

استفاده از بتن های فوق توانمند (UHPC) در سازه های هیدرولیکی سدها برای مقابله با کاویتاسیون

ضیاءالدین ایدی*؛ محمدرضا جلیلی قاضی زاده**

چکیده

هنگامی که سرعت آب در سازه های هیدرولیکی به حدود ۲۰ متر بر ثانیه برسد وقوع حفره زایی (کاویتاسیون) تقریباً قطعی است. تخریب در سدها و تونل های زیادی در سراسر دنیا به علت وقوع حفره زایی گزارش شده است. از جمله روش های مقابله با حفره زایی صیقلی کردن سطوح بتنی، هوادهی جریان و استفاده از مواد با مقاومت بالا می باشد. علی رغم مطالعات انجام شده و روش های پیشنهادی برای کنترل این پدیده، به علت پیچیدگی موضوع حفره زایی از یک طرف، و اهمیت سازه های هیدرولیکی از طرف دیگر، مطالعات بیشتر برای یافتن روش های بهینه و اقتصادی برای مقابله با حفره زایی مورد نیاز می باشد. در مقاله حاضر ابتدا مشکلات و محدودیت های روش های موجود برای مقابله با حفره زایی ارائه شده و سپس گزینه استفاده از بتن های فوق توانمند (Ultra High Performance Concrete) برای مقابله و پیشگیری از خطرات حفره زایی در سازه های هیدرولیکی مورد بررسی قرار گرفته است. تجربیات موفقیت آمیز استفاده از این بتن در کاهش خسارات ناشی از حفره زایی نیز ارائه شده است. در ادامه، نتایج ساخت این بتن در ایران گزارش شده است. نتایج بدست آمده نشان می دهد استفاده از بتن فوق توانمند می تواند گزینه مطلوبی برای کاهش و کنترل خسارت های ناشی از حفره زایی در سازه های هیدرولیکی سدها باشد.

واژه های کلیدی: حفره زایی (کاویتاسیون)، بتن فوق توانمند، سازه های هیدرولیکی، دوده سیلیسی، فوق روان کننده

۱- مقدمه

سرریز سدهای بزرگ، برای عبور سیلاب های با دوره بازگشت طولانی طراحی می شوند. عبور جریان سیلاب از روی سرریز معمولاً با سرعت های بالا انجام می گیرد. افزایش سرعت جریان عبوری خطر پدیده حفره زایی (کاویتاسیون) را تشدید می کند. پدیده حفره زایی شامل مراحل تغییر فاز مایع به گاز (به شکل حباب های ریز)، انتقال یا رشد حباب ها و سپس انهدام آنها می باشد. حفره زایی می تواند به علت وجود ناصافی ها و ناهمواری های کف بستر باشد که باعث می شود در سرعت های بالا، جریان آب از بستر جدا شده، یک جریان گردابی بوجود آید و به علت کاهش فشار، تا فشار بخار آب، حباب های ریز بخار بوجود آیند. در پایین دست که فشار جریان افزایش می یابد، مایع اطراف، برای پر کردن حفره های ایجاد شده به آن هجوم آورده و در اثر این عمل، حباب ها به شکل درون فجاری از بین رفته، فشار موضعی زیادی بوجود می آید، که در برخورد با کف سازه نیروی زیادی را به آن وارد می نماید. درز و ترک و فضاهای خالی در سطح بین ملات و سنگدانه درشت، باعث بروز ترک ها و فضاهای متخلخل ریز در بتن می شوند. امواج فشاری روی سطح بتن که به این

*Email: aidi@civil.sharif.edu

* دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آب، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

** کارشناس عالی مطالعات طرح سد و نیروگاه گتوند علیا و عضو هیات علمی دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)

Email: jalili@pwut.ac.ir

فضاها وارد می‌شوند باعث بروز تنش‌های کششی می‌شود که می‌توانند باعث ایجاد و گسترش میکروتکرکها شود در نتیجه قطعاتی از بتن ممکن است کنده و تخریب شود. اولین بار حفره‌زایی در سال ۱۸۹۴ زمانی که یک کشتی انگلیسی بجای استفاده از موتورهای پیستونی سنتی با چرخش آهسته، از توربین‌های بخار چرخش سریع استفاده نمود مشاهده و گزارش شد [۱]. در دهه‌های اخیر با افزایش ارتفاع سدها و ضرورت ایجاد سرریزهای بزرگ، خسارت ناشی از حفره‌زایی به صورت متواتر بروز نموده است و بسیاری از سازه‌ها و سدهای بزرگ در اثر حفره‌زایی تخریب و یا آسیب دیده‌اند که به عنوان نمونه می‌توان به سدهای Hoover، Yellowtail (۱۹۶۷) و Glen canyon (۱۹۸۳) در آمریکا، سد Keban ترکیه، سد Infrinlo در مکزیک، سد Bratesk روسیه، سد Guri در ونزوئلا، سد Aldiadavia در پرتغال (۱۹۶۶) و سد Tarbella در پاکستان (۱۹۷۴) اشاره نمود [۲]. سرریز سد کارون I (شهید عباسپور) در ایران در محدوده سال ۱۳۵۶ در چندین مرحله در اثر حفره‌زایی آسیب دید [۳]. تونل تخلیه کننده تحتانی سد مسجد سلیمان نیز در سال ۱۳۷۹ دچار پدیده حفره‌زایی شد. شکل شماره ۱ تخریب در سرریز سد کارون I (شهید عباسپور) و تونل تخلیه کننده سد گلن کانین را نشان می‌دهد.



شکل (۱): خسارات کاویتاسیون در سرریز سد کارون I (سمت راست) و تونل تخلیه کننده تحتانی سد گلن کانین (سمت چپ).

