و شرایط متنوّع رخ می‌دهد که برخی از این علل، عوامل هندسی و برخی هیدرودینامیکی هستند. برخی از این علل عبارتند از: ناهمواری‌های سطح سرریز، هر نوع برآمدگی و روزنه، شکافهای دریچه‌های کشویی، پایه‌های دریچه‌های قطاعی، شکستگیهای ساختمانی، دهانه مجاری و لوله‌ها، دبی مخصوص، سرعت جریان، عملکرد دریچه، یا بطور کلّی مواردی که باعث جدایی جریان می‌شود و پیشرفت لایهٔ مرزی و انتقال گرما حین انفجار حبابها، دمای آب و میزان حباب هوا در آب. که خسارت بوجود آمده معمولاً در رویهٔ سرریزها، کنار ضمائم حوضچه آبریز، قسمت انتهای شوت سرریز، در پایهٔ دریچه‌ها و روی سرریزها، در قسمت زیر دریچه کشویی و ... می‌باشد (Chanson.h,1997).

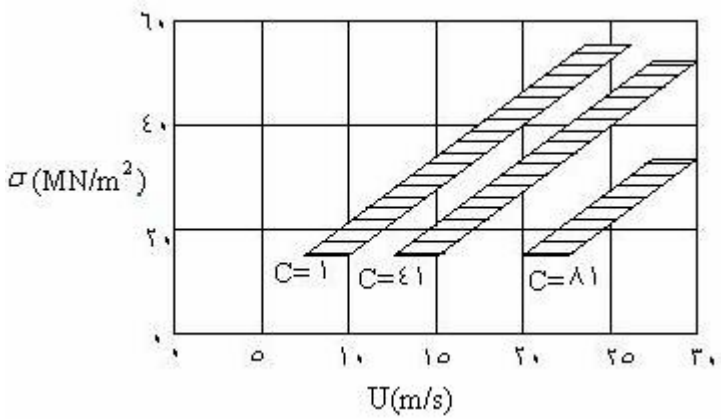
۴-روشهای مقابله با کاویتاسیون

با استفاده از اندیس کاویتاسیون و دانستن مقادیری از سرعت و فشار که تحت آنها پدیده کاویتاسیون رخ می‌دهد می‌توان پیش از بوجود آمدن این پدیده، آنرا کنترل واز بوجود آمدن آن جلوگیری کرد. برای مثال اوّلین کنترل بالا بردن فشار و کم کردن سرعت است تا عدد کاویتاسیون را افزایش دهیم. یا کنترل بعدی، استفاده از اشکالی است که کاویتاسیون بحرانی آنها کوچک باشد که این کنترل بدین طریق از روی ناهمواری‌های سطح بتن بدست می‌آید. راه حل‌های اجرایی استفاده از روشهای توصیه شده زیر می‌باشد (Hamilton.W.S,1984).

این روشها شامل اصلاح بتن و استفاده از مواد خاص، سرریزهای پلکانی و هوادهی می‌باشد.

الف) اصلاح بتن و استفاده از مواد خاص

استفاده از مواد مقاوم در برابر کاویتاسیون مانند فولاد ضدّزنگ جوش شده و یا فولاد ضدّزنگ تهیه شده به روش نورد گرم، استفاده از بتن الیافدار، ایجاد پوششهای سطحی از قبیل بتن‌های با مقاومت بسیار بالا، اندود کردن سطح آبرو با مواد مقاوم و صیقل کننده مثل رزینها و بالاخره کاهش زبری سطحی در بخشهای پایین آبرو جهت از بین بردن زمینهٔ شروع کاویتاسیون می‌تواند باعث جلوگیری از پدیده شود (Chanson.h,1997). شکل(۱) رابطهٔ بین مقاومت بتن و سرعت بحرانی(سرعتی که در آن پدیده کاویتاسیون شروع می‌شود) را نشان می‌دهد، همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش مقاومت بتن سرعت بحرانی نیز افزایش می‌یابد (Eisenhaver.N,1987).

