



Strengthening Defected Dam Gates under Cavitation Vibration Using CFRP

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Yousefi O.¹ MSc,
Azhdary Moghaddam M.*¹ PhD,
Keikhaie N.² MSc

How to cite this article

Yousefi O, Azhdary Moghaddam M, Keikhaie N. Strengthening Defected Dam Gates under Cavitation Vibration Using CFRP. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(4):825-831.

ABSTRACT

Many steel structures are damaged due to environmental factors such as accidental loads, exhaustion, rust, and phenomena such as cavitation and time passes. Dams' bottom outlets are one of the important components of these structures that are subject to numerous hydraulic problems such as cavitation vibration, which causes damage and needs repair. One of the novelties for refining is the use of Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP). In this paper, the effect of CFRP on gate strengthening under cavitation vibration load and the effect of damage on maximum vibration by using ABAQUS were studied. In order to observe the effects of failure on the maximum vibration of the outlet, two damages were applied to the front or back of the gate. Finally, the damaged gates were reinforced with two layers of CFRP. The outcomes showed that damage resulted in maximum vibration increase and polymer fibers has a significant effect on reducing vibrations and stresses caused by cavitation pressure.

Keywords Bottom outlet vibration; CFRP; Strengthening; Cavitation

¹Civil Engineering Department, Engineering Faculty, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran
²Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

*Correspondence

Address: Civil Engineering Department, Engineering Faculty, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran
Phone: -
Fax: +98 (54) 33447092
mazhdary@eng.usb.ac.ir

Article History

Received: September 24, 2018
Accepted: November 16, 2018
ePublished: April 06, 2019

CITATION LINKS

[1] Dam hydraulics [2] Numerical analysis of the two-phase flow of water around the outlet [3] Hydraulic gates and valves: In free surface flow and submerged outlets [4] Numerical analysis of the cavitation phenomenon in the outlet [5] Vibration analysis of submerged valves using software model [6] Behavioral trends of RC beams strengthened with externally bonded FRP [7] Failure mode analyses of reinforced concrete beams strengthened in flexure with externally bonded fiber-reinforced polymers [8] Strengthening steel bridge sections using CFRP laminates [9] FRP composites for retrofitting of existing civil structures in Europe: State-of-the-art review [10] Strengthening of reinforced concrete slabs with mechanically-anchored unbonded FRP system [11] Interfacial behavior of mechanically anchored FRP laminates for strengthening steel beams [12] Strengthening of steel beam with carbon FRP laminates [13] Performance of steel beams strengthened with CFRP laminate-Part 1: Laboratory tests [14] Rehabilitation of steel beams using composite materials [15] Strengthening of steel-concrete composite girders using carbon fiber reinforced polymers sheets [16] Model of Narmashir dam outlet

مقاوم‌سازی دریاچه‌های آسیب‌دیده سد تحت ارتعاش حاصل از کاویتاسیون با استفاده از الیاف پلیمری مسلح به فیبر کربن CFRP

امید یوسفی MSc

گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

مهدی اژدری مقدم* PhD

گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

ناصر کیخایی MSc

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

چکیده

بسیاری از سازه‌های فولادی به دلیل عوامل محیطی مانند وارد شدن بارهای تصادفی، فرسودگی، زنگ‌زدگی و پدیده‌هایی همچون کاویتاسیون و گذر زمان دچار آسیب می‌شوند. تخلیه‌کننده تحتانی سدها یکی از اجزای مهم این سازه‌ها هستند که در معرض مشکلات هیدرولیکی متعددی از قبیل ارتعاش حاصل از کاویتاسیون بوده که باعث ایجاد آسیب در آنها می‌شود و نیاز به بهسازی و ترمیم دارند. یکی از مصالح نوین برای مقاوم‌سازی استفاده از کامپوزیت پلیمری مسلح‌شده به فیبرکربن (CFRP) است. در این مقاله به بررسی اثر الیاف CFRP در مقاوم‌سازی دریاچه تحتانی تحت بار ارتعاشی حاصل از کاویتاسیون و تاثیر آسیب بر ارتعاش حداکثری با نرم‌افزار ABAQUS پرداخته شد. به منظور مطالعه آسیب بر ارتعاش دریاچه، از یک اندازه آسیب که به جلو یا عقب دریاچه اعمال شده، استفاده شده است. در نهایت دریاچه آسیب‌دیده با دو لایه الیاف CFRP مقاوم‌سازی شد. نتایج نشان داد که آسیب به وجود آمده ارتعاش حداکثری را افزایش داده و استفاده از الیاف پلیمری تاثیر بسزایی در کاهش ارتعاش و تنش‌های حاصل از فشار کاویتاسیون دارد.

کلیدواژه‌ها: ارتعاش دریاچه تحتانی، CFRP، مقاوم‌سازی، کاویتاسیون

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۷/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۸/۲۵

* نویسنده مسئول: mazhdary@eng.usb.ac.ir

۱- مقدمه

تخلیه‌کننده‌های تحتانی به منظور تخلیه‌کردن مخزن، پایین‌بردن تراز مخزن و رسوب‌شویی مورد استفاده قرار می‌گیرند. مشکلات زیادی در مورد تخلیه‌کننده‌های تحتانی می‌تواند اتفاق بیفتد که یکی از آنها عدم عملکرد صحیح دریاچه تحت ارتعاش است [1]. زمانی که فشار موضعی مایع به مقداری پایین‌تر از فشار بخار مایع می‌رسد، پدیده خلأزایی (کاویتاسیون) به وقوع می‌پیوندد. هنگام بازشدن دریاچه، مقداری افت انرژی در جریان ایجاد می‌شود که این افت اگر به یک اندازه مشخص برسد، سبب ایجاد کاویتاسیون می‌شود و کاویتاسیون حاصل می‌تواند سبب ارتعاش در دریاچه شود. بنا بر دلایل اقتصادی و اجرایی، در محل قرارگیری دریاچه، مجرا از سطح مقطع کوچک‌تری برخوردار است. بالابردن سرعت در این قسمت و جدایی جریان از بستر و لبه دریاچه در پایین‌دست آن سبب بروز مشکل عمده‌ای به نام کاویتاسیون می‌شود. در اثر جدایی جریان از لبه دریاچه و مومنتوم بالای سیال، فشار بعد از دریاچه افت می‌کند [2].