از جمله روش‌های مقابله با حفره‌زایی می‌توان به طراحی سازه‌های هیدرولیکی با شاخص حفره‌زایی (Cavitation Index) بالا، صیقلی نمودن و کاهش میزان موج‌دار بودن سطح، هوادهی جریان و استفاده از مواد و مصالح با مقاومت بالا نام برد که در ادامه مزایا و معایب این روش‌ها مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در کنار روش‌های مختلف مقابله با حفره‌زایی، در این مقاله استفاده از بتن فوق توانمند برای مقابله با حفره‌زایی در سازه‌های هیدرولیکی سدها پیشنهاد شده است.

۲- روشهای مرسوم مقابله با حفره‌زایی

برای بررسی حفره‌زایی در یک نقطه از جریان معمولاً مقدار شاخص حفره‌زایی در آن ناحیه محاسبه می‌گردد. شاخص حفره‌زایی (σ) به صورت زیر تعریف می‌شود [۴]:

$$\sigma = \frac{P - P_v}{0.5\rho V^2} \quad (۱)$$

که در آن P فشار در نقطه مورد مطالعه، P_v فشار بخار آب، ρ چگالی و V سرعت سیال می‌باشد. چنانچه شاخص حفره‌زایی جریان (σ) برابر یا کمتر از عدد حفره‌زایی بحرانی (σ_c) شود، احتمال وقوع حفره‌زایی در ناحیه مورد مطالعه بسیار زیاد خواهد بود. مقادیر ارائه شده برای عدد σ_c در جریان‌های مختلف متفاوت بوده و به کمک آزمایش در تونل حفره‌زایی بدست می‌آید. به عنوان مثال مقدار σ_c بر روی سرریزهای تندآب به کیفیت اجرای

بتن و سطح تمام شده در ساخت سرریز بستگی دارد. برای ساخت مناسب بتن، به صورتیکه نسبت ارتفاع موج سطحی بتن به طول آن (Chamfer) از نسبت ۱:۲۰ کمتر باشد، مقدار σ_c را بین ۰/۲ تا ۰/۲۵ پیشنهاد کرده است. برای کیفیت‌های دیگر ساخت و زبری‌های مختلف نیز مقادیر σ_c متفاوتی پیشنهاد شده است [۴].

بر اساس رابطه شماره (۱) ملاحظه می‌گردد که برای مقابله با حفره‌زایی لازم است سازه‌های هیدرولیکی به صورتی طراحی شود که شاخص حفره‌زایی به کمتر از مقدار شاخص بحرانی کاهش نیابد. بدین منظور لازم است تا حد امکان فشار جریان افزایش و سرعت سیال کاهش یابد. برای کاهش سرعت جریان می‌توان ابعاد سازه انتقال (و سطح مقطع جریان) را افزایش داد اما تجربه نشان داده است که کاهش سرعت جریان، به افزایش غیر اقتصادی و غیر عملی ابعاد سازه‌ها منجر می‌شود و روش کنترل سرعت جریان نمی‌تواند یک گزینه عملی برای کنترل حفره‌زایی باشد.

چنانچه ذکر شد ناهمواری‌های موجود در سطوح بتنی در سازه‌های هیدرولیکی از عوامل عمده حفره‌زایی شناخته شده است. در صورت اجرای سطوح صاف و صیقلی می‌توان حفره‌زایی را به تعویق انداخت اما بدیهی است که صیقلی نمودن سطوح نیز با محدودیت‌های عملی همراه می‌باشد، به عنوان مثال اگرچه با سمباده زدن و ساییدن، امکان صیقلی نمودن سطوح بتنی وجود دارد ولی از طرفی این عمل باعث لق شدن برخی از دانه‌های مصالح سنگی موجود در سطح بتن شده و در نتیجه بتن، در سطوح فوقانی ضعیف می‌گردد. تبلور کریستال کلسیم و بعضی املاح دیگر نیز در سطح بتن، پس از اتمام عملیات ساختمانی، موجب ناهمواری‌های سطحی می‌شود. از طرفی وجود درزهای انقباض و ناهمواری‌های ناشی از آن باعث عدم یکنواختی سطح سرریز می‌گردد.

استفاده از روکش‌های فولادی در روی سطوح بتنی که ضمن صیقلی بودن باعث بالا بردن مقاومت سطوح می‌گردد شاید یک روش منطقی برای به حداقل رساندن خسارت حفره‌زایی به نظر رسد. اما استفاده از روکش‌های فولادی دارای محدودیت‌های عمده، از جمله هزینه بسیار زیاد، مشکلات اجرایی اتصال دادن ورق‌های فولادی با بتن زیر آن و مشکلات مربوط به تعویض قطعات آسیب دیده می‌باشد. به عنوان مثال چنانچه در عملیات اجرایی، فاصله‌ای بین روکش فولادی و سطح بتن بوجود آید، به علت پدیده تشدید (رزونانس) ناشی از نوسان‌های فشار دینامیکی، فاصله بتن و فولاد بیشتر شده و در نهایت باعث پاره شدن ورقه فولادی در اثر پدیده خستگی خواهد شد. به عنوان مثال در تخریب تخلیه کننده تحتانی سد مسجد سلیمان که به علت عدم هوادهی جریان اتفاق افتاد، پوشش فولادی قسمتی از تونل به راحتی از پوشش بتنی زیر آن جدا شد. اجرای درزهای اجرایی، ضرورت ایجاد زهکش جهت کاهش مقدار زیر فشار و انقباض و انبساط فولاد از دیگر مشکلات وابسته به پوشش ورق‌های فولادی می‌باشد.

از بعضی از اندودها مانند نئوپرن و پلی‌اورتان برای ترمیم و کاهش صدمات ناشی از کاویتاسیون استفاده می‌شود [۵]. که آنها هم ممکن است بدلیل بروز شکاف‌های بسیار کوچک و جدا شدن قسمتی از این اندودها، نتوانند در مقابل حفره‌زایی مقاومت کنند و تنها می‌توانند عمر مفید سازه سرریز را افزایش دهند [۶].