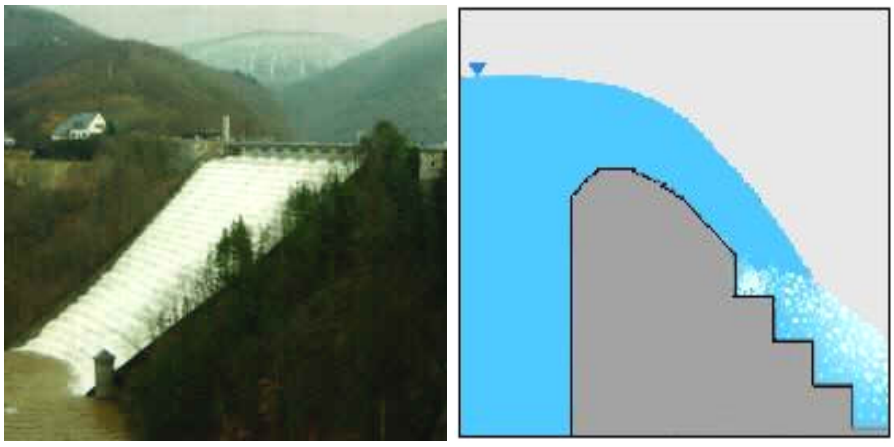


شکل ۱-رابطه بین مقاومت بتن(σ) و سرعت جریان(U)، C درصد هوای مخلوط در آب است.

اخیراً از بعضی اندودها از قبیل نئوپرن و پلی‌اورتان برای ترمیم و کاهش صدمات ناشی از کاویتاسیون استفاده می‌نمایند که آن هم بدلیل وجود شکافهای بسیار کوچک و جدا شدن قسمتی از این اندودها باعث شده که این مواد نیز چندان متداول نباشند (Chanson.h,1997).
در جریانات بالغ بر ۲۰ تا ۳۰ متر بر ثانیه جلوگیری از کاویتاسیون سخت و دشوار است. زیرا هزینه مواد کمکی مانع از استفاده از آنها می‌شود (Falvey.H.T,1990).

ب)سرریزهای پلکانی

یکی از راههای کاهش انرژی بسیار زیاد آب وکاهش سرعت جریان طراحی وساخت سرریزهای پله ای است. این سرریزها باافزایش تعداد سدهای بتن غلتکی(R.C.C) که شرایط آسان و وسیعی را برای ساخت چنین سرریزهایی فراهم می‌کند، علاقمندان بیشتری به خود پیدا کرده است (حسن زاده، پاییز ۸۱).
فرق سرریز پلکانی باسرریز صاف دراین است که درسرریز پلکانی بریدگیهایی درسطح منحنی سرریزصاف بصورت پله طراحی شده است.
نحوه جلوگیری ازکاویتاسیون دراین سرریزها بدین گونه است که به علت آشفتگی ناشی ازوجود پله ها سرعت جریان کاهش یافته وهمچنین درطی این آشفتگی‌ها مقدار متنابهی هوا وارد آن می‌شودکه این هواباعث ترکیدن وتصاعد حبابهای هوا می‌شود.
محل اولین نقطه بلع هوا درجریان روی این سریزها با تغییرات دبی متغیر است وهرجه دبی افزایش یابد هوادهی درنقطه پایین تری صورت می‌گیرد, آگاهی از این نکته در طراحی این سرریزها برای جلوگیری از کاویتاسیون بسیار مهم است (حسن زاده، پاییز ۸۱).
سرریزهای پلکانی شهرتی را درطی دو دهه بخاطر منافع مالیشان بدست آوردند. از دیگر منافع این سریزها روش ساخت ساده و سریع، بخصوص با روش ساخت بتن متراکم شده غلتان می باشد (Falvey.H.T,1990).تصویر یک سرریز پلکانی و یک نیمرخ آن در شکل(۲) نمایش داده شده است.



شکل۲- سرریز پلکانی(سمت چپ) و یک نیمرخ آن(سمت راست)

اما درحال حاضر سریزهای پلکانی محدود به دبی‌های ۱۰ تا ۱۵ مترمکعب درثانیه شده است. چراکه خارج از این دبی باعث ایجاد فشار منفی درسطح خود پله‌ها و شکل گیری پدیده کاویتاسیون می‌شود (حسن زاده، پاییز ۸۱).

