

بررسی آسیب ناشی از خلزایی در سرریز با استفاده از منطق فازی

فاطمه زندی گوهرریزی^{۱*} و مهدی اژدری مقدم^۲

چکیده

پیچیدگی پدیده شناخته شده خلزایی در سازه‌های آبی ناشی از تجربه‌های مختلف در مشاهده این آسیب و عوامل متعدد مؤثر بر ایجاد خلزایی است. پارامتری مؤثر بر آسیب در یکی از مهم‌ترین سازه‌های آبی یعنی سرریز سدها، سرعت جریان، فشار سیستم و مقاومت مصالح جداره محیط، مدت زمان کارکرد، محتوای هوا، هستند. در روش کلاسیک کنترل آسیب از شاخص کاویتاسیون استفاده می‌شود. در این تحقیق از منطق فازی برای تنظیم سطوح آسیب، مدیریت و پیش‌بینی شدت آسیب براساس دو عامل مهم سرعت و شاخص کاویتاسیون استفاده شده است. برای ایجاد، سنجش و مقایسه مدل فازی در این پژوهش از داده‌های عددی سنجیده شده در دو سرریز شوت نمونه، آسیب گزارش شده، آسیب تخمین زده شده کلاسیک و نتایج یک مدل فازی پیشین بهره گرفته شده است. مدل فازی ایجاد شده سطوح آسیب کاویتاسیون را مشابه با شدت واقعی آسیب و محدوده آسیب را در بازه آسیب کاویتاسیون واقعی تخمین می‌زند.

واژه‌های کلیدی: سرریز، آسیب کاویتاسیون، شاخص کاویتاسیون، مدل فازی، تابع عضویت، شدت آسیب.

ارجاع: زندی گوهرریزی ف. و اژدری مقدم م. ۱۳۹۰. بررسی آسیب ناشی از خلزایی در سرریز با استفاده از منطق فازی. مجله پژوهش آب ایران. ۱۰۷: (۸)۵-۱۱۶.

۱- فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد رشته مهندسی آب، مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان.

۲- استادیار گروه عمران دانشگاه سیستان و بلوچستان.

* نویسنده مسئول: zandi1984@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۰۱/۰۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۰۲/۱۴

مقدمه

گاهی در یک سیستم هیدرولیکی به علت بالا رفتن سرعت، فشار منطقه‌ای پایین می‌آید و ممکن است این فشار به حدی پایین بیاید که برابر فشار بخار سیال در آن شرایط باشد و یا در اثر وجود ناصافی‌ها و یا ناهمواری‌های کف، خطوط جریان از بستر خود جدا شود و بر اثر این جداشدگی فشار موضعی در منطقه جداشدگی کاهش یابد و ممکن است که به فشار بخار سیال برسد. در این صورت بر اثر این دو عامل بلافاصله مایعی که در آن قسمت در جریان است به حالت جوشش درآمده و سیال به بخار تبدیل شده و حباب‌هایی از بخار به وجود می‌آید. این حباب‌های بخار پس از انفجار امواج ضربه‌ای ایجاد کرده و پس از مدت کوتاهی روی مرز جامد ایجاد فرسایش و خوردگی می‌کنند. در فاصله‌ای به اندازه دو برابر شعاع حباب از مرکز انفجار فشار به ۲۰۰ برابر فشار محیط می‌رسد و فشار ناشی از انفجار و تبدیل مجدد گروهی از حباب‌ها به مایع گاه به ۱۵۰۰ مگا پاسکال می‌رسد (فالوی، ۱۹۹۰). از آنجایی که سطوح تماس این حباب‌ها با بستر سرریز بسیار کوچک می‌باشند نیروی فوق‌العاده زیادی در اثر این انفجارها به بسترها سرریزها و حوضچه‌های آرامش و غیره وارد می‌کند.

در سرریزهای بلند چون سرعت سیال فوق‌العاده زیاد است، در نتیجه ناصافی‌هایی میلی‌متری هم می‌تواند باعث ایجاد جدایش جریان، کاهش فشار موضعی و خللاژی شود. آسیب کاویتاسیون در بعضی از سازه‌ها زیاد بوده به نحوی که تعمیر آن هزینه‌های بسیاری لازم دارد تا سازه به‌طور ایمن دوباره عمل کند.

بعد از سال‌ها تحقیق و بررسی بر روی آسیب ناشی از کاویتاسیون، نتایج زیر به وضوح مشخص شده است (لی و هوپس، ۱۹۹۶): ۱- به دلیل اینکه برای طرحی یکسان از سازه، ساخت و بهره‌وری سازه‌ها متفاوت است، آسیب کاویتاسیون یکسان نیست. ۲- مقیاس و مدل‌سازی، مشاهدات و پیش‌بینی شرایط واقعی سازه خطاهایی ناشناخته را موجب می‌شود که در طراحی در نظر گرفته نمی‌شوند. ۳- پیش‌بینی محل و هندسه زبری منفرد ایجاد شده در مراحل ساخت یا روندهای شیمیایی و فیزیکی، که باعث شروع کاویتاسیون می‌شوند و به آسیب می‌انجامد، دشوار است.

خسارت کاویتاسیون به عوامل بسیاری از جمله شاخص کاویتاسیون σ ، سرعت جریان v ، مقاومت سطحی مصالح سازه S ، زمان بهره‌برداری t ، و مقدار هوای جریان C بستگی دارد. ۴- بیشتر اطلاعات برای ارائه شاخص‌های شروع کاویتاسیون در آزمایشگاه‌ها به دست آمده است، هرچند که تجارب و نتایجی از مشاهدات نمونه واقعی نیز وجود دارد. ۵- آسیب در سرریزها نتیجه ترکیبی از متلاشی شدن حباب‌های کاویتاسیون و جداشدگی خرده‌ها (قطعات کنده شده)، فرسایش ناشی از سرعت و سائیدگی ناشی از آشغال، و عمل یخ زدگی/ذوب می‌باشد. ۶- خسارت کاویتاسیون به عوامل و پارامترهای زیادی مرتبط است. اما آزمایش‌ها و نتایج حاصل از نمونه‌های اولیه منجر به یک روش کلاسیک شده است که برای جلوگیری از خسارات مترتبه از کاویتاسیون، از شاخص کاویتاسیون استفاده می‌کند.