با توجه به مشکلات مذکور، یکی از متداولترین روشهای مقابله با حفره‌زایی، هوادهی جریان می‌باشد. نظریه‌های متفاوتی برای توضیح چگونگی توقف حفره‌زایی توسط هوادهی موجود در جریان ارائه شده است که از آن جمله می‌توان به در نظر گرفتن حباب‌های هوا به صورت بالشتک‌های ضربه گیر اشاره نمود که ضمن استهلاک نیروی ناشی از درون‌فجاری حباب‌های حفره‌زایی، باعث منحرف کردن مسیر نیروی ناشی از حفره‌زایی از جداره می‌شود. همچنین افزایش هوا باعث کاهش سرعت موج فشاری (سرعت صوت) در سیال می‌شود. در هر صورت تجربیات و آزمایش‌های محققین نشان می‌دهد که وجود ۸ درصد هوا در جریان آب می‌تواند خسارت‌های ناشی از حفره‌زایی را متوقف کند [۷].

[۸]. اگرچه هوادهی به عنوان متداولترین روش مرسوم مقابله با حفره‌زایی مورد استفاده قرار می‌گیرد اما این روش نیز دارای هزینه، مشکلات و محدودیت‌هایی می‌باشد. برای هوادهی جریان لازم است در مسیر جریان هواده ساخته شود، هواده‌ها می‌بایست به یک داکت هوا متصل باشند. معمولاً داکت هوا در سرریزهای تندآب به اتمسفر متصل می‌شود اما در سرریزهای تونلی و همچنین تونل‌های تخلیه کننده تحتانی (که در ترازهای پایین اجرا می‌شوند)، داکت هوا می‌بایست به مجرای متصل به اتمسفر اتصال داشته باشد. ساخت و پیش‌بینی مجموعه تجهیزات و سازه‌های مذکور، هزینه و زمان اجرا را افزایش می‌دهد. مکانیزم هوادهی جریان و نحوه توزیع و پخش هوا در داخل جریان آب بسیار پیچیده بوده و طراحی هواده‌ها و عملکرد آنها با عدم قطعیت‌هایی همراه است. به عنوان مثال رابطه جامع و قابل قبولی برای تعیین فاصله بین هواده‌ها در دسترس نیست. مدل‌های فیزیکی با مقیاس‌های کمتر از ۱:۱۵ هم‌اکنون، به علت خطای مقیاس (Scale Effect) قادر به مدل کردن و شبیه سازی توزیع هوا در داخل آب نمی‌باشند. حتی در صورت ساخت مدل‌های فیزیکی با مقیاس بزرگتر از ۱:۱۵ نیز، وسایل اندازه‌گیری برای تعیین میزان هوا در داخل جریان آب و همچنین سرعت جریان مخلوط آب و هوا بسیار محدود و هنوز در مراحل تحقیقاتی می‌باشد [۹]. بررسی‌ها و تحقیقات اخیر نشان می‌دهد که حتی قویترین مدل‌های ریاضی موجود (مانند مدل Fluent) نیز قادر به مدل کردن پخش هوا در داخل آب نمی‌باشند [۱۰]. از طرفی هوا در آب، باعث تورم حجم آب و این موضوع باعث افزایش ارتفاع دیواره‌های

جانبی سرریز خواهد شد. امکان استغراق و عدم کارکرد صحیح هواده‌ها در پروتوتیب و نگرانی از کمبود هوای مورد نیاز در دی‌های عبوری بالا، همواره از دغدغه‌های طراحان هواده‌ها می‌باشد. با توجه به روش‌های مرسوم موجود برای مقابله با حفره‌زایی و مشکلات و محدودیت‌های آنها، ایده استفاده از بتن‌های خاص با مقاومت بالا، برای مقابله با حفره‌زایی قابل طرح می‌باشد. در ادامه بتن فوق‌توانمند (UHPC) برای استفاده در سازه‌های هیدرولیکی در معرض حفره‌زایی معرفی و تجربیات موجود برای استفاده از این بتن در سدها ارائه خواهد شد.

۳- بتن‌های فوق‌توانمند (UHPC)

در اغلب موارد بتن به عنوان ماده‌ای مقاوم در برابر نیروهای فشاری شناخته شده است. انجام پروژه‌های وسیع تحقیقاتی بر روی مواد مختلف تشکیل دهنده و آزمایش بتن‌های مختلف با مواد جدید در سالهای اخیر منجر به پیدایش بتن‌هایی شده است که علاوه بر تأمین مقاومت، خواص دیگری از این ماده نظیر دوام، کارایی، نرمی و مقاومت در برابر عواملی چون آتش، محیط و هوازدگی را دستخوش تغییرات اساسی نموده است. علاوه بر دگرگونی و تحول در مواد تشکیل دهنده بتن، افزودن مواد دیگری به بتن همچون افزودنیهای مختلف، انواع الیاف‌ها و حتی مواد زائدی که ارزش خاصی نداشته و باعث آلودگی محیط زیست نیز می‌شوند، موجب پیدایش بتن‌های جدید با خواص جدید و بهبود یافته شده است. امروزه بر اساس تکنولوژی رایج بتن، ساخت بتن‌های با مقاومت‌های فشاری زیاد و دور از انتظار که می‌تواند برای طراحی سازه‌های اجرایی رایج مورد استفاده قرار گیرند، امکان‌پذیر می‌باشد. اگر چه اغلب آیین‌نامه‌های بتن هنوز مقاومت بتن مورد استفاده در سازه‌ها را به ۶۰ مگاپاسکال محدود می‌کنند، اما آیین‌نامه‌های جدید اخیراً حدی بالاتر از ۱۰۵ مگاپاسکال را نیز در نظر گرفته‌اند (مانند آیین‌نامه نروژ NS ۳۴۷۳).