مطالعات زیادی روی ارتعاش دریاچه‌های هیدرولیک صورت گرفته است که اکثر آنها به دلیل پیچیدگی‌های موجود در مدل‌سازی ریاضی، از مدل‌سازی فیزیکی برای بررسی مساله استفاده کرده‌اند. لوین [3] مطالعاتی در مورد دریاچه‌ها و شیرهای هیدرولیک انجام

داده و روابطی را در خصوص ارتعاش دریاچه ذکر کرده است. محققان بسیاری در خصوص پدیده کاویتاسیون با استفاده از نرم‌افزار FLUENT به مطالعه پرداخته‌اند که از میان آنها می‌توان مطالعه سعادت‌جو و جباری [4] و سلیمان‌زاده و شمسایی [2] را نام برد. سعادت‌جو و جباری [4] میزان دبی هوای ورودی به داخل مجرا در بازشدگی‌های مختلف و نیز سرعت هوا در لوله هوارسان را محاسبه و نتایج را با مدل فیزیکی مقایسه کردند. میوه‌چی و کنعانی [5] ارتعاش را با استفاده از رابطه اصلی ارتعاش آزاد بدون در نظر گرفتن عوامل محرک خارجی مورد بررسی قرار داده‌اند. در این مطالعه مدل‌سازی از طریق نرم‌افزار MATLAB صورت گرفته و در نهایت، تطابق خوبی بین جواب‌های حاصل از مدل و حل تحلیلی حاصل شده است.

به‌طور کلی، ارتعاش حاصل از کاویتاسیون در درازمدت باعث آسیب و خوردگی در دریاچه می‌شود که نیاز به مقاوم‌سازی و کنترل اثرات آسیب احساس می‌شود، لذا به بررسی تاریخیچه مقاوم‌سازی با الیاف CFRP پرداخته می‌شود. یکی از مناسب‌ترین مصالحی که امروزه در دنیا رونق زیادی در راستای مقاوم‌سازی اعضای فولادی پیدا کرده، مواد مرکب (کامپوزیت‌های FRP) بوده و به همین دلیل مصرف فولاد در جهان برای مقاوم‌سازی اعضا کاهش پیدا کرده است.

از فیبرهای تقویت‌شده پلیمری به‌طور وسیع و در حوزه‌های مختلف استفاده می‌شود. FRP برای هدف‌های سازه‌ای متفاوت از جمله جلوگیری از ترک، ابزار جذب انرژی و در پل‌ها کاربرد دارد. اخیراً استفاده از FRP برای مقاوم‌سازی سازه‌های فولادی به‌طور چشمگیری افزایش یافته است. روش‌های مختلفی برای مقاوم‌سازی سازه‌های فولادی وجود دارد. از جمله می‌توان به به‌کاربردن قطعه‌های فولادی اضافه، قطعه‌های پیش‌تنیده خارجی و کم‌کردن یا پل‌زدن فاصله بین تکیه‌گاه‌ها اشاره کرد. این روش‌ها نیازمند هزینه و وقت قابل توجهی بوده و در مقایسه با آنها، FRP دارای مقاومت بالا، وزن کم، مقاوم در برابر خوردگی و مناسب برای ارتقای سطح بهره‌برداری سازه‌های فولادی است. طی سال‌های گذشته از CFRP، فقط برای افزایش بهره‌وری در سازه‌های بتنی استفاده می‌شد، اما اخیراً در سازه‌های فولادی نیز با توجه به شناخت خصوصیات مکانیکی بالای این مصالح به‌خصوص در مقاوم‌ت‌های بالا، نصب آسان و هزینه‌های ویژه نسبت به عملیات جوشکاری بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. ظرفیت‌های مکانیکی CFRP نظیر امکان شکل‌دادن ورقه‌های CFRP، اجتناب از کار سنگین پیوسته با تکنیک‌های رفتاری استاندارد، سرعت ساخت، کاهش اختلال برای سازه، حداقل کردن ضررهای اقتصادی هنگام تعطیلی سرویس‌دهی و نهایتاً وزن خیلی کم باعث شده است تا هزینه‌های مقاوم‌سازی کاهش یابد. این مزیت‌ها باعث شده است تا FRP در مقاوم‌سازی، تعمیر یا بهسازی سازه‌ها از چند مورد در ۱۰ سال پیش، به هزاران مورد در حال حاضر افزایش یابد. اجزای سازه‌ای مختلفی شامل تیرها، دال‌ها، ستون‌ها، دیوارهای برشی، اتصالات، دودکش‌ها، طاق‌ها، گنبد‌ها و خرپاها تاکنون توسط مواد FRP مقاوم شده‌اند تا جایی که مبحث مقاوم‌سازی به یکی از مهم‌ترین مباحث سازه‌ای در حال حاضر تبدیل شده است.

بوناکو و مالینچ [6] رفتار تیرهای بتنی مقاوم‌سازی‌شده با FRP را مورد بررسی قرار دادند. تامسن و همکاران [7] مود شکست خمشی تیرهای بتنی مقاوم‌سازی‌شده با FRP را مورد تحلیل قرار دادند. آنها پس از آزمایشات متفاوت دریافتند که طول لایه FRP، نقش مهمی در مقاومت خمشی آنها دارد. بعد از سال ۲۰۰۱، تحقیقات