در روش کلاسیک هدف دستیابی به شاخصی بالاتر از شاخص کاویتاسیون بحرانی (شاخص کاویتاسیون آغازی) است ($\sigma > \sigma_i$). رابطه مورد استفاده برای تخمین این شاخص در جریان معادله ۱ می‌باشد.

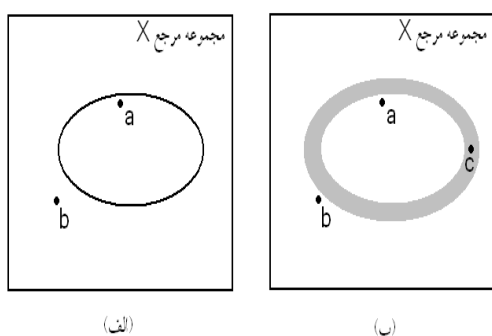
$$\sigma = \frac{p - p_v}{\rho v^2 / 2} \quad (1)$$

که در آن: p فشار موضعی، p_v فشار بخار آب، v سرعت موضعی است.

روش دیگری که توسط وانگ و چو (۱۹۷۹) ارائه شده است، فرض می‌کند که خسارت ناشی از کاویتاسیون، بعد از یک عملکرد طولانی به یک عمق تعادل خواهد رسید (لی و هوپس، ۱۹۹۶). سرعت و شاخص کاویتاسیون برای عمق پایدار در فرمول آن‌ها در نظر گرفته شده است. در روش فالوی (۱۹۹۰) شاخص و پتانسیل آسیب کاویتاسیون، به‌عنوان حاصل پارامترهای شاخص کاویتاسیون، سرعت و عامل زمان عملکرد معرفی شده‌اند. فاکتور شاخص کاویتاسیون به انتخاب یک شاخص آغازین آسیب نیاز دارد. امکان ایجاد آسیب و شدت آن با مقدار پتانسیل و شاخص آسیب مشخص می‌شود.

در این روش‌ها، انتخاب σ_i حتی برای یک سازه خاص با داده‌های داده شده برای خسارت و عملکرد و ساخت آن، نامشخص است. روند آسیب کاویتاسیون بسیار پیچیده است. عوامل زیادی بر کاویتاسیون تأثیرگذار بوده و اندرکنش این

وقوع یک پیشامد مانند آنچه در نظریه احتمال وجود دارد ندارد و مربوط به ناخوش تعریف بودن مفاهیم زبانی می‌شود، از این رو در محدوده مطالعه نظریه احتمال قرار نمی‌گیرد (ماشین‌چی، ۱۳۷۹) (شکل ۱). اگر این‌گونه مجموعه‌ها و گزاره‌ها را از دامنه کار خود خارج سازیم، مدل‌سازی بخش وسیعی از پدیده‌های طبیعی را نمی‌توانیم به‌خوبی انجام دهیم. اساساً اگرچه سیستم‌های فازی پدیده‌های غیرقطعی و نامشخص را توصیف می‌کنند، با این حال خود تئوری فازی یک تئوری دقیق می‌باشد (وانگ، ۱۳۷۸).



شکل ۱- مقایسه مجموعه کلاسیک (الف) با مجموعه فازی (ب)
(دزفولی ۱۳۸۴)

توانایی مجموعه‌های فازی ابراز انتقال تدریجی از عدم عضویت به عضویت و برعکس با کمک تابع عضویت است. تابع عضویت درجه عضویت المان‌های مختلف را به یک مجموعه نشان می‌دهد و مقداری بین صفر و یک را می‌گیرد (دزفولی، ۱۳۸۴). مثلاً $\mu_X(X)$ که درجه عضویت X را در مجموعه فازی X نشان می‌دهد، و هر مقداری در بازه حقیقی $[0, 1]$ می‌گیرد، یک تابع عضویت فازی است و هرچه $\mu_X(X)$ به ۱ نزدیک‌تر باشد، عضویت X در X بیشتر است.

عملگرهایی که برای مجموعه‌های فازی تعریف می‌شوند، شکل تعمیم یافته‌ای از عملگرهای مجموعه‌ای مربوط به مجموعه‌های کلاسیک هستند. عملگرهای مجموعه‌ای استاندارد شامل اشتراک فازی، اجتماع فازی و متمم فازی است (دزفولی، ۱۳۸۴). اضافه بر این، عملگرهای دیگری هستند که ویژگی‌های عملگرهای استاندارد را برآورده کرده و در کاربردها و روش‌های متفاوت استفاده می‌شوند.

عوامل ناشناخته است. هنگامی که شرایط بهره‌برداری تغییر کند سطح و گسترش آسیب نیز تغییر می‌کند. سطح آسیب در هر ناحیه‌ای به خصوصیات مصالح، مقاومت، روش‌های ساختمانی، عملکرد سرریز و به مهارت‌های ساخت بستگی دارد که با نوع سرریز، زمان و جریان‌های بهره‌برداری تغییر می‌کند. تصور می‌شود ارائه این‌گونه موارد با ریاضیات کلاسیک سخت بوده و بنابراین آن‌ها را می‌توان با ریاضیات فازی ارائه کرد. پیشتر توسط محققان با ارائه مدل پیش‌بینی فازی اثر چهار پارامتر دخیل در آسیب کاویتاسیون و اندرکنش آن‌ها را در نظر گرفته شده و این پژوهش را برای سرریزهای تونلی سد گلن‌کنیون^۱ انجام داده و برای سه سرریز تونلی دیگر و سرریزهای شوت کارون^۱ نیز بررسی قرار کرده‌اند. مدل آن‌ها برای سرریزهای تونلی همخوانی خوبی نشان داد اما تخمین‌ها در سرریزهای شوت با واقعیت همخوانی نداشتند (لی و هوپس، ۱۹۹۵، ۱۹۹۶).