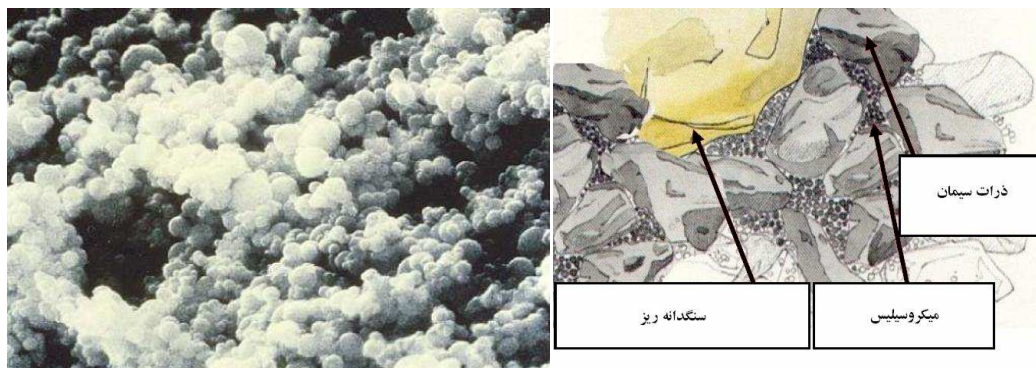
ساخت بتن‌های با مقاومت زیاد و در حد ۱۲۰ مگاپاسکال و کاربرد آن در ساختمان‌های بلند در کشورهای پیشرفته دنیا رواج یافته است. این مقاومت با اضافه نمودن مواد ریز و فعال به سیمان تا حدی افزایش یافته که بتن‌هایی با مقاومت‌های فشاری بین ۲۰۰ تا ۸۰۰ مگاپاسکال و مقاومت‌های کششی بین ۳۰ تا ۱۵۰ مگاپاسکال در نمونه‌های آزمایشگاهی بدست آمده است. برای دستیابی به چنین مقاومت‌هایی لازم است تغییراتی در طرح اختلاط داده و از مواد و افزودنی‌های جدیدی استفاده نمود [۱۱].

خمیر سیمان پرتلند معمولی، یک ماده ناهمگن و متخلخل است. این تخلخل در ابتدا به خاطر نیروهای سطحی بین ذرات سیمان می‌باشد که از لغزش آنها روی هم در طول اختلاط و قالب ریزی ممانعت می‌کند، هرچقدر ذرات ریزتر باشند اثر این نیروها نیز بیشتر است. به طور کلی می‌توان گفت ضعف مکانیکی (کمبود مقاومت) بتن در اثر وجود منافذ و تخلخل در بتن و آب اضافه بر نیاز در طرح اختلاط می‌باشد. این اصل اولین بار توسط Feret، که رابطه تجربی بین مقاومت، حجم سیمان، آب و هوا را ارائه داد، در سال ۱۸۹۲ بکار گرفته شد.

هم اکنون با استفاده از فناوری‌های نوین و تولید مصالح جدید (میکروسیلیس، نانوسیلیس، فوق روان کننده‌ها و ...) میزان این تخلخل در بتن فوق‌توانمند به حداقل مقدار خود رسیده و در نتیجه مقاومت آن تا حد بسیار بالایی از بتن‌های معمولی بیشتر شده است. می‌توان به طور خلاصه وجه تمایز بتن فوق‌توانمند با بتن‌های معمولی با مقاومت بالا را تفاوت در اندازه سنگدانه‌ها و استفاده از میکروسیلیس یا پودرهای ریزتر به عنوان پرکننده و استفاده از فوق‌روان‌کننده بیان نمود، که این عوامل مقاومت آنرا تا حد بسیار بالایی افزایش می‌دهند. استفاده از سنگدانه ریز به همراه میکرو یا نانوسیلیس به مقدار زیادی باعث کاهش تخلخل بتن می‌شود. استفاده از مواد افزودنی فوق‌روان‌کننده علاوه بر کاهش مقدار آب بتن، قوام و همگنی آنرا نیز بهبود می‌بخشند.

در حدود سال ۱۹۶۴، یک تحقیق آزمایشگاهی در دانمارک برای بررسی امکان ساخت یک بتن با مقاومت فشاری بالا به انجام رسید. بالاترین مقاومت فشاری نتیجه شده در حدود ۶۰ تا ۸۰ مگاپاسکال با نسبت آب به سیمان برابر با ۰/۳ بود [۱۲]. Powers از انجمن سیمان پرتلند آمریکا، مقاومتی در حدود ۲۸۰ مگاپاسکال را روی نمونه‌های کوچک با تراکم بالا بدست آورد، که این موفقیت نشان دهنده امکان رسیدن به جسمی متراکم و مقاوم‌تر بود. مقایسه ذرات سیمان با دیگر ذرات ریز نشان داد که ذرات سیمان دارای تراکم کمتر، نسبت به دیگر ذرات با همان ریزی و توزیع اندازه می‌باشند. در آزمایشات بعدی از نسبت آب به سیمان برابر ۰/۲ نیز استفاده شد. همچنین برای تراکم بهتر از ویریه با فشار پایین به طوری که باعث شکستن دانه‌ها نشود استفاده شد. در دهه ۷۰، Stephan و Brunauer از انجمن سیمان پرتلند، نوعی سیمان را معرفی کردند که نیروهای سطحی که در زمان اختلاط بین ذرات سیمان بوجود می‌آیند را حذف می‌کرد. در همان محدوده زمانی، فوق روان‌کننده‌ها معرفی شدند. با پیشرفت فوق‌روان‌کننده‌ها در نهایت امکان پراکندن ذرات سیمان به صورت مناسب در یک محیط آبی فراهم شد و بنابراین جسم متراکم‌تری بدست می‌آمد. Bache ذرات سیمان را به همراه ۳۰ درصد مواد سیمانی ریز (مواد پوزولانی) مخلوط کرد و ترکیبی متراکم

- بدست آورد. اما بعدها به این نتیجه رسید که استفاده از میکروسیلیس به چند دلیل اثر بهتری دارد [۱۲]:
- ذرات میکروسیلیس (کوچکتر از $1\ \mu m$) خیلی ریزتر از دانه‌های سیمان می‌باشند (در شکل شماره ۲ اندازه شماتیک سنگدانه‌ها، ذرات سیمان و میکروسیلیس نشان داده شده است).
 - ذرات میکروسیلیس شکل مشخصی ندارند و این باعث افزایش تراکم می‌شود.
 - این ذرات واکنش‌پذیری کمتری نسبت به ذرات سیمان دارند (می‌توانند نقش پرکننده داشته باشند).