ج)هوادهی

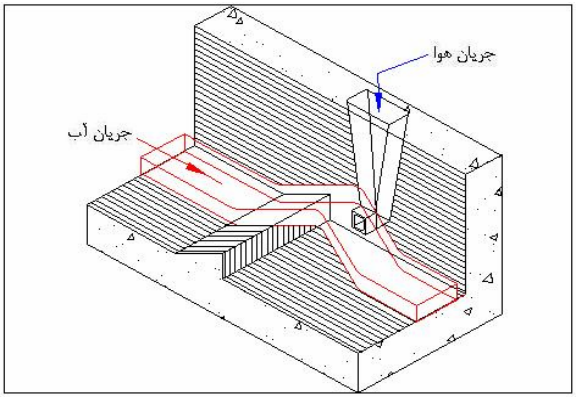
اولین بار در سد Grand Goulee درسال ۱۹۶۰از روش هوادهی استفاده شد و هفت سال بعد در سد Yellow tail مورد استفاده قرار گرفت، از اواسط دهه ۷۰ این سیستم بیشتر مطرح شد. بطوریکه در سدهای,Yellowtail Emborcacao,FozdoAreia,Guri, Nurek باعث جلوگیری ازخرابیهای کاویتاسیون شد (Chanson,h.1989).

راسل و شیل (۱۹۷۴) پیشنهاد کردند که داخل نمودن هوا برای کاهش صدمات مناسب است. زیرا:

۱ـ حضور هوا در بخارهای کاویتی باعث کوبش حبابهای کاویتی و کاهش فشار چکشی آب ناشی از این حبابها می‌شود.

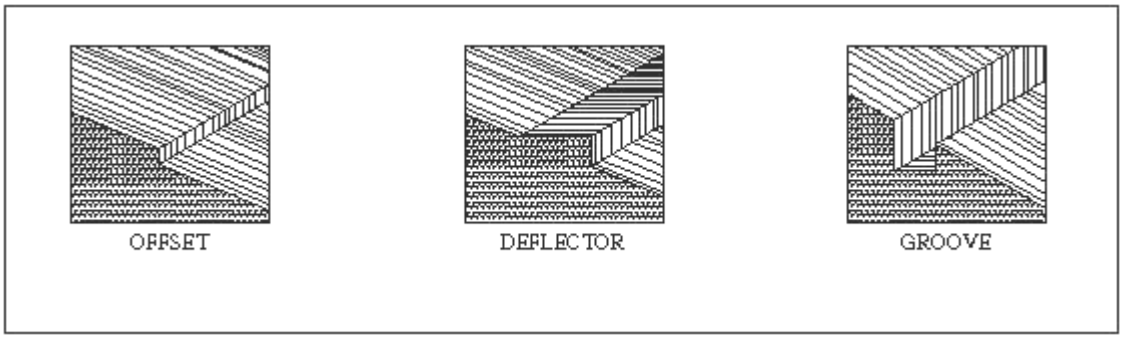
۲ـ حبابهای هوای داخل شده جریان را احاطه می‌کنند و باعث کاهش تندی شوک موج و بزرگی شوکهای موجی روی سطوح مادی می‌شود (Falvey.H.T,1990).

تصویر یک هواده درشکل(۳) نمایش داده شده و مطابق آن فشار در جاییکه هوا وارد می‌شود کاهش می‌یابد (فشار منفی) تا هوای بیشتری وارد جریان شود. البته در هر هواده به ازای یک ارتفاع مشخص میزان ورود هوا حداکثر می‌شود (Chanson,h.1989).



شکل ۳-نمای یک سیستم هواده

سیستم های هواده مناسب باید هوای زیادی وارد نمایند و بیشتر هوا در نزدیکی نواحی خطرناک باشد، و همچنین خود هواده ها نباید دچار کاویتاسیون شوند. در شکل(۴) انواعی از هوادهها نمایش داده شده است.



شکل ۴-انواع شکلهای هواده

دفلکتورها به همراه سایرشکلها برای ایجاد فشار بکار می‌روند و هوا از پهلو وارد می‌شود این اشکال هوای زیادی وارد می‌کنند.

افستها تعداد کمتری موجهای تکان دهنده درشکل پروفیل جریان به نسبت دفلکتورها ایجاد می‌کنند ومعمولاً با دفلکتورها بکار می روند.