در تحقیق حاضر سعی شده است مدل فازی لی و هوپس (۱۹۹۶) با تغییراتی برای کاربرد در سرریز شوت اصلاح شود. در این تحقیق با استفاده از توابع عضویت تجربی در مطالعات پیشین توسط محققان مذکور و با در نظر گرفتن سرعت جریان و شاخص کاویتاسیون اثر آن‌ها را به‌صورت فازی بررسی کرده و به‌عبارت قدرت عمل سرعت را، که در شاخص نیز اثرگذار است، بالا برده شده است. به کمک این بررسی سعی می‌شود پیش‌بینی آسیب کاویتاسیون و سطح آن، برای نمونه سرریزی که مدل محققان قبلی برای آن پاسخگو نبوده است، صورت بگیرد.

مواد و روش‌ها

واژه فازی به معنای مبهم و گنگ است. ریاضیات فازی از توانایی انسان برای درک مفاهیم مبهمی ناشی شده که قابلیت ارائه و آنالیز با ریاضیات کلاسیک را ندارند (لی و هوپس، ۱۹۹۶). در ریاضیات کلاسیک با یکسری مجموعه‌ها و مرزهایی خوش تعریف روبه‌رو هستیم. منظور از خوش تعریف بودن این است که بتوان تصمیم گرفت آیا یک گزاره درست است یا نه. اما در حالات واقعی ما با نوعی عدم قطعیت که مربوط به عدم مرزبندی دقیق و محکم مفاهیم است، روبه‌رو هستیم. این عدم دقت ربطی به نامعلوم بودن

۰۸٪). یک مدل تصمیم‌گیری جامع فازی می‌تواند عامل‌ها را با در نظر گرفتن اندر کنش و وزن‌های‌شان ترکیب کند. در مقاله حاضر شدت آسیب کاپیتاسیون و محل آن توسط مدل فازی که از ریاضیات فازی سود می‌برد، پیش‌بینی می‌شود. مدل فازی جدیدی ایجاد گردید که از توابع عضویت تجربی در کار گذشته انجام شده بهره می‌برد اما قوانین و وزن قانون‌ها متفاوتی با مدل گذشته و روش استلزام و استنتاج خاص خود را داراست. مجموعه فازی برای شدت خسارت کاپیتاسیون، جهت نشان دادن چگونگی تغییر آسیب با σ ، v ، به پنج سطح تقسیم خواهد شد. در نتیجه مجموعه فازی شدت خسارت کاپیتاسیون به صورت زیر قابل بیان است:

مجموعه فازی شدت خسارت کاپیتاسیون = {سطح عدم آسیب، سطح آسیب سبک، سطح آسیب متوسط، سطح آسیب شدید، سطح آسیب نهایی}

کمیت دادن به هر سطح آسیب، می‌تواند به میزان ریسک شکست سرریز و هزینه برای تعمیر بستگی داشته باشد. مقدار تابع عضویت برای هر سطح در جدول ۱ داده شده است. کمیت‌های سطح‌بندی در این تحقیق بدون داشتن ریسک و هزینه و به دلخواه انتخاب شده است. خاصیت مدل‌های فازی اینگونه می‌باشد که در قسمت‌های مختلف مدل (مانند توابع، قوانین، عملگرها، غیرفازی سازی و یا سطح‌بندی نتایج) دارای کنترل‌ها تنظیم است که می‌توان با آن‌ها نتیجه مدل را برای بازه‌ای خاص از ورودی بر طبق داده‌های واقعی به دست آورد که شاید در بازه دیگر کاربرد نداشته باشد. برای مثال برای سنجیدن و کنترل درجه شوری آب می‌توان نمک را جداگانه تغییر داد یا آب و یا هر دو پارامتر را کنترل کرد. بعد از دست‌یابی به یک مدل نسبتاً جوابگو می‌توان با وجود داده‌های بیشتر و مشاهدات، سطح‌بندی مدل را نیز بر طبق خواست نهایی و یا بازه متفاوت به‌طور ویژه تنظیم کرد.

سیستم استنتاج فازی براساس قواعد اگر آن‌گاه بنا نهاده شده است، به‌طوری‌که با استفاده از قواعد مزبور می‌توان ارتباط بین تعدادی متغیر ورودی و خروجی را به دست آورد. از این سیستم می‌توان به‌عنوان یک مدل پیش‌بینی برای شرایطی که داده‌های ورودی و یا خروجی دارای عدم قطعیت بالایی باشند، استفاده کرد. برای توسعه این سیستم از عملگرهای استلزام فازی و ترکیب روابط فازی استفاده می‌شود (دزفولی، ۱۳۸۴).

مدل‌سازی فازی با مراحل هم‌چون، تعیین سیستم استنتاج براساس داده‌ها، تعیین توابع عضویت، نوشتن قواعد استنتاج و ترکیب آن‌ها و به دست آوردن نتیجه و در صورت نیاز غیر فازی سازی روبه‌رو است. بعد از مدل‌سازی جهت تصمیم‌گیری می‌توان نتایج را سطح‌بندی کرد. اگر تصمیم‌گیری با یک سطح در یک بازه نشان داده شود، آن‌گاه $a_n \leq \mu_X(x) \leq b_n$ محدود n تصمیم هستند. این سطوح با توجه به مرزبندی‌های موردنیاز زبانی ایجاد می‌شوند. به‌طور مثال:

$$0.6 \leq \mu_c(x) \leq 1 \text{ : خوب,}$$

$$0.3 \leq \mu_c(x) \leq 0.6 \text{ : متوسط}$$

$$0.0 \leq \mu_c(x) \leq 0.3 \text{ : ضعیف.}$$

انتخاب مدل

همان‌طور که در بالا بیان شد روند آسیب کاپیتاسیون در سرریز پیچیده است و ارائه تمامی ابهامات موجود با دقت موردنیاز، فراتر از توان ریاضیات کلاسیک است. نسبی و تدریجی بودن شرایط ایجاد کاپیتاسیون، تعاریف نادقیق ارائه شده برای سطوح آسیب، دخالت عوامل متعدد در این روند مانند مقاومت و زبری سطح و تفاوت موردی آن‌ها به خاطر مصالح، ساختمان، جریان، عملکردها و شرایط نگهداری متفاوت تخمین σ_i و دیگر معیارها را مشکل می‌سازد. استحکام بیشتر مصالح مقاومت بیشتری در برابر آسیب و v بیشتر و σ کمتر را باعث می‌شوند.