شکل (۲): ذرات میکروسیلیس (سمت چپ) و جسم متراکم بتن (سمت راست) [۱۲].

در بتن ساخته شده با میکروسیلیس (Densified with Small Particles) DSP، فوق روان کننده و مقدار کم نسبت آب به سیمان تنها مقدار خیلی کمی فضای خالی باقی می‌ماند که توسط آب پر می‌شود. این آب در طول اختلاط به عنوان یک لغزنده ذرات را محاصره می‌کند.

تحقیقات بعدی روی سنگدانه‌ها انجام گرفت زیرا هم اکنون مقاومت خمیر سیمان بالاتر از سنگدانه‌ها شده است و شکست بتن در اثر ضعف سنگدانه بود و نه در اثر ضعف ملات یا محل اتصال ملات و سنگدانه. در نتیجه تحقیقات با استفاده از سنگ‌های گرانیات و بازالت مقاومت را تا حد بالاتری افزایش داد. در دهه ۹۰ تحقیقات گسترده‌ای در زمینه دوام، چگالی، مقاومت سایشی، مقاومت شیمیایی، نفوذپذیری یون کلرید و محافظت در مقابل خودگی آرماتور برای این نوع بتن انجام گرفت [۱۲].

در سال ۱۹۹۴، شرکت Bouygues با دیگر شرکای صنعتی خود یک نوع بتن DSP را با عنوان بتن پودر فعال RPC (Reactive Powder Concrete) ارائه دادند. بهبود طرح اختلاط بتن با افزودن الیاف فلزی و استفاده از مواد سیمانی با عملکرد بالا منجر به پیدایش بتن RPC شد. این بتن با دارا بودن ذرات ریز و الیاف دارای تراکم بیشتر و مقاومت بالاتر بود [۱۳].

با پیشرفت فوق روان کننده‌ها و تولید مصالح جدید چون نانوسیلیس، تراکم و مقاومت این گونه بتن‌ها باز هم افزایش یافت. بتن فوق توانمند امروزی اولین بار در اواسط دهه ۹۰ در فرانسه معرفی شد و بعد از آن در سال ۱۹۹۸ در شمال آمریکا در چند پروژه مهم بکار رفت. به تدریج استفاده از این بتن به صورت محدود و در انجام پروژه‌های خاص رواج یافتند. این بتن در برخی کشورهای پیشرفته دنیا در حال رسیدن به تولید انبوه می‌باشند [۱۴]. در طرح‌های جدید این بتن، از الیاف فلزی (۲ درصد حجمی) با طول حدود ۲۰ میلی‌متر نیز استفاده می‌شود [۱۵]. این بتن‌ها علاوه بر مقاومت فشاری بسیار بالا، دارای مدول یانگ بالا و وارفتگی پایین نیز می‌باشند [۱۶]. با کاربرد روش‌های جدید ساخت و عمل‌آوری، مقاومت این بتن در سال‌های گذشته تا حدود ۲۰ برابر بتن‌های معمولی افزایش یافته است و تا حدود ۸۰۰ مگاپاسکال رسیده است [۱۷].

۴- استفاده از بتن‌های فوق توانمند جهت مقابله با حفره‌زایی

با افزایش مقاومت بتن، پایداری آن در مقابل حفره‌زایی افزایش می‌یابد. محققین مختلفی تاثیر مقاومت بتن در برابر حفره‌زایی را مورد بررسی قرار دادند. Colgate نشان داد در حالیکه در جریان با سرعت ۳۰ متر بر ثانیه در زمان ۳ ساعت به علت حفره‌زایی یک تورفتگی به عمق ۱۳ میلی‌متر در بتن معمولی بوجود می‌آید، برای بوجود آمدن حفره‌ای به همین اندازه در بتن پلیمری ۱۲۵ ساعت زمان نیاز است [۱۸].

Price و Wallace نتایج تحقیقات و پژوهش‌های خود را روی رفتار بتن تحت فرسایش در اثر حفره‌زایی بلند مدت (از چند ساعت تا چند سال) به شرح زیر گزارش نمودند:

- مقاومت در مقابل حفره‌زایی با افزایش مقاومت فشاری بتن افزایش می‌یابد.
- نوع سیمان اثر قابل توجهی روی مقاومت در مقابل حفره‌زایی ندارد.
- سنگدانه‌های درشت خیلی راحت‌تر از سنگدانه‌های ریز در اثر حفره‌زایی از سطح بتن کنده می‌شوند بنابراین حداکثر اندازه سنگدانه تا ۲۰ میلی‌متر توصیه می‌شود.
- نوع چسب یا ملات بین سنگدانه‌ها با اهمیت می‌باشد. ملات مقاوم‌تر، مقاومت در مقابل حفره‌زایی را افزایش می‌دهد.

• سختی مصالح سنگدانه برای مقاومت در مقابل حفره‌زایی اهمیت زیادی ندارد. [۱۹]

McDonald مقاومت در مقابل حفره‌زایی بیش از ۸۰ ماده مختلف را (با مقاومت فشاری از ۵۰ تا ۲۰۰ مگاپاسکال) مورد آزمایش قرار داد که برای اصلاح سطوح سازه‌های هیدرولیکی استفاده می‌شدند. نتایج نشان داد که مصالح بر پایه سیمان، مقاومت ضعیفی در مقابل حفره‌زایی دارند در حالیکه مقاومت همان مصالح با دوده سیلیسی و پودرهای فعال و الیاف، مقاومت بسیار بالاتری را در مقابل حفره‌زایی از خود نشان می‌دهند [۲۰]. طبق آیین‌نامه ACI مقاومت بتن در مقابل حفره‌زایی آنجا که سایش فاکتور اصلی نباشد می‌تواند با یک طرح مناسب با کاربرد مقدار کم نسبت آب به سیمان تامین شود. این آیین‌نامه استفاده از سنگدانه با قطر اسمی کمتر از ۳۸ میلی‌متر را پیشنهاد می‌کند [۶].