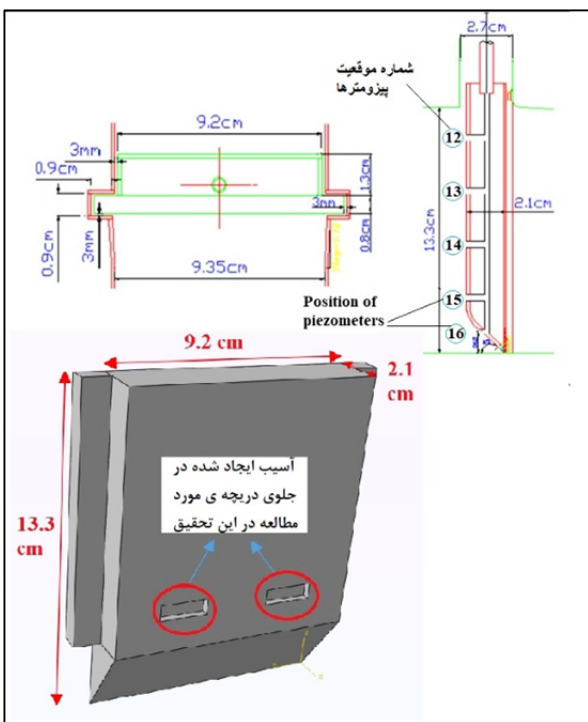
گرفت. در ادامه، برای بررسی اثر آسیب به دریچه، دو عدد نقص (آسیب) به پشت یا جلو دریچه، اعمال و در نهایت، دریچه با دو لایه CFRP مقاوم سازی شد.

۲-۱- مشخصات دریچه فولادی انتخابی

دریچه فولادی مورد مطالعه در این تحقیق، دریچه تحتانی سد نماشیر است که در آزمایشگاه توسط موسسه تحقیقات آب مدل سازی شد [16] و در این تحقیق مدل سازی با نرم افزار ABAQUS 6.16 صورت گرفت. ابعاد دریچه در شکل ۱ و خصوصیات دریچه فولادی در جدول ۱ آمده است.

۲-۲- مشخصات کامپوزیت (CFRP)

برای تقویت دریچه از دو لایه CFRP به صورت ایزوتروپیک استفاده شد که خواص آن در جدول ۲ آورده شده است. منحنی تنش- کرنش این مواد، رفتار الاستیک خطی تا مرحله گسیختگی را بدون هیچ نقطه جاری شدن مشخص، نشان می دهد و در مدل سازی، رفتاری غیرخطی از خود نشان نمی دهند. به همین دلیل تنها کافی است که خصوصیات مکانیکی کشسان این مواد در نرم افزار داده شود.



شکل ۱) نمایی از مقطع و پلان دریچه [16]

جدول ۱) خصوصیات فولاد

چگالی (kg/m ³)	ضریب پواسون	مدول یانگ (MPa)
۷۸۵۰	۰/۳	۲۰۰×۱۰ ^۹

جدول ۲) الیاف کربنی CFRP

کرنش نهایی (%)	مدول الاستیسیته (MPa)	مقاوم کششی (MPa)	دانسیته (g/cm ³)	ضخامت (mm)
۱/۷	۲۳۸۰۰۰	۴۳۰۰	۱/۷۶	۰/۱۳۱

۲-۳- خصوصیات چسب

چسب، مسیر انتقال برش بین سطح فولاد و مواد کامپوزیت را تامین می کند و سبب عملکرد همسان کامپوزیت و دریچه می شود.

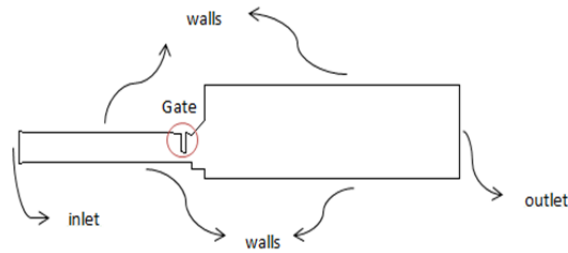
متعددی روی کاربرد CFRP در سازه های فلزی انجام گرفت و باعث شناخت قابلیت های این محصول شد که از آن جمله می توان به تقویت خمشی تیر ورق ها در پل Pottawattamie County در ایالات متحده با چسباندن ورق CFRP روی بال کششی اشاره نمود [8]. به کارگیری ورق های فولادی و پیچ ها برای انتهای مهار شده FRP توسط متولی و سیز/درسکی [9] استفاده شده اند. در این تحقیق، دیوار برشی بنایی با استفاده از GFRP و ورق های مهاری CFRP که در بتن مهار شده بودند، ترمیم شد. مقاوم سازی دال های بتنی مسلح با مهار مکانیکی سیستم غیرچسبیده FRP، با ورق های فولادی و پیچ ها توسط //ماد/اوی و سودکی [10] مورد بررسی قرار گرفت. سیستم مهاری که آنها مورد استفاده قرار داده بودند، شامل یک ورق مهاری با چهار پیچ بود که ورق فولادی، زیر ورق CFRP قرار داشت و در مکانش توسط چهار پیچ ثابت شده بود. علی رغم این که این نوع مهار، موجب تخریب دال و تغییر در مدهای گسیختگی می شود، به کاربردن یک سیستم سه تکه در انتهای ورق های FRP برای پل های مرکب فولادی- بتنی موجب غلبه بر لایه لایه شدگی و جداسازی انتهای می شود، اما استفاده از این سیستم گیره، ظرفیت تحمل بار را در کل تیر افزایش نمی دهد. پژوهش دیگری توسط سوئیدن و همکاران [11] برای اتصالات طولی لبه مهار شده فولادی با FRP انجام شده است. برنامه آزمایشگاهی شامل ۱۸ نمونه کوتاه برای کشف اثرات فاصله لبه بریده شده و فاصله لبه نورد شده و ارزیابی اثرات فاصله بین پیچ ها روی ظرفیت تحمل بار و قابلیت نصب و مونتاژ بوده و نتایج حاکی از آن است که مقدار فاصله لبه نورد شده روی عملکرد اتصالات بسیار چشمگیر بوده و مناسب ترین فاصله حدود ۶ تا ۷ برابر قطر سوراخ پیچ است. پاتنایک و بایر [12] به مطالعه اثر مقاوم سازی برشی و خمشی در تیرهای فولادی با کمک پوشش های CFRP پرداختند. در تیرهایی که تحت آزمایش برای مقاوم سازی خمشی با استفاده از CFRP روی بال کششی قرار گرفتند، افزایش ۳۰٪ ظرفیت باربری مشاهده شد. همچنین در تیرهایی که برای بررسی برشی ورق های CFRP در جان تیر قرار گرفت، افزایش ۶۲ درصدی ظرفیت برشی تیر مشاهده شد. در سال ۲۰۰۹ نیز در دانشگاه چالمرز، تحقیقی تحت عنوان عملکرد تیرهای فولادی I شکل متقارن تقویت شده با ورق CFRP صورت گرفت که از لایه های CFRP و چسب های مختلف اپوکسی استفاده شد و نتایج مطالعات، افزایش ۲۰ درصدی ظرفیت خمشی تیرها را نشان داد [13]. /دیبرگ و همکاران [14] یک مطالعه آزمایشگاهی را در ۵ وضعیت مختلف GFRP و CFRP وصل شده با چسب به بال کششی تیرهای بال پهن فولادی انجام داده اند. توکلی زاده و سعادت منش [15] تیرهای فولادی دارای آسیب اولیه را در چهار نقطه خمشی آزمایش کرده اند. همه این تحقیقات نشان داده اند که مقاوم سازی تیرهای فولادی با استفاده از ورقه های CFRP، ممکن و شدنی است.