پنج عامل در آسیب کاپیتاسیون دخیل هستند (به‌نام شاخص کاپیتاسیون، سرعت، محتوای هوا (هوای مخلوط)، مقاومت مصالح و زمان). اگر چه ترکیب آن‌ها و اثرات نسبی‌شان شناخته شده نیست اما روشن است که کاپیتاسیون در فشار کم اتفاق افتاده، با سرعت افزایش می‌یابد و با افزایش محتوای هوا کاهش می‌یابد (تقریباً تا

می‌یابد (فرسایش و اثرات محیطی)؛ و V و σ در هر جایی به دبی سرریز، که با زمان در یک سیل تغییر می‌کند، بستگی دارد. تجارب نشان داده که اگر $v \leq 5 m/s$ هیچ آسیبی ناشی از کاویتاسیون بر سطح بتن ایجاد نمی‌شود، و در $5 < v \leq 16 m/s$ ممکن است ایجاد شود یا نشود، و اگر $v > 16 \sim 18 m/s$ کاویتاسیون اتفاق می‌افتد و بیشترین خسارت هنگامی است که $v > 40 \sim 45 m/s$ (فالوی ۱۹۹۰). در نتیجه $v_0 = 17$ و $v_m = 42$ انتخاب شد.

$0.076 \leq \sigma_i \leq 1.2$ در نتیجه فرض شده است σ_i و σ_{ch} در بازه $1/2 - 1/8$ باشند (لی و هوپس، ۱۹۹۶). به دلیل این که هیچ‌گونه نتایجی برای اهمیت نسبی v و σ بر کاویتاسیون موجود نیست، وزن‌های قوانین انتخاب شده‌اند. مدل تخمین فازی، با $\sigma_i = 1.0$ و $\sigma_{ch} = 0.2$ مورد استفاده قرار گرفته و نتایج با آسیب‌های مشاهده شده مقایسه می‌شود.

برای ورودی‌های غیر فازی مسئله مطرح شده که شاخص کاویتاسیون و سرعت هستند، از سیستم استلزام فازی ممدانی استفاده می‌شود و جهت استلزام قواعد از مینیمم و انبوهش آن از ماکزیمم استفاده می‌شود (شکل ۲).

عملگرهای قواعد در اشتراک ضرب است و قانون استفاده شده در جهت ترکیب مقدم‌ها تنها از "و" یا همان اشتراک است. از دو قانون برای وارد کردن توابع عضویت سرعت و شاخص کاویتاسیون استفاده می‌شود. برای غیر فازی‌سازی از روش مرکز سطح استفاده می‌شود (شکل ۲). رویه ساخته شده توسط این مدل فازی در شکل ۳ دیده می‌شود. اگر به رویه و جدول سطح‌بندی آسیب توجه شود (جدول ۱) مفهوم دلخواه بودن بازه‌های سطح‌بندی مشخص‌تر خواهد شد. با تغییر تمام کنترل‌کننده‌های موجود در مدل می‌توان رویه شدت آسیب کاویتاسیون را چنان تغییر داد که با توجه به بازه‌های انتخاب شده آسیب واقعی در محدوده موردنظر به‌دست آورد و همان‌طور که ذکر شد بازه‌های سطح‌بندی تنها جهت ایجاد یک تقسیم‌بندی است که بتوان مقایسه را انجام داد.

جدول ۱- سطح بندی تابع عضویت آسیب

| سطح آسیب | بازه وابسته به تابع عضویت آسیب |
|----------|--------------------------------|
| عدم آسیب | $\mu_d(x) \leq 0.5$ |
| سبک | $0.5 < \mu_d(x) \leq 0.55$ |
| میانه | $0.55 < \mu_d(x) \leq 0.61$ |
| شدید | $0.61 < \mu_d(x) \leq 0.67$ |
| نهایی | $0.67 < \mu_d(x)$ |

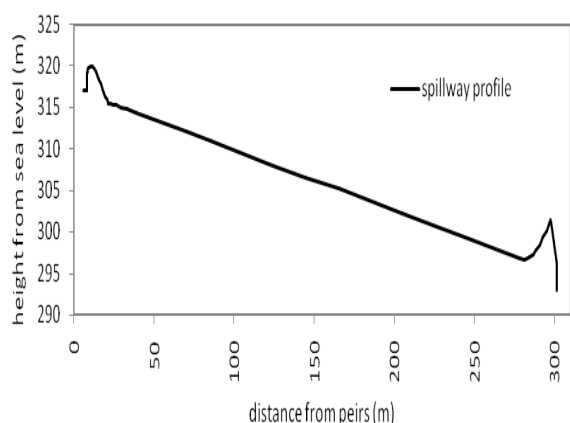
تابع عضویت هر عامل، می‌تواند تغییر آسیب از عدم آسیب به حد نهایی را، در صورتی که تنها آن عامل در نظر گرفته شود، تشریح کند. μ_σ ، تابع عضویت σ است که بین ۰ (عدم آسیب) و ۱ (آسیب نهایی) تغییر می‌کند. هرگاه $\sigma < \sigma_i$ باشد حباب‌های کاویتاسیون ظاهر می‌شود و اگر $\sigma < \sigma_{ch}$ شود آسیب نهایی اتفاق می‌افتد، که σ_{ch} شاخص نهایی کاویتاسیون است. یک تابع عضویت با تغییرات آرام برای σ چنین است (لی و هوپس، ۱۹۹۶):

$$\begin{cases} 0 & \sigma \leq \sigma_{ch} \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{\sigma_i - \sigma_{ch}} \left(\sigma - \frac{\sigma_i + \sigma_{ch}}{2} \right) & \sigma_{ch} < \sigma \leq \sigma_i \\ 1 & \sigma_i < \sigma \end{cases} \quad (2)$$