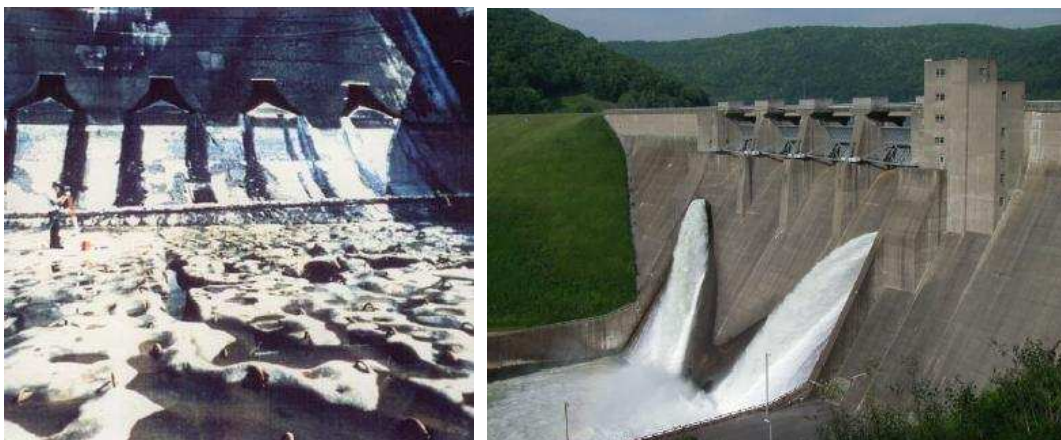
روش مهندسین ارتش آمریکا جهت آزمایش مقاومت مواد در مقابل حفره‌زایی در سد Detroit به اینگونه است که نمونه‌های بتنی به عرض ۰/۵ متر و طول ۳ متر را مورد آزمایش قرار می‌دهند. سپس جریان آب با سرعت بیش از ۲۴ متر بر ثانیه برای دوره‌های مختلف، از روی آنها عبود داده می‌شود. روی هر قطعه نیز برای ایجاد حفره‌زایی برآمدگی‌هایی در نظر گرفته می‌شود [۶]. علاوه بر این، آزمایش ASTM C ۱۱۳۸-۹۷ نیز برای مدلسازی فرسایش حفره‌زایی در سازه‌های هیدرولیکی در نظر گرفته شده است. دستگاه مربوط به انجام این آزمایش در شکل شماره ۳ نشان داده شده است. آزمایشات زیادی روی بتن UHPC با استفاده از این دستگاه انجام شد و هیچ فرسایشی در اثر حفره‌زایی گزارش نشد [۱۲].



شکل (۳): تجهیزات آزمایش ASTM C ۱۱۳۸-۹۷ [۱۲].

همچنین با محدود کردن استفاده از این نوع بتن فقط در سطوح بیرونی سازه‌هایی چون سرریز و در نقاطی که خطر حفره‌زایی بیشتر می‌باشد می‌توان هزینه‌های ساخت و اجرای سازه بتنی را تا حد زیادی کاهش داد.

اولین استفاده از بتن فوق‌توانمند در سازه‌های هیدرولیکی در آمریکا، برای تعمیر حوضچه آرامش سد Kinzua بود. در اثر حفره‌زایی در حوضچه آرامش این سد حفره‌هایی به عمق ۱/۱ و ضخامت ۱/۵ متر بوجود آمده بود (شکل ۴). این خسارات در سال ۱۹۷۴ با استفاده از بتن معمولی اصلاح شد ولی بعد از چند سال بدلیل عدم کفایت این مصالح، محل با استفاده از بتن UHPC مجدداً تعمیر شد که نتایج رضایت بخشی داشته است [۱۲], [۲۱].



شکل (۴): سد Kinzua و حوضچه آرامش آسیب دیده آن [۱۲].

در سد Guri در ونزولا خسارات زیادی در اثر حفره‌زایی به ورودی و خروجی، پنجه و سرریز سد وارد آمده بود، جهت تعمیر این خسارات نیز از بتن فوق‌توانمند استفاده شد [۱۲].

چنانکه قبلاً ذکر شد مسائل مربوط به اجرای سطوح بتنی، زمانی که سطوح هیدرولیکی در معرض سرعت‌های بالا قرار دارند، از اهمیت زیادی برخوردار است. این سطوح تا جایی که ممکن است باید سطح صاف داشته باشند. ناهمواری سطح ممکن است باعث ایجاد حفره‌زایی در سرعت‌های حتی کمتر از ۸ متر بر ثانیه می‌شود. درزهای با اجرای نامناسب که در زمان ساخت بوجود می‌آیند معمولاً تحت اثر تنش ناشی از آب، به راحتی باعث ایجاد خسارت می‌شوند. پیشنهادات و توصیه‌های مهم ACI۳۴۷, ACI۳۰۹, ACI۳۰۸, ACI۳۰۴, ACI۳۰۲, ACI۱۱۷ را باید هم در ساخت و هم در تعمیر سازه‌ها برای جلوگیری از حفره‌زایی حتماً در نظر گرفت. سطوح قالب‌گیری و غیر قالب‌گیری را باید به دقت در طول ساخت و بهره‌برداری مورد بازرسی قرار داد [۶].

تا جایی که امکان دارد باید از درزهای اجرایی زمان ساخت خودداری نمود. در محل همین درزها مشکلات زیادی ایجاد خواهد شد. یکی از روشهای پذیرفته شده در ساخت سطحی صاف در سازه‌های هیدرولیکی عبور Screed Slipform از روی سطوح در حال ساخت می‌باشد [۶].