هر چند مطالعات زیادی در زمینه مقاوم سازی انجام گرفته، ولی تاکنون به طور مشخص تاثیر کابیناسیون روی ارتعاش دریچه دارای آسیب و مقاوم سازی با الیاف CFRP بررسی نشده است. این در حالی است که ارتعاش دریچه می تواند بسیار مخرب باشد و در عملکرد دریچه، اختلال ایجاد کند، لذا بررسی ارتعاش بسیار اهمیت دارد و در این تحقیق به این مهم پرداخته شد.

۲-۴- مشخصات مصالح و نمونه ها

در این تحقیق به منظور مطالعه اثر کابیناسیون بر ارتعاش دریچه تحتانی، دریچه با بازشدگی ۱۰٪ تحت بار حاصل از کابیناسیون قرار

ورودی جریان هوا، یک خروجی و دیوارها است. ورودی جریان آب از نوع فشار ورودی، ورودی جریان هوا از نوع سرعت ورودی و خروجی جریان از نوع فشار خروجی است. فشارهای ورودی براساس فشارهای مدل آزمایشگاهی، جایگزین و همچنین مقدار فشار خروجی به دلیل در معرض بودن خروجی جریان با هوا، به میزان فشار اتمسفر در نظر گرفته شده است. سرعت ورودی با توجه به نتایج آزمایشگاهی به دست آمده و در شکل ۲ شرایط مرزی نمایش داده شده است.



شکل ۲) شرایط مرزی آنالیز CFD

در این تحقیق از مدل آشفتگی RNG k-epsilon برای مدل سازی آشفتگی جریان استفاده شده است. ابتدا دریچه و کانال به صورت CFD، تحلیل و پس از تعیین فشار وارد به دریچه، این فشار به صورت جداگانه به نرم افزار داده شد و آنالیز دریچه با الیاف CFRP انجام گرفت. برای بررسی سازه های دریچه تحتانی از روش Dynamic Implicit استفاده شده است.

همچنین خواص خطی و غیرخطی مواد اعمال شده و نتایج حاصل از آنالیز نمونه ها در جدول ۴ موجود است. برای صحت سنجی نرم افزار، نتایج فشار وارد بر دریچه با نمونه آزمایشگاهی سد نماشیر توسط آنالیز CFD نرم افزار ABAQUS 6.16 مورد مقایسه قرار گرفت [16] که فشار روی دریچه سرویس سد نماشیر با نرم افزار با دقت بالایی صحت سنجی شد (نمودار ۱). در نمودار ۱، محور افقی، شماره پیژومترها بوده که مکان آنها در شکل ۱ نشان داده شده است. همان گونه که در شکل ۳ دیده می شود، شدت تنش های فشاری در جلوی دریچه اتفاق می افتاد و هر چه به کف کانال نزدیک می شویم، شدت فشار کمتر شده است. کمترین میزان فشار مربوط به پشت دریچه بوده که این خود نشانگر تشکیل کاپیتاسیون در پشت دریچه است. وضعیت تنش های وارد به دریچه تحت فشار حاصل از سیال در شکل ۴ دیده می شود که در واقع این آنالیز کوپل سیال و دریچه است. این روش، امکان آن را فراهم می کند که به طور مستقیم، تاثیر سیال بر سازه مورد مطالعه مشاهده شود.

جدول ۴) مشخصات نمونه های دریچه فولادی

شماره نمونه	نام نمونه	ابعاد CFRP (m ²)	ابعاد آسیب (m ²)	حداکثر ارتعاش دریچه (mm ²)
۱	ساده	ندارد	ندارد	۴/۳۲
۲	آسیب در جلو	ندارد	دو عدد ۰/۱۶×۰/۰۸	۴/۴۱
۳	آسیب در پشت	ندارد	دو عدد ۰/۱۶×۰/۰۸	۴/۴۳
۴	مقاوم سازی نوع ۱	۰/۰۷۲×۰/۰۳	ندارد	۳/۲۱
۵	مقاوم سازی نوع ۲	۰/۰۹۲×۰/۰۳	ندارد	۳/۱۲
۶	آسیب در پشت و مقاوم سازی نوع ۲	۰/۰۹۲×۰/۰۳	دو عدد ۰/۱۶×۰/۰۸	۳/۹۴

نوارهای CFRP تقویتی با استفاده از اپوکسی مخصوص به دریچه چسبانده می شود. در جدول ۳، مشخصات چسب مورد استفاده در این پژوهش آورده شده است. قابل توجه است که ضخامت یک لایه CFRP و چسب مدل شده در نرم افزار برابر با یک میلی متر و در مجموع ۲ میلی متر برای دولایه است.