μ_v ، تابع عضویت v است که بین ۰ (عدم آسیب) و ۱ (آسیب نهایی) تغییر می‌کند. فرض کنید V_0 و V_m محدوده اندازه سرعت باشد (عدم وقوع کاویتاسیون در $V < V_0$ و بیشترین آسیب در $V > V_m$ ، برای زمان بهره‌برداری طولانی کافی). تحقیقات نشان می‌دهد، شدت آسیب کاویتاسیون متناسب است با V^6 (نپ و همکاران، ۱۹۷۰). یک تابع عضویت با تغییرات آرام برای v چنین می‌باشد (لی و هوپس، ۱۹۹۶):

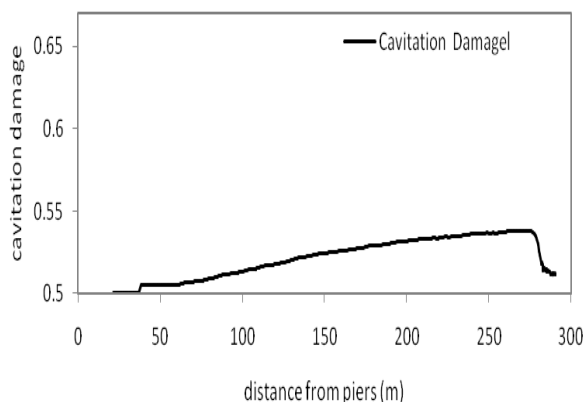
$$\begin{cases} 0 & v \leq V_0 \\ \frac{(v - V_0)^6}{(V_m - V_0)^6} & V_0 < v \leq V_m \\ 1 & v_m < v \end{cases} \quad (3)$$

مقادیر σ_{ch} ، V_0 و V_m به S و t بستگی دارد؛ از آنجایی که مصالح مقاوم‌تر و عملیات ساختمانی خوب می‌تواند σ کوچک‌تری و v بیشتری را قبل از آغاز کاویتاسیون یا قبل از این که کاویتاسیون به سطح نهایی برسد، تحمل کند؛ S بسته به روندهای فیزیکی و شیمیایی مختلف با t کاهش



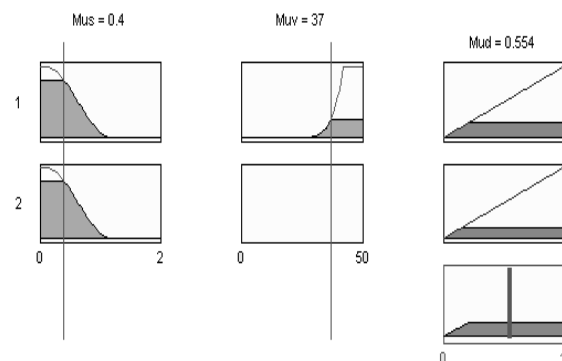
شکل ۴- پروفیل سرریز بالارود

داده‌های ورودی که به صورت غیر فازی هستند پس از ورود به سیستم فازی مدل و غیرفازی‌سازی تبدیل به داده‌های خروجی غیر فازی عددی می‌شوند (شکل ۵).

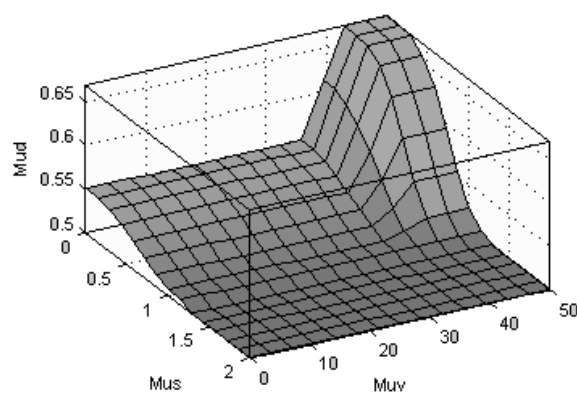


شکل ۵- آسیب غیرفازی مدل‌سازی شده در سرریز سد بالارود

پس از سطح‌بندی آسیب می‌توان آن‌ها را در کنترل آسیب دخالت داد. برای این کار از جدول ۱ و شکل ۵ استفاده شد. در روش کلاسیک برای پیش‌بینی آسیب از شاخص کاویتاسیون استفاده می‌شود. در این معیار شاخص کاویتاسیون در سرریز چنانچه کمتر از ۰/۲ باشد احتمال وقوع کاویتاسیون زیاد است و اگر بیشتر از ۰/۲ باشد این پدیده به وجود نمی‌آید (ویچر و هگر، ۱۳۸۲). تفاوت نحوه پیش‌بینی مدل فازی با روش کلاسیک را در شکل ۶ مشاهده می‌شود.



شکل ۲- ترکیب قوانین به روش استلزام مددانی



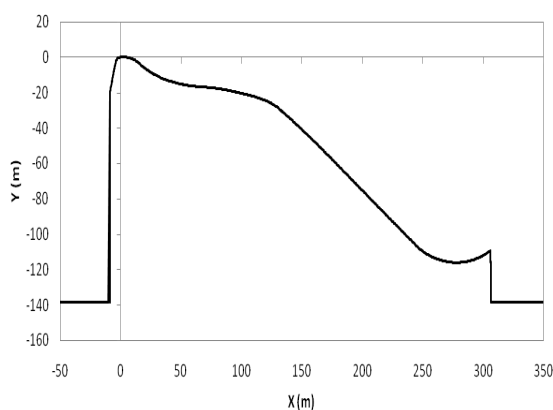
شکل ۳- رویه مدل فازی که در آن سطح آسیب با توجه به پارامترهای اندیس کاویتاسیون و سرعت جریان

قانون‌های مورد استفاده: اگر تابع عضویت شاخص کاویتاسیون و تابع عضویت سرعت برقرار باشند، آن‌گاه تابع عضویت آسیب برقرار است، با وزن ۰.۱. اگر تابع عضویت شاخص کاویتاسیون برقرار باشد، آن‌گاه تابع عضویت آسیب برقرار است، با وزن ۰/۱۹۹. وزن اخیر با وزن توابع متفاوت است و تنها جهت بیان قدرت قانون می‌باشد.