گروو در تونلها و بعد از دریچه‌های تحت فشار بکار می‌رود و معمولاً با یک دفلکتور یا افست بکار می‌روند.

مدلهای کوچک هوادهی برای تامین مشخصات هندسی هواده و تعیین میزان هوای ورودی بکار می‌روند. مدلهای بزرگتر فقط قسمتی از سرریز را مورد مطالعه قرار می‌دهند برای تامین اندازه نمونه شرایط غلبه بر کشش سطحی حداقل را در نظر می‌گیرند (Ball.J.w,1995).

اما در مورد استفاده از هواده ها باید به هزینه آنها و نحوه بکارگیری آنها با بازدهی مناسب و تعداد آنها درسرریز توجه نمود. برای مثال در طی برآوردهایی که روی مدلها انجام شد نتایج زیر حاصل گشت، اگر چنانچه I شیب سرریز(بر حسب درجه) باشد می‌توان تجربیات زیر را بکار برد:

- I>20 توزیع غلظت هوای پایین دست یک هواده به توزیع متعادلی منجر خواهد شد و چنانچه غلظت هوا مینیمم(Cmean>30%) باشد تمام طول پایین دست تنها با یک هواده محافظت می‌شود و هوادههای اضافی مورد نیاز نخواهد بود (Falvey.H.T,1990).
- I<20 جریان هوادهی شده با یک هواده نیاز به هواده اضافی خواهد داشت و در شیب‌های کمتر آب، هواده باید در بالا دست ناحیه خطر قرار گرفته و هواده اضافی در پایین دست در زمانی که غلظت هوا زیر ٪۸ـ۴ می‌افتد مورد نیاز است (Falvey.H.T,1990).

علی‌رغم هزینه هواده و همچنین مشکلات ناشی از شناخت نوع هوادهها برای نصب در سرریز، هوادهی از بهترین شیوه‌های جلوگیری از کاویتاسیون می‌باشد.

۵-نمونه‌هایی از سدهایی که دچار کاویتاسیون شده‌اند

برخی از سدهایی که دچار کاویتاسیون شده‌اند عبارتند از: سد شهید عبّاسپور(کارون ۱) ایران که در قسمت بعد در مورد آن توضیحاتی آمده، سدهای هوور، یلوتیل(۱۹۶۷) و گلن‌کانیون(۱۹۸۳) در آمریکا، سد کبان ترکیه، سد این‌فرینلو در مکزیک، سد براتسک شوروی، سد گوری در ونزوئلا، سد آلدیاداویلا در پرتغال(۱۹۶۶) و سد تاربلا در پاکستان(۱۹۷۴).

۶-خسارات کاویتاسیون در سرریز سد شهید عبّاسپور(کارون ۱)

سد شهید عباسپور(کارون ۱) یک سد قوسی با ارتفاع ۲۰۰ متر و حجم مخزن ۹/۲ میلیارد متر مکعّب، در سال۱۳۵۶ روی رودخانه کارون احداث شد دبی تخلیهٔ کل سرریز ۱۶۵۰ متر مکعّب بر ثانیه است. پس از آبگیری مخزن و شروع بارندگی‌ها در سال ۱۳۵۶ و استفاده از سرریز بمنظور تخلیه سیل، آثار اوّلین خوردگی در سطح سرریز مخصوصاً در قسمت‌های انتهایی شوت و حتّی در سطح باکت سرریز نیز ظاهر شد با ادامه بهره‌برداری از سرریز کار پیشروی این خوردگی‌ها به جایی رسید که در گذرگاه شماره ۱ سمت چپ سرریز، حفره‌ای به عرض ۱۸ متر یعنی تقریباً تمام عرض سرریز و طول حدود ۲۰ متر و عمق ۱/۵ متر بوجود آمده بطوری که علاوه بر بتن کف سرریز کلیه آرماتورهای کف نیز گسسته شد حتّی سنگ کف زیر بتن سرریز تخریب و از جا کنده شد میزان جریانی که از این گذرگاه عبور نموده بین ۳۰۰ تا ۷۰۰ متر مکعّب در ثانیه بوده که در مقایسه با دبی حداکثر بسیار کم می‌باشد (وزارت نیرو، خرداد۱۳۶۳). تصاویری از خسارات کاویتاسیون در سرریز سد شهید عبّاسپور(کارون ۱) در شکل(۵) نشان داده شده است.