جدول ۳) خصوصیات رزین اپوکسی

کرنش نهایی (%)	مدول الاستیسیته (MPa)	مقاومت کششی (MPa)
۳۰	۴۵۰۰	۰/۹

۳- نمونه های دریچه فولادی

برای مطالعه اثر کاپیتاسیون روی دریچه و محاسبه حداکثر ارتعاش، یک دریچه ساده بدون آسیب و مقاوم سازی با بازشدگی ۱۰٪ در نظر گرفته شد که نمونه شاهد نیز است. سپس با توجه به بررسی اثر محل آسیب روی دریچه، دو عدد آسیب با ابعاد ۰/۱۶×۰/۰۸m²، یک بار به جلوی دریچه و بار دیگر به پشت دریچه جایی که کاپیتاسیون اتفاق می افتد، اعمال شد. در نهایت، برای مشاهده تاثیرات مقاوم سازی با CFRP، این الیاف با ضخامت ۲ میلی متر و اندازه های ۰/۰۷۲×۰/۰۳m² و ۰/۰۹۲×۰/۰۳m² روی دریچه نصب شدند.

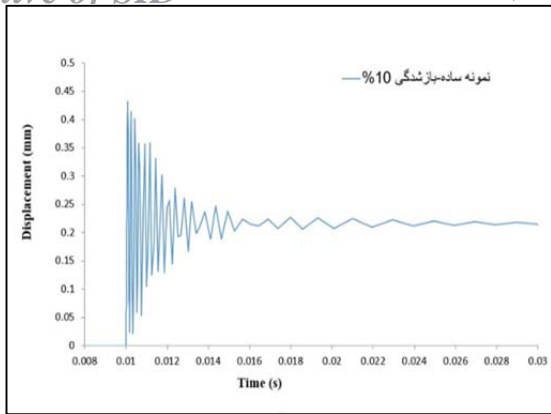
۴- مدل سازی و تحلیل با نرم افزار

در این تحقیق از نرم افزار ABAQUS 6.16 برای مدل سازی استفاده شد که در آن دریچه فولادی، ورق های CFRP و چسب به صورت سه بعدی و Solid با شبکه بندی از نوع مش C3D10 که نوعی المان (۱۰گرهه) است، مدل سازی شد و آنالیز استاتیکی غیرخطی برای رسیدن به حالت شکست در نظر گرفته شد. به طوری که برای کانال اندازه مش ۰/۲ سانتی متر و برای دریچه از مش با اندازه کوچک تر ۰/۰۴۹ سانتی متر اعمال شد که بتوان با دقت بیشتری، تنش های وارده را اندازه گیری و مشاهده نمود.

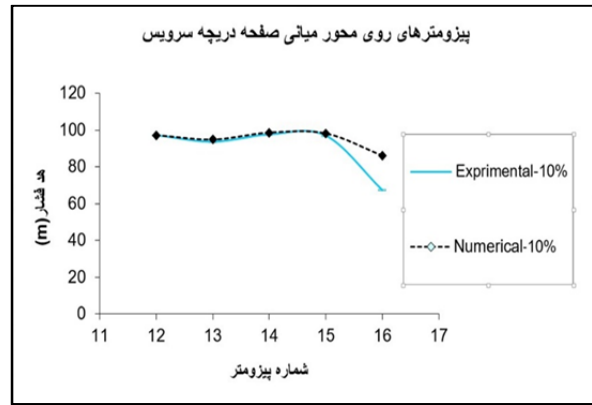
در نرم افزار ABAQUS 6.16، دو روش برای حل مسایل کوپل سازه و سیال وجود دارد که یکی از آنها روش کوپل سازه و سیال به روش لاگرانژین و روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) بوده و روش دیگر کوپل سازه و سیال به روش اویلرین- لاگرانژین است. در روش اویلرین لاگرانژین، دینامیک سیال و همچنین جابه جایی ها و سرعت های سازه به خوبی پیش بینی شده، اما دقت مقادیر فشار وارد بر سازه به دلیل ماهیت روش پنالتی در تماس بین سازه و سیال، دارای دقت پایین تری است. روش CFD حل مناسب تری را در مسایل سیالاتی ارائه می کند که در نرم افزار ABAQUS 6.16، امکان کوپل کردن این روش با روش سازه ای وجود دارد. در این پژوهش، جریان سیال آب و تخلیه کننده تحتانی به روش CFD، شبیه سازی و اثرات جریان نیز روی دریچه به صورت کوپل با آنالیز سیالاتی در نظر گرفته شده است. جریان سیال به صورت پایدار بوده است، اما قابلیت انجام آنالیز در حالت گذرا نیز وجود دارد. در حالت کوپل، سیال و سازه با دو Step یا آنالیز انجام می شود. به این صورت که پس از طراحی کانال و اعمال شرایط مرزی مربوطه، دریچه طراحی می شود و بعد از اعمال خواص هر یک، داخل کانال قرار می گیرد. در واقع نرم افزار، دو آنالیز انجام می دهد، به این صورت که ابتدا آنالیز CFD برای کانال، انجام و در آنالیز دوم فشار سیال به دریچه منتقل می شود.

۴-۱- شرایط مرزی CFD

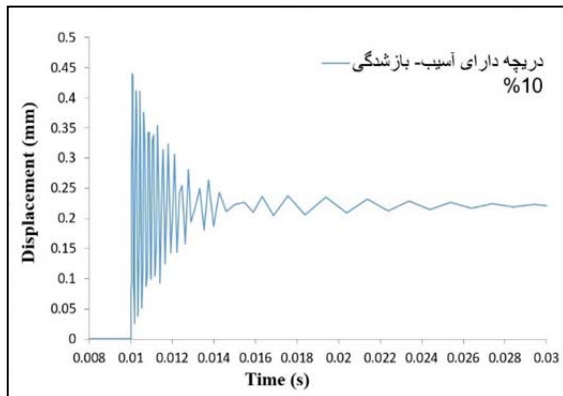
برای آنالیز CFD، شرایط مرزی شامل یک ورودی جریان آب، یک



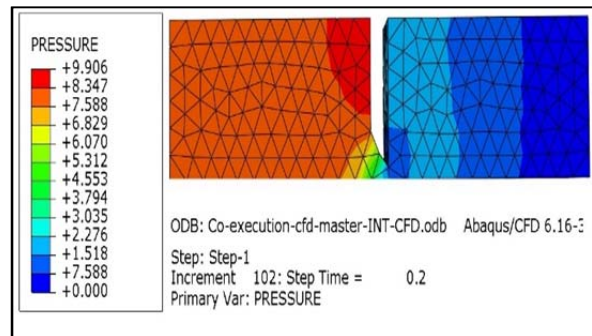
نمودار ۲) دريچه بدون مقاومت‌سازي و آسيب با حداکثر ارتعاش ۴/۳۲ میلی‌متر و بازشدگی ۱۰٪