نتایج و بحث

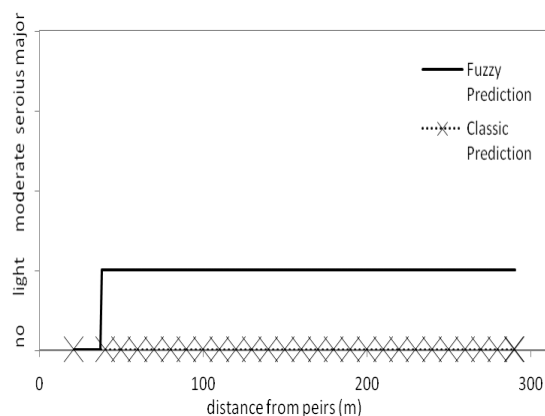
در این تحقیق برای مدل‌سازی فازی از پارامترهای جریان مدل شده بر روی دو سرریز استفاده شده است. اولین شبیه‌سازی آسیب کاویتاسیون مربوط به سرریز سد بالارود (شکل ۴) می‌باشد که از داده‌های مدل‌سازی عددی انجام شده بر روی آن (زندگی گوه‌ریزی و اژدری‌مقدم، ۱۳۸۹) سود می‌برد.

زیادی شده بودند. آسیب در گذرگاه ۲ بین ایستگاه‌های ۲+۳۵ و ۲+۵۵ شدید و در گذرگاه ۳ بین ۲+۱۰ تا ۲+۸۰ به صورت سوراخی به پهنای ۴ متر در بتن گزارش شد. در همان روز به علت تداوم بارندگی سنگین، گذرگاه ۱ نیز ناگزیر گشوده شد و بیشترین دبی ۱۱۶۰ متر مکعب بر ثانیه (میانگین ۷۰۰ مترمکعب در ثانیه در پنج روز) را عبور داد. آسیب در این گذرگاه بین ایستگاه ۲+۱۰ و ۲+۷۵ اتفاق افتاد (لی و هوپس، ۱۹۹۵). حفره‌ای به عرض ۱۸ متر یعنی تقریباً تمام عرض سرریز و طول ۱ متر به وجود آمده به طوری که علاوه بر بتن کف سرریز کلیه آرماتورهای کف نیز گسسته شد حتی سنگ کف زیر بتن سرریز حدود ۲۰ متر و عمق ۱/۵ متر تخریب شد که مطالعه روی مدل فیزیکی سرریز سد کارون با مقیاس ۱ به ۶۲/۵ در آزمایشگاه منابع آب وابسته به وزارت نیرو انجام گردیده است (بخش هیدرولیک، ۱۳۶۳). در طراحی نهایی جام پرتاب را در رقوم بالاتر از جام پرتاب قدیمی مستقر شد و به منظور حفاظت رویه سرریز در مقابل کاویتاسیون طرح هوادهی سرریز با ایجاد دو هواده صورت گرفت (زندى، ۱۳۸۴).



شکل ۷- پروفیل سرریز سد کارون ۱

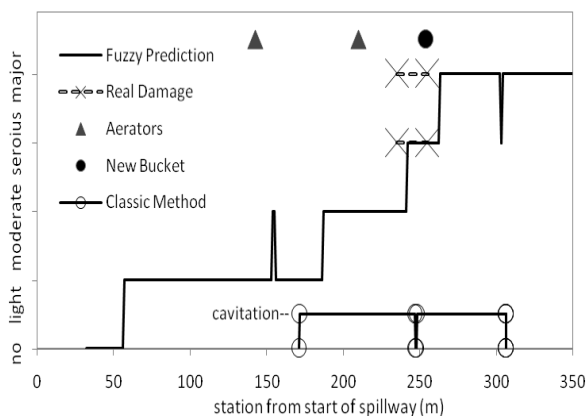
داده‌های ورودی این شبیه‌سازی که به صورت غیر فازی هستند پس از ورود به سیستم فازی مدل و غیر فازی‌سازی تبدیل به داده‌های خروجی غیر فازی عددی می‌شوند که در اینجا بین بازه ۰/۵ و ۰/۶۷ قرار دارند (شکل ۸). محدوده جواب بسته به تغییر پارامترهای مدل تفاوت پیدا می‌کند. محاسبات نیز بر اساس ایستگاه $(station = \sqrt{x^2 + y^2})$ ، در حالی که x و y فاصله از ابتدای سرریز (قبل از تاج سرریز) می‌باشد، انجام گرفته و نمودار شده است.



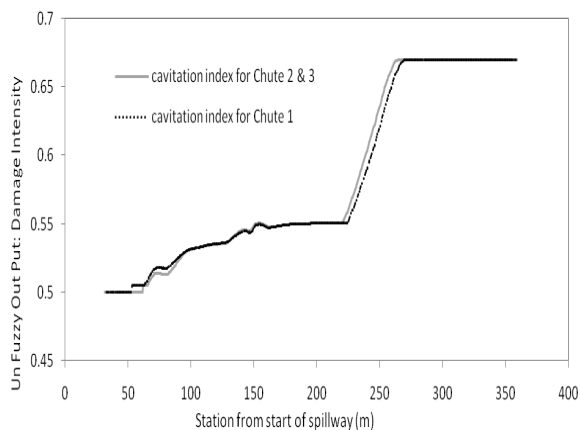
شکل ۶- پیش‌بینی آسیب در مدل فازی و روش کلاسیک در سرریز بالا رود

با توجه به روش کلاسیک این سرریز دچار هیچ‌گونه آسیبی نمی‌شود زیرا شاخص کاویتاسیون بالای حد بحرانی است. اما با توجه به مدل فازی چنانچه جریان با این سرعت و فشار محیط و در نتیجه شاخص کاویتاسیون ادامه پیدا کند، سطح آسیب سبک از ایستگاهی با فاصله حدود ۳۸ متر از مبدا، آغاز می‌شود که لزوماً به معنای خطر آسیب کاویتاسیون نیست. آغاز خطر آسیب کاویتاسیون را می‌توان در سطح آسیب میانه در نظر گرفت. پس می‌توان گفت که نتایج مدل فازی در عدم خطر آسیب میانه کاویتاسیون با نتایج روش کلاسیک در این نمونه برای عدم کاویتاسیون یکسان است. آسیب سبک در پژوهش‌های لی و هوپسبر روی دیگر نمونه‌ها نیز به معنای خطر آسیب کاویتاسیون نیست بلکه آغاز خلأزایی و حباب‌زایی است که دارای آسیب چندان شدید و قابل ملاحظه نیست. مفهوم آسیب و صدمه با خود پدیده کاویتاسیون در پژوهش فازی تفاوت یافته است.