شکل ۵-خسارات کاویتاسیون در سرریز سد شهید عبّاسپور(کارون ۱)

مطالعه روی مدل فیزیکی سرریز سد کارون با مقیاس ۱/۶۲٫۵ در آزمایشگاه منابع آب وابسته به وزارت نیرو انجام گردیده است (وزارت نیرو، خرداد۱۳۶۳).(که خیلی کوچکتر از ۱/۱۰ توصیه شده برای این مطالعات است)

۷-نتیجه‌گیری

دراین مقاله به بررسی خسارتهای ناشی از کاویتاسیون در سرریز سدها پرداخته و راه‌هایی برای جلوگیری از این پدیده مورد بررسی قرار داده شد. پدیده کاویتاسیون در اثر کاهش یافتن فشار از فشار اتمسفر بوجود آمده و حباب‌های تشکیل شده از این پدیده با نفوذ در اعماق پر فشارتر آب و منفجر شدن در توالی زمان، باعث خسارت‌هایی می‌شوند که خسارت در سرریز سدهای بلند مشهودتر است ولذا پیشگیری از عواملی که تشدید کننده یا بوجود آورنده این پدیده است اهمیّت زیادی دارد. و برای این منظور، راه‌هایی از قبیل کاهش سرعت جریان، توجّه بیشتر به مقاومت و صافی سطح بتنی سطح سرریز از جمله راه‌های پیشگیری معرفی شد و چنانچه مطرح شد، سرریز پلکانی یکی از روشهای هوادهی و کاهش سرعت جریان به شمار آمد.

امّا راه مناسبتر و عملی‌تر بعدی هوادهی بود که با تأثیراتی مانند کوبش حباب‌های cavity، از بوجود آمدن خسارت توسط این حباب‌ها جلوگیری می‌نمود. البتّه هرکدام از این روشها محاسن و معایب خود را دارد و هر کدام را باید در موقعیّت مناسب و خاص بکار برد. ولی عمومی‌ترین و عملی‌ترین روش همان هوادهی می‌باشد.

۸ـ فهرست مراجع

- حسن زاده، ناصر، سرریزهای پلکانی ـ فصلنامه مهاب قدس ـ شماره ۲۰ ـ پاییز ۸۱ صفحات ۴۱ تا ۴۴.

ـ گزارش مدل هیدرولیکی سرریز سد شهید عباسپور(کارون ۱) ــ بخش هیدرولیک، مؤسسه بررسیها و آزمایشگاه‌های منابع آب ، وزارت نیرو، خرداد۱۳۶۳، نشریه شماره۶۲

ـ وایلی، استریتر، مکانیک سیالات، انتشارات نورپردازان، چاپ پنجم(۱۳۸۱)، صفحات ۵۲۷ تا ۵۳۲

-Ball,J.w.”cavitation from surface irregularities in high velocity “ proceedings,ASCE,Vol,101.Nr.7,July 1975 .pp.1283_1297.

-Chanson,h(1989),”Study of Air Entrainment and Aeration Devices.”J1 of Hyd. Res.,No.3,pp.301-319.(down load PDE File).

- Chanson,h.(1997). “Air Bubble Entrainment in free_surface Turbulent Shear Flows” Academic Press London,UK,401 Pages(ISBN 0-12-168110-6).

-Eisenhaver,N.(1987).”Localion of aerators in spillways”concrete international Desing & construction,ACI,VOL.9,NO.3,March.Detroit.

-Falvey,H.T.(1990)”Cvitation in Chut And spillway” USBREngrg.Monograph,No42,Dnver,Colorado,USA,160 pages.

-Frizell, k.H.and Mefford ,B.w.(1991),”Designing spillways to prevent cavitation damage”,concrete interational,ACI,Vol.13,NO.5.

-Hamilton,W.S.”Preventing Cavitation Damage to Hydralic Structures” Water Power & Dam Construction January 1984 December.

-Merrit.S.F.(1976),”standard Hand book for civil Engineers,”,2nd Edition ,mc Graw Hill.