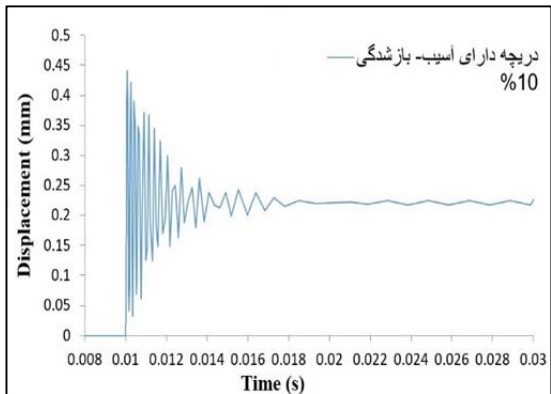
نمودار ۱) صحت‌سنجی نرم‌افزار با آزمایشگاه در بازشدگی ۱۰٪ [16]



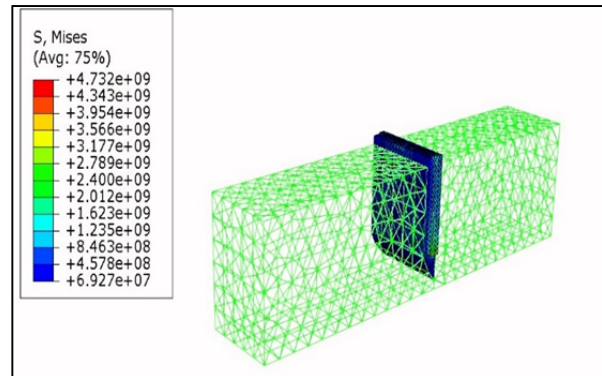
نمودار ۳) ارتعاش دريچه دارای آسيب در پشت و حداکثر ارتعاش ۴/۴۳ میلی‌متر و بازشدگی ۱۰٪



شکل ۳) شدت تنش‌های فشاری به‌وجودآمده در جلوی دريچه



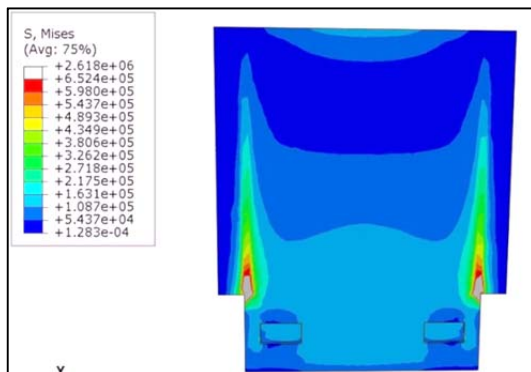
نمودار ۴) ارتعاش دريچه دارای آسيب در جلو و حداکثر ارتعاش ۴/۴۱ میلی‌متر و بازشدگی ۱۰٪



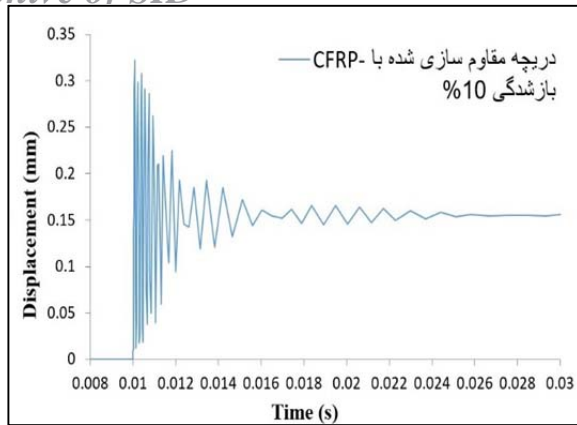
شکل ۴) تنش‌های وارد بر دريچه در تحلیل همزمان با کانال

۵- بحث و نتیجه‌گیری

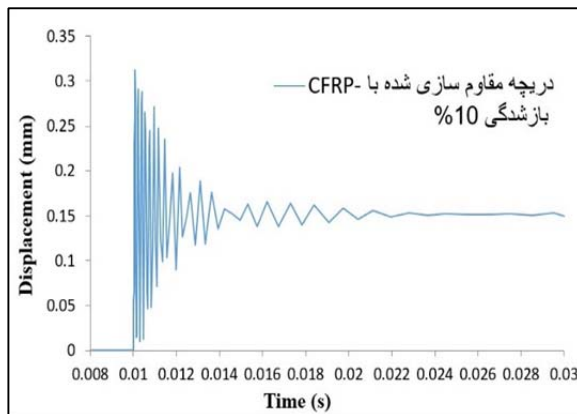
با توجه به نتایج استخراج‌شده از برنامه ABAQUS 6.16، حداکثر ارتعاش دريچه ساده برای بازشدگی ۱۰٪، ۴/۳۲ میلی‌متر حاصل شد. در ۰/۱ ثانیه اول، دريچه تحت فشار ناشی از جریان آب در قسمت جلوی دريچه قرار دارد و در ادامه فشار ناشی از ترکیدن حباب به‌صورت دینامیک منجر به ارتعاش دريچه می‌شود. نمودار ۲، دريچه ساده، دريچه بدون مقاومت‌سازي و آسيب بوده که نمونه کنترل نیز است و نمونه‌های دیگر با آن مقایسه شدند. برای مطالعه تاثیر آسيب بر حداکثر ارتعاش دريچه دو عدد نقص (آسيب)، به اندازه $0.16 \times 0.08 \text{ m}^2$ با عمق ۲ میلی‌متر، برای یک دريچه در جلو و دیگری در پشت آن ایجاد شد تا بتوان تاثیر آسيب را در هر یک از حالت‌ها مطالعه نمود. حداکثر ارتعاش برای نمونه با آسيب در پشت ۴/۴۳ و برای دريچه با آسيب در جلو ۴/۴۱ حاصل شد (نمودارهای ۳ و ۴، شکل‌های ۵ و ۶). آنچه که نتایج نشان می‌دهد، حداکثر ارتعاش هر دو دريچه تقریباً برابر است و اختلاف ناچیزی مشاهده شد.