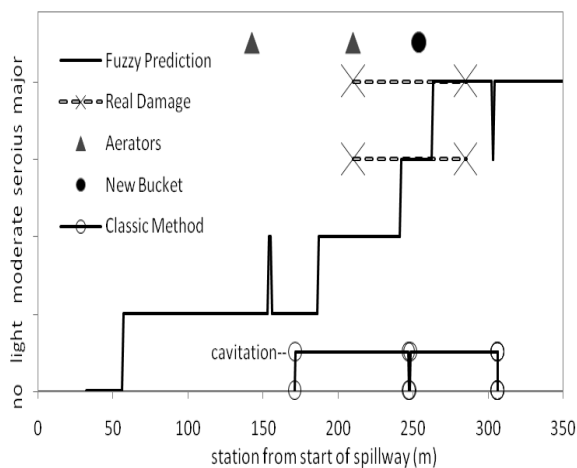
برای تست و مقایسه دومین شبیه‌سازی مربوط به سرریز سد کارون ۱ است (زندى گوهرریزی، ۱۳۸۹). پروفیل این سرریز در شکل ۷ با مبدا تاج سرریز آمده است. اولین آنگیری مخزن سد در تاریخ ۲۱ آذرماه سال ۱۳۵۵ انجام شد و مهم‌ترین آسیب کاویتاسیون در سال‌های ۱۳۵۶ و ۱۳۵۸ به وقوع پیوست، که در آن کاویتاسیون از پوشش بتنی گذشته و به درون سنگ پی راه یافته بود. (زندى، ۱۳۸۴). در سوم دی ۱۳۵۶ کارکنان اغتشاش‌های نامتعارف را در جریان عبوری از گذرگاه‌ها گزارش کردند که در بررسی‌های بعد از آن مشخص شد این شوت‌ها دچار آسیب



شکل ۱۰- پیش‌بینی فازی آسیب، آسیب کلاسیک، مشاهدات واقعی و اصلاحات طرح پس از آسیب در گذرگاه ۲



شکل ۸- آسیب غیر فازی مدل‌سازی آن بر اساس تابع عضویت آسیب



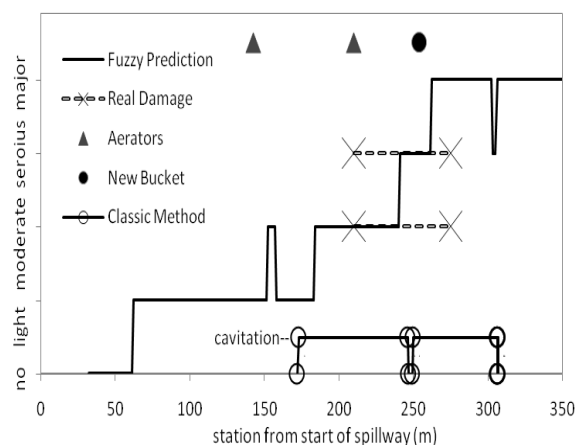
شکل ۱۱- پیش‌بینی فازی آسیب، آسیب کلاسیک، مشاهدات واقعی و اصلاحات طرح پس از آسیب در گذرگاه ۳

برای گذرگاه ۱، نتایج شدت آسیب پیش‌بینی شده و محل آن، در مقایسه با آسیب واقعی در نمودار قابل قبول می‌باشد.

مدل برای گذرگاه ۲ و ۳ تخمین‌ها پیش‌بینی ضعیف‌تری نشان می‌دهد هرچند آن‌ها نیز قابل قبول هستند. علاوه بر مکان‌یابی آسیب کاویتاسیون، نکته دیگر مدل‌سازی فازی آسیب قدرت سطح‌بندی آسیب و همراه بودن با شدت آسیب است که چنانچه به روش کلاسیک دقت شود در آن با توجه به اندیس بحرانی تنها وقوع و عدم وقوع کاویتاسیون پیش‌بینی می‌شود.

در جدول ۲ نتایج تحقیق قبلی انجام گرفته و آسیب واقعی گزارش شده (لی و هوپس، ۱۹۹۵) با پیش‌بینی‌های مدل

با توجه به سطح‌بندی جدول ۱ و استفاده از نتایج شکل ۸، پیش‌بینی آسیب به صورت فازی بدست آمده و در مقایسه با آسیب گزارش شده (لی و هوپس، ۱۹۹۵) و آسیب پیش‌بینی شده گذشته، در شکل‌های ۹، ۱۰، ۱۱ و همچنین در جدول ۲ ارائه شده است. در شکل‌ها آسیب کلاسیک کاویتاسیون که با توجه به اندیس بحرانی کاویتاسیون ($\sigma_{cr} = 0.2$) سنجیده می‌شود و همچنین مکان‌های اصلاحات در طرح جدید سرریز نیز برای مقایسه و بررسی دیده می‌شود.



شکل ۹- پیش‌بینی فازی آسیب، آسیب کلاسیک، مشاهدات واقعی و اصلاحات طرح پس از آسیب در گذرگاه ۱

همان‌طور که مشاهده می‌شود مدل فازی تخمین در پژوهش لی و هوپس (۱۹۹۵) قادر به پیش‌بینی سطح و محل آسیب در سرریز کارون ۱ نیست اما مدل حاضر علاوه بر تعیین شدت آسیب در بازه گزارش شده شدت آسیب بالاتر از آن و احتمال آغاز کاویتاسیون سبک در پایین‌تر از آن را نیز پیش‌بینی می‌کند.

فازی تحقیق، بر روی سه گذرگاه، برای مقایسه بهتر آورده شده‌اند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، پیش‌بینی‌های مدل فازی تخمین آسیب کل ایستگاه‌ها را در بر می‌گیرد و برای مقایسه می‌توان، بازه مورد مطالعه دیگر تحقیقات گزارش شده را، در مدل مورد مشاهده و بررسی قرار داد.