راهنمایی‌های اجرایی بیشتر برای استفاده از بتن‌های دارای سیلیس در ACI۲۲۶ آمده است [۶].

۵- تولید بتن UHPC در داخل کشور

نمونه‌هایی از بتن فوق‌توانمند با انجام چندین آزمایش و ساخت نمونه‌های متعدد در آزمایشگاه بتن دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور) ساخته و مورد آزمایش قرار گرفت در اینجا مشخصات دو نمونه ساخته شده به همراه نتایج بدست آمده گزارش می‌شود.

آزمایش‌های انجام شده نشان داد که ترکیب مناسبی از سنگدانه‌های ریز توف یا گرانیت که به وفور در کشور یافت می‌شود می‌تواند طرح مناسبی برای ساخت بتن با مقاومت بالا را نتیجه دهد.

در محاسبه طرح اختلاط، جهت تعیین دقیق اوزان مصالح از روش حجمی استفاده شد. در این آزمایشات قبلاً مقادیر جذب آب و وزن مخصوص مصالح سنگی و همچنین وزن مخصوص سیمان، میکروسیلیس و فوق روان کننده مورد استفاده با آزمایش تعیین شد. رطوبت مصالح سنگی قبل از استفاده به طور کامل در اون گرفته می‌شد. مقادیر وزن مخصوص سیمان، میکروسیلیس و فوق روان کننده در این آزمایشات به ترتیب ۳/۱۵، ۱/۹ و ۱/۰۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب تعیین شد.

در فرایند طرح اختلاط حجمی که روش دقیق‌تری نسبت به روش ACI (روش وزنی) می‌باشد مقادیر حجم هرکدام از مصالح تعیین می‌شد. برای مثال اگر نسبت وزنی میکروسیلیس به سیمان $(\frac{M_{Ms}}{M_c})$ را برابر ۰/۱۵ در نظر بگیریم بنابراین نسبت حجمی آنها:

$$\frac{V_{Ms}}{V_c} = \frac{M_{Ms}}{\gamma_{Ms}} * \frac{\gamma_c}{M_c} = \frac{\gamma_c}{\gamma_{Ms}} * \frac{M_{Ms}}{M_c} \quad (2)$$

که در آن γ_c و γ_{Ms} به ترتیب مقادیر وزن مخصوص سیمان و میکروسیلیس می‌باشند [۲۲]. در ساخت نمونه اول از سنگدانه‌های توف و از فوق‌روان‌کننده‌های ساخت داخل استفاده شد. در جدول شماره ۱ مشخصات این بتن و همچنین دانه‌بندی آن ارائه شده است. در این آزمایش از میکروسیلیس معمولی عبور داده شده از الک ۵۰ و تراکم دستی جهت ویبره استفاده شد. عمل‌آوری و نگهداری نمونه‌ها، در شرایط آزمایشگاه انجام گرفت. سیمان مورد استفاده در این آزمایش، سیمان تیپ II عبوری از الک ۵۰ بود. مقاومت فشاری متوسط ۲۸ روزه این نمونه‌ها حدود ۲۸۰ مگاپاسکال بدست آمد [۲۲].

جدول (۱): مشخصات بتن ساخته شده با سنگدانه توف [۲۲].

مشخصات بتن	
وزن مخصوص بتن	۲۴۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب
سیمان	۶۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب
میکروسیلیس	۹۷ کیلوگرم بر متر مکعب
نسبت آب به مواد سیمانی*	۰/۲
فوق روان کننده	۶/۵ کیلوگرم بر متر مکعب
دانه‌بندی	
الک	درصد مانده
۸	۳۰
۱۶	۳۰
۳۰	۲۰
۵۰	۱۰
۱۰۰	۱۰

*در این جداول منظور از مواد سیمانی، سیمان بعلاوه میکروسیلیس می‌باشد.

در نمونه‌های بعدی که بجای سنگدانه توف از گرانیت استفاده می‌شد بر اساس تجربه بدست آمده مقادیر طرح اختلاط در این حالت با حالت قبل مقداری تفاوت دارد مشخصات و دانه‌بندی این بتن نیز در جدول شماره ۲ آمده است. سایر شرایط ساخت این نمونه بتن مشابه حالت قبل بود. مثل حالت قبل مقاومت فشاری متوسط ۲۸ روزه این نمونه‌ها حدود ۲۸۰ مگاپاسکال بدست آمد [۲۲].

جدول (۲): مشخصات بتن ساخته شده با سنگدانه گرانیت [۲۲].

مشخصات بتن	
وزن مخصوص بتن	۲۴۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب
سیمان	۶۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب
میکروسیلیس	۹۰ کیلوگرم بر متر مکعب
نسبت آب به مواد سیمانی	۰/۲
فوق روان کننده	۶/۰ کیلوگرم بر متر مکعب
دانه‌بندی	
الک	درصد مانده
۸	۳۰
۱۶	۳۰
۱۰۰	۲۰
۲۰۰	۲۰