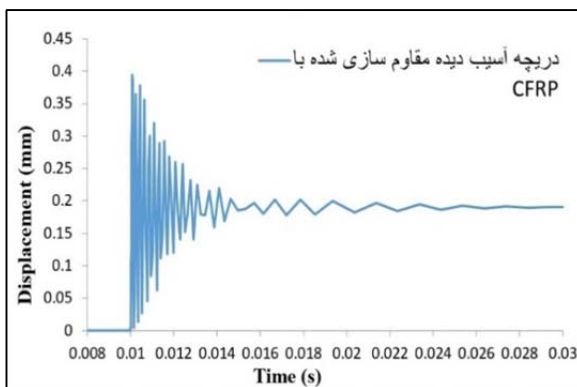
شکل ۵) دريچه دارای آسيب در پشت بعد از آنالیز



نمودار ۵) ارتعاش دریچه مقاوم سازی شده با CFRP به اندازه $0.072 \times 0.03 \text{ m}^2$ و حداکثر ارتعاش $3/21$ میلی متر در بازشدگی ۱۰٪



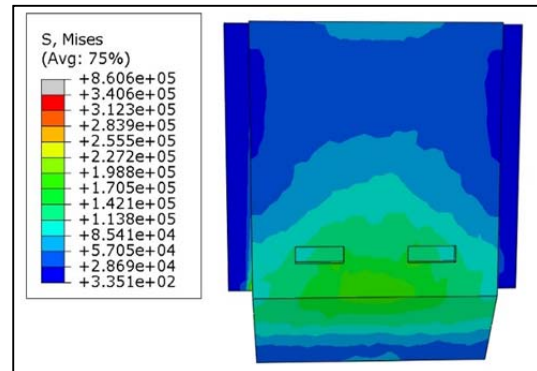
نمودار ۶) ارتعاش دریچه مقاوم سازی شده با CFRP به اندازه $0.072 \times 0.03 \text{ m}^2$ و حداکثر ارتعاش $3/12$ میلی متر در بازشدگی ۱۰٪



نمودار ۷) ارتعاش دریچه دارای آسیب و مقاوم سازی شده با CFRP به اندازه $0.072 \times 0.03 \text{ m}^2$ و حداکثر ارتعاش $3/94$ میلی متر در بازشدگی ۱۰٪

۶- نتیجه گیری

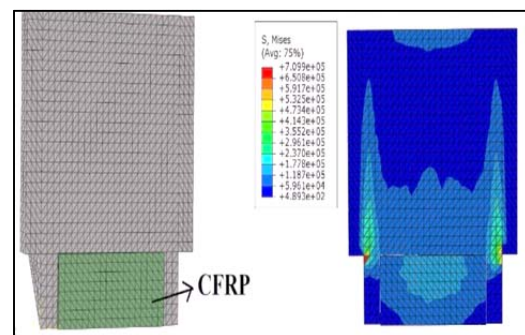
کاویتاسیون یکی از عواملی است که در اثر کاهش فشار سیال و فشار ناشی از ترکیدن حباب می تواند بسیار مخرب باشد. در واقع حباب حاصل از کاویتاسیون، یک فشار دینامیکی به دریچه، وارد و سبب ارتعاش دریچه می شود. ارتعاش وارد به دریچه در درازمدت باعث آسیب و تخریب در دریچه می شود. به منظور کنترل ارتعاش و آسیب به وجود آمده نیازمند مصالحی هستیم که علاوه بر صرفه جویی در وقت و هزینه، مقاومت بالایی نیز داشته باشند که الیاف CFRP از جمله بهترین این مصالح هستند. در این پژوهش از نرم افزار ABAQUS 6.16 تحت آنالیز CFD برای محاسبه فشار



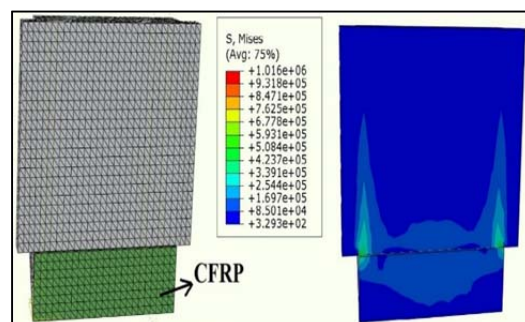
شکل ۶) دریچه دارای آسیب در جلو بعد از آنالیز

برای بررسی تاثیر الیاف بر کاهش ارتعاش دو عدد طول CFRP به اندازه های $0.072 \times 0.03 \text{ m}^2$ و $0.092 \times 0.03 \text{ m}^2$ در ناحیه پشت دریچه برای مقاوم سازی استفاده شد. قابل توجه است که الیاف CFRP به صورت دولا به (یک لایه طولی و یک لایه عرضی در جهت تحمل تنش ها در هر دو جهت) استفاده شدند. حداکثر ارتعاش برای طول کوچک تر، $3/21$ میلی متر و برای طول بزرگ تر، $3/12$ میلی متر مشاهده شد. استفاده از طول بزرگ تر عملکرد بهتری را نشان داده است و نسبت به نمونه دریچه ساده، مقاوم سازی تاثیر بسزایی در کاهش حداکثری ارتعاش از خود نشان داد که تنش به وجود آمده در دریچه های مقاوم سازی شده و ارتعاش دریچه ها در شکل های ۷ و ۸ و نمودارهای ۵ و ۶ قابل مشاهده است.