جدول ۲- آسیب پیش‌بینی شده مدل پژوهش حاضر، آسیب پیش‌بینی شده توسط مدل گذشته و آسیب گزارش شده کاویتاسیون

| سرریز سد کارون ۱ | ایستگاه آسیب واقعی (متر) | شدت آسیب واقعی | نتیجه لی و هوپس برای ایستگاه (متر) | نتیجه لی و هوپس برای شدت | آسیب پیش‌بینی شده | |
|------------------|--------------------------|----------------|------------------------------------|--------------------------|-------------------|----------|
| | | | | | ایستگاه | شدت آسیب |
| گذرگاه ۱ | 2+10~2+75 | میانه یا شدید | - | سبک | 0+62~1+51 | سبک |
| | | | | | 1+58~1+83 | |
| | | | | | 1+52~157 | میانه |
| | | | | | 1+84~2+40 | |
| | | | | | 3+03~3+05 | شدید |
| | | | | | 2+41~2+61 | |
| | | | | | 2+62~3+02 | نهایی |
| | | | | | 3+05~End | |
| | | | | | 0+57~1+53 | سبک |
| | | | | | 1+56~1+86 | |
| گذرگاه ۲ | 2+35~2+55 | شدید یا نهایی | - | سبک | 1+54~1+55 | میانه |
| | | | | | 1+87~2+41 | |
| | | | | | 2+42~2+62 | شدید |
| | | | | | 3+03~3+03 | |
| | | | | | 2+63~3+02 | نهایی |
| | | | | | 3+04~End | |
| | | | | | 0+57~1+53 | سبک |
| | | | | | 1+56~1+86 | |
| | | | | | 1+54~1+55 | میانه |
| | | | | | 1+87~2+41 | |
| گذرگاه ۳ | 2+10~2+80 | شدید یا نهایی | - | سبک | 2+42~2+62 | شدید |
| | | | | | 3+03~3+03 | |
| | | | | | 2+63~3+02 | نهایی |
| | | | | | 3+04~End | |
| | | | | | 0+57~1+53 | سبک |
| | | | | | 1+56~1+86 | |

فازی را دارا نیستند، کمبودهایی را در پیش‌بینی محل و شدت آسیب و همراهی با گزارش‌ها و داده‌های واقعی نشان می‌دهد. آسیب‌های گزارش شده نیز تنها مفهوم‌های زبانی بوده‌اند و روش کلاسیک قادر به شدت‌بندی و همراه شدن با

نتیجه‌گیری

دخیل بودن عوامل متعدد آسیب کاویتاسیون را فازی معرفی می‌کند. روش کلاسیک اندیس بحرانی کاویتاسیون و حتی دیگر روش‌های ریاضی که قابلیت تغییر در شرایط مبهم و

- ۴- زندگی گوه‌ریزی ف. و اژدری مقدم م. ۱۳۸۹. بررسی تغییرات شاخص کاویتاسیون در سرریز اوجی با استفاده از مدل CFX. پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران. دانشگاه فردوسی. مشهد. ایران.
- ۵- زندگی گوه‌ریزی ف. ۱۳۸۹. بررسی آسیب کاویتاسیون در سرریز صاف با استفاده از منطق فازی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران- آب، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان. ایران.
- ۶- قدسیان م. ۱۳۸۲. هیدرولیک سد. مترجم: قدسیان م. دانشگاه تربیت مدرس. تهران. ایران.
- ۷- زندگی ی. ۱۳۸۴. کاویتاسیون در سرریزها. دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز. تبریز. ایران.
- ۸- بخش هیدرولیک. مؤسسه بررسی‌ها و آزمایشگاه‌های منابع آب. ۱۳۶۳. گزارش مدل هیدرولیکی سرریز شهید عباس‌پور (کارون ۱). نشریه شماره ۶۲. وزارت نیرو.

- 9- Falvey H.T. 1990. Cavitation in Chutes and Spillways. Engineering Monograph 42. US Bureau of Reclamation. Denver. Colorado.
- 10- Lee W. and Hoops J.A. 1996. Prediction of Cavitation Damage for Spillways. ASCE Journal of Hydraulic Engineering. ASCE. 122(9): 481-488.
- 11- Lee W. and Hoops J. A. 1995. Testing Model for Predicting Spillway Cavitation Damage. Waterpower 95 Conf. supplied by British Library-The world's knowledge. :2291- 2299.
- 12- Knapp R.T. and Daily J.W. and Hammitt F.G. 1970. Cavitation. Mc-Graw-Hill Book Co. Inc. New York. N.Y.

مفاهیم زبانی گزارش نیز نیست. ارائه روند جدید بررسی فازی توسط محققین گذشته هرچند پیش‌بینی آسیب چند نمونه سرریز را با موفقیت انجام داده است اما در سرریز سد کارون ۱ شکست خورده است. مدل فازی در این تحقیق شدت و سطوح آسیب را برای بازه مورد تحقیق در سرریز و تمام طول پروفیل تخمین می‌زند و همخوانی نسبتاً قابل قبولی دارد با توجه به اینکه در گزارش شدت‌ها به صورت دو سطحی مثلاً عبارت شدید یا نهایی، آورده شده است. سطوح آسیب با توجه به نوع نگاه به آسیب کاویتاسیون و مفهوم زبانی هر محقق می‌تواند متفاوت باشد اما این مدل قابلیت همراهی و سازگاری با انواع سطح‌بندی زبانی را دارا است و بسته به خواسته مسئول و مدیر و یا کنترل‌کننده آسیب است و تغییرات در مدل با انواع قسمت‌های تنظیمی در مدل قابل تغییر است.

منابع

- ۱- وانگ ل. ۱۳۷۸. سیستم‌های فازی و کنترل فازی. دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی. تهران. ایران.
- ۲- ماشین‌چی م. ۱۳۷۹. مجموعه‌های مشکک، دانشگاه شهید باهنر. کرمان. ایران.
- ۳- کوزه‌پزان دزفولی ا. ۱۳۸۴. اصول تئوری مجموعه‌های فازی و کاربردهای آن‌ها در مدلسازی مسایل مهندسی آب. جهاد دانشگاهی. واحد صنعتی امیرکبیر. تهران. ایران.