۶- نتیجه گیری

در مقاله حاضر روش‌های مقابله با حفره‌زایی در سازه‌های هیدرولیکی سدها و همچنین مزیت‌ها و معایب آنها مورد بررسی قرار گرفت. نشان داده شد که روش‌های موجود مقابله با حفره‌زایی یا بسیار پرهزینه و غیر عملی و یا دارای پیچیدگی‌های طراحی و عدم قطعیت نتایج هستند. چنانچه بتوان مقاومت بتن‌های مورد استفاده در ساخت سازه‌های هیدرولیکی سدها را که در معرض حفره‌زایی هستند افزایش داد و مقاومت آنها را به مقاومت مورد نیاز برای مقابله با پدیده حفره‌زایی رسانید، نه تنها یک روش اقتصادی بلکه یک راه حل نسبتاً مطمئن برای مقابله با حفره‌زایی خواهد بود. تجربیات محققین نشان داده است که بتن فوق‌توانمند می‌تواند در سازه‌هایی چون سرریز، حوضچه آرامش و تونل‌های انتقال آب، برای مقابله با حفره‌زایی مورد استفاده قرار گیرد. نتایج بتن‌های ساخته شده با مقاومت بالا در دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور) همراه با جزئیات ساخت آن ارائه شد، و مشخص گردید که می‌توان با ترکیبی از مصالحی مانند سنگ گرانیات یا سنگ توف، میکروسیلیس (و جدیداً نانوسیلیس) و فوق‌روان‌کننده‌ها که به وفور در داخل کشور در دسترس می‌باشند بتن‌های با مقاومت بالا تولید کرد و یک گزینه قابل اعتماد و ساده را جهت مقابله با حفره‌زایی اجرا نمود. از طرفی پیشرفت روزافزون در زمینه تکنولوژی و ساخت بتن‌های با مقاومت بالا این نوید را می‌دهد که بتوان در آینده نیز ساخت و استفاده از بتن فوق‌توانمند را توسعه بخشید. البته با توجه به پیچیده بودن ماهیت پدیده حفره‌زایی در شرایط مختلف و همچنین اندرکنش بتن با نیروهای ناشی از حفره‌زایی، مطالعات تحلیلی و آزمایشگاهی بیشتری جهت توسعه و استفاده از بتن‌های فوق‌توانمند برای مقابله با حفره‌زایی مورد نیاز می‌باشد.

۷- مراجع

[۱] Heller, W., "Hydro-dynamic effects with particular consideration of water quality and their measurement methods", Faculty of Engineering of Dresden University of Technology, habilitation thesis, ۲۰۰۶.

[۲] جلیلی قاضی‌زاده، محمدرضا، "بررسی آزمایشگاهی و ارائه یک مدل ریاضی برای تحلیل جریان آب و هوا بر روی تندآب سرریزها"، پایان نامه دکترا، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، ۱۳۸۲.

[۳] Hopping, P. N.; Mass, G. R., "Cavitation damage on the Karun Dam", Concrete International Journal, Volume ۹, Issue ۳, ۱۹۸۷.

[۴] Falvey, H. T., "Cvitation in chut and spillway", USBR Engrg. Monograph, No ۴۲, Denver, Colorado, USA, ۱۹۹۰.

[۵] Chanson, H., "Air bubble entrainment in free_surface turbulent shear flows", Academic Press London, UK, ۱۹۹۷.

[۶] ACI ۲۱۰R-۹۳, "Erosion of concrete in hydraulic structures", Reported by ACI Committee ۲۱۰, Reapproved ۱۹۹۸.

[۷] Zhang, Shoutian, "Latest developments in hydraulic design of outlet works in china" Bulletin Institutionen for Vattenbyggnad, Kungl Takniska Hogskolan (Hyd. Engrg. Royal Inst. of Technol.), Stockholm, Sweden, No. TRITA-VBI-۱۵۴.۱۹۹۱.

[۸] Peterka, A. J., "The effect of entrained Air on cavitation pitting", Joint Meeting Paper. IAHR/ASCE, Minneapolis. Aug. pp. ۵۰۷-۵۱۸, ۱۹۵۳.

[۹] Jalili, M.R.; Zarrati, A.R., "Development and calibration of a one-needle probe for measurement of air concentration and bubble count in high-speed air-water flows", Scientia Iranica, International Journal of Science & Technology, Vol. ۱۱, No ۴. pp ۳۱۲-۳۱۹, ۲۰۰۴.

- [۱۰] گزارش مدل ریاضی تخلیه کننده تحتانی سد گتوند علیا، موسسه تحقیقات آب، ۱۳۸۶.
- [۱۱] رمضانپور، علی اکبر، "بتن های توانمند و ویژه"، وب سایت انجمن بتن ایران www.ici.ir، پاییز ۱۳۸۵.
- [۱۲] Buitelaar, P., "Ultra high performance concrete: Developments and applications during ۲۵ years", Plenary Session International Symposium on UHPC, Kassel, Germany, ۲۰۰۴.
- [۱۳] Jungwirth, J., "Underspanned bridge structures in reactive powder concrete (RPC)", Swiss Federal Institute of Technology Structural Concrete Laboratory, ۲۰۰۲.
- [۱۴] Bierwagen, D.; Abu-Hawash, A., "Ultra high performance concrete highway bridge", Proceedings of the ۲۰۰۵ Mid-Continent Transportation Research Symposium, Ames, Iowa, ۲۰۰۵.
- [۱۵] Muttoni, A.; Jungwirth, J., "Structural members in ultra high performance concrete (UHPC)", Reporting, ۲۰۰۵.
- [۱۶] Schie, P.; Rucker, P., "New results on early-age cracking risk of special concretes", Concrete Cracking Workshop, ACBM, ۲۰۰۵.
- [۱۷] شکرچی زاده، محمد، "بتن های فوق توانمند"، مجله انجمن بتن ایران، بهار ۱۳۸۵.
- [۱۸] Colgate, D.M., "Cavitation damage in hydraulic structures", Intern Conf on Wear of Materials, St. Louis, MO, pp ۴۳۳-۴۳۸, ۱۹۷۷.
- [۱۹] Momber, A. W., "Short-time cavitation erosion of concrete", Published by Elsevier Science, www.elsevier.com/locate/wear, ۲۰۰۰.
- [۲۰] Horszczaruk, E., "Abrasion resistance of high-strength concrete in hydraulic structures", Published by Elsevier Science, www.elsevier.com/locate/wear, ۲۰۰۵.
- [۲۱] Luther, M. D.; Halczak, W., "Long-Term performance of silica fume concretes in the USA exposed to abrasion-erosion or cavitation--with ۱۰-year results for Kinzua dam and Los Angeles River", ACI Publications, Special Publication Journal, Volume ۱۵۳, ۱۹۹۵.
- [۲۲] نتایج آزمایشگاهی گروه بتن دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور) روی نمونه های مکعبی مقاومت بالا، سالهای ۱۳۸۳ و ۱۳۸۴.