در نمودار ۷ می توان تاثیر الیاف مقاوم سازی را روی دریچه آسیب دیده مشاهده نمود. در واقع، این الیاف تاثیر قابل توجهی در مقاوم سازی و جبران آسیب به وجود آمده در دریچه داشته، به طوری که حداکثر ارتعاش در نمونه با آسیب در پشت و بدون مقاوم سازی $4/43$ میلی متر بوده، در حالی که پس از مقاوم سازی با الیاف CFRP به طول $0.092 \times 0.03 \text{ m}^2$ این مقدار به $3/21$ میلی متر کاهش یافت که کاهش ۲۸ درصدی را نشان می دهد.



شکل ۷) دریچه مقاوم سازی شده با CFRP با ابعاد $0.072 \times 0.03 \text{ m}^2$



شکل ۸) دریچه مقاوم سازی شده با CFRP با سایز $0.092 \times 0.03 \text{ m}^2$

submerged valves using software model. 3th National Congress of Civil Engineering, 2007, 1 May, 2007, Tabriz, Iran. Tabriz: Tabriz University; 2007. [Persian]

6- Bonacci JF, Maalej M. Behavioral trends of RC beams strengthened with externally bonded FRP. *Journal of Composites for Construction*. 2001;5(2):102-113.

7- Thomsen H, Spacone E, Limkatanyu S, Camata G. Failure mode analyses of reinforced concrete beams strengthened in flexure with externally bonded fiber-reinforced polymers. *Journal of Composites for Construction*. 2004;8(2):123-131.

8- Sen R, Liby L, Mullins G. Strengthening steel bridge sections using CFRP laminates. *Composites Part B Engineering*. 2001;32(4):309-322.

9- Motavalli M, Czaderski C. FRP composites for retrofitting of existing civil structures in Europe: State-of-the-art review. *International Conference of Composites & Polycon*, 17-19 October, 2007, Tampa, Florida, U.S.A. Mason: American Composites Manufacturers Association; 2007.

10- El Maaddawy T, Soudki K. Strengthening of reinforced concrete slabs with mechanically-anchored unbonded FRP system. *Construction and Building Materials*. 2008;22(4):444-455.

11- Sweedan AMI, El-Sawy KM, Alhadid MMA. Interfacial behavior of mechanically anchored FRP laminates for strengthening steel beams. *Journal of Constructional Steel Research*. 2013;80:332-345.

12- Patnaik AK, Bauer CL. Strengthening of steel beam with carbon FRP laminates. 4th International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, 20-23 July, 2004, Calgary, Canada. Calgary: Calgary University; 2004.

13- Linghoff D, Al-Emrani M, Kliger R. Performance of steel beams strengthened with CFRP laminate-Part 1: Laboratory tests. *Composites Part B Engineering*. 2010;41(7):509-515.

14- Edberg W, Mertz D, Gillespie Jr J. Rehabilitation of steel beams using composite materials. 4th Materials Engineering Conference, 10-14 November, 1996, Washington DC, United States. Reston: American Society of Civil Engineers; 1996.

15- Tavakkolizadeh M, Saadatmanesh H. Strengthening of steel-concrete composite girders using carbon fiber reinforced polymers sheets. *Journal of Structural Engineering*. 2003;129(1):30-40.

16- Hosseini A, Sanei M, Parekar M, Habibi M, Davoodi MH, Ghafoori A. Model of Narmashir dam outlet [Internet]. Tehran: Education and Promotion Institute of Soil Conservation and Watershed Management; 2008 [cited 2018 Sep 01]. Available from: <http://fipak.areeo.ac.ir/site/catalogue/18781007#>

وارد بر دریچه و با توجه به نتایج آزمایشگاهی استفاده شد. پس از محاسبه فشار، این مقدار برای محاسبه ارتعاش حداکثری در دریچه دارای آسیب و دریچه مقاوم‌سازی شده به نرم افزار ABAQUS 6.16 اعمال شد. نتایج به دست آمده در این تحقیق به طور خلاصه عبارت از موارد زیر است:

۱- آسیب به وجود آمده در دریچه، تاثیر بسزایی در افزایش ارتعاش حداکثری دریچه دارد.

۲- محل آسیب دریچه از نقطه نظر جلو یا پشت دریچه در تفاوت حداکثر ارتعاش تقریباً یکسان است، اما با توجه به اتفاق کابیناسیون در پشت دریچه، تنش‌های بیشتری به این ناحیه وارد می‌شود که در درازمدت باعث گسترش آسیب به وجود آمده می‌شود.

۳- استفاده از الیاف CFRP تاثیر قابل توجه در کنترل، جبران آسیب و تخریب‌های آتی دارد.

۴- استفاده از طول بزرگ‌تر الیاف، تاثیر بیشتری بر کاهش ارتعاش دارد و در نمونه‌های مقاوم‌سازی شده و آسیب‌دیده نسبت به نمونه بدون مقاوم‌سازی و دارای آسیب، کاهش ۲۸ درصدی در ارتعاش حداکثری مشاهده شد.

تشکر و قدردانی: موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

تأییدیه اخلاقی: موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

تعارض منافع: موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

سهم نویسندگان: امید یوسفی (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۵۰٪)؛ مهدی اژدری مقدم (نویسنده دوم)، نگارنده مقدمه/روشناس/پژوهشگر کمکی (۴۰٪)؛ ناصر کیخایی (نویسنده سوم)، پژوهشگر کمکی (۱۰٪)

منابع مالی: موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

منابع

- 1- Vischer DL, Hager WH. *Dam hydraulics*. Ghodsian S, translator. Tehran: Tarbiat Modares University Publications; 2003. [Persian]
- 2- Soleymanzade R, Shamsaei A. Numerical analysis of the two-phase flow of water around the outlet. 7th International Civil Engineering Congress, 8 May, 2006, Tehran, Iran. Tehran: Tarbiat Modares University; 2006. [Persian]
- 3- Lewin J. *Hydraulic gates and valves: In free surface flow and submerged outlets*. 7th Edition. London: Thomas Telford Publications; 1995.
- 4- Saadatjo J, Jabari A. Numerical analysis of the cavitation phenomenon in the outlet. 3rd National Congress on Civil Engineering, 1 May, 2007, Tabriz, Iran. Tabriz: Tabriz University; 2007. [Persian]
- 5- Mivechi MR, Kanani A. *Vibration analysis of*