



بررسی میدان جریان در سدهای لاستیکی تحت اثر اندرکنش سیال-سازه

نجمه چراغی شیرازی، عبدالرضا کبیری سامانی*، بیژن برومند

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۱ آذر ۱۳۹۳
بازنگری: ۱۹ آبان ۱۳۹۴
پذیرش: ۱۹ مرداد ۱۳۹۵
ارائه آنلاین: ۱ آذر ۱۳۹۵

کلمات کلیدی:

سدهای لاستیکی
اندرکنش سیال و سازه
میدان جریان
پروفیل سرعت
فشار

چکیده: سدهای لاستیکی، سازه‌های انعطاف‌پذیر استوانه‌ای هستند که به فنداسیون صلب متصل می‌شوند. سدهای لاستیکی تحت فشار داخلی، ناشی از آب یا هوا، در حالت برافراشته مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. مسأله‌ی تغییر شکل‌های بزرگ ناشی از فشارهای داخلی و خارجی باعث غیرخطی شدن معادلات حاکم بر رفتار سد لاستیکی می‌شود. حل رابطه‌ی دیفرانسیلی تغییر شکل حاکم بر این نوع سازه از پیچیدگی‌های خاصی برخوردار است. بر این اساس در مطالعه‌ی حاضر به بررسی رفتار سه‌بعدی سدهای لاستیکی با اعمال شرایط مرزی برای سازه و سیال به کمک نرم‌افزار ANSYS پرداخته می‌شود. در این نرم‌افزار با حل هم‌زمان مسأله‌ی سیال و سازه، سطح آزاد آب در جریان عبوری از روی سد و تغییر شکل سد با در نظر گرفتن اندرکنش سیال و سازه به دست می‌آید. نظر به انعطاف‌پذیر بودن سازه، از حل تغییر شکل‌های بزرگ بهره‌گیری می‌شود. با حل هم‌زمان معادلات اندرکنش سیال-سازه مشخصه‌های میدان جریان شامل منحنی‌های خطوط جریان و پروفیل‌های سرعت و فشار استخراج می‌شود. در ادامه نتایج مربوط به میدان جریان با مشخصه‌های هیدرودینامیکی جریان در سرریزهای تاج دایره‌ای حاصل مطالعات آزمایشگاهی محققین پیشین مقایسه می‌شود. بررسی نتایج نشان می‌دهد که رفتار جریان در روی سدهای لاستیکی در حالت تعادل با وجود تغییر شکل‌های نسبتاً بزرگ مشابه سرریزهای تاج دایره‌ای است.

۱- مقدمه

آب در رودخانه‌ها جهت کشتی‌رانی از سدهای لاستیکی استفاده می‌شود [۳]. استفاده از سد لاستیکی در سال ۱۹۴۷ توسط یک مهندس فرانسوی به نام مسناجر^۲ مطرح گردید. اما فکر ساخت سد از مواد مصنوعی از جمله مواد لاستیکی از سال ۱۹۵۰ برای اولین بار توسط نورمن ایمبرسون^۴، رئیس دپارتمان مهندسی آب و نیرو در شهر لس‌آنجلس مطرح و چندی بعد در سال ۱۹۵۸ اولین سد لاستیکی در این شهر توسط کمپانی لاستیک سازی بریجستون طرح و ارائه گردید [۳]. در طراحی بدنه سد لاستیکی تنش‌ها یا نیروهای موثر بر بدنه از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار است. نیروهای وارد بر سدهای لاستیکی شامل نیروهای استاتیکی و دینامیکی است. برای اولین بار انوار^۵ (۱۹۶۷) رفتار دوبعدی سدهای لاستیکی را مورد مطالعه قرار داد [۴]. وی با چشم‌پوشی از وزن سد و در نظر گرفتن فشار درونی به صورت نسبتی از هد مخزن، قسمتی از شکل هیدرواستاتیکی مقطع سد (پر شده از آب یا هوا) به فرم انتگرال بیضوی و قسمت دیگر به فرم معادله‌ی یک دایره را با استفاده از تعادل نیروها به دست آورد. وی ضمن انجام مطالعات آزمایشگاهی ضریب دبی را برای چهار مدل به صورت تجربی

سرریز تاج دایره‌ای در مقایسه با سرریز لبه تیز دارای الگوی روگذری پایدارتر و در مقایسه با سرریز اوجی دارای طراحی ساده‌تری است. در هد بالادست ثابت سرریز با شکل خطوط جریانی در مقایسه با سایر انواع سرریزها، دبی بیشتری را از خود عبور می‌دهد [۱]. استفاده از موادی همچون ژئوستنتیک‌ها^۱، ژئوتکستایل‌ها^۲ و لاستیک در انعطاف‌پذیری سرریزهای تاج دایره‌ای نقش به‌سزایی را ایفا می‌کنند که تحلیل سرریز ساخته شده از هر کدام از این مواد روش‌های تحلیلی خاص خود را نیازمند است [۲]. نمونه‌ی بارز سرریزهای تاج دایره‌ای سدهای لاستیکی هستند. انعطاف‌پذیری قابل توجه مصالح در مقابل عوامل خارجی، سازگاری با محیط، سادگی طراحی، کوتاه بودن مدت ساخت، ایمنی و پایداری مناسب نسبت به سازه‌های صلب، سادگی و سهولت بهره‌برداری و در نهایت کاهش هزینه‌های اجرایی موجب شده که سدهای لاستیکی در طرح‌های آبی کوچک و بزرگ مورد استفاده قرار گیرند. در حال حاضر در تعداد زیادی از طرح‌های آبی به‌منظور انحراف آب رودخانه، جلوگیری از تداخل آب شور و شیرین، کنترل جذر و مد در سواحل، افزایش حجم مخازن سدهای ساخته شده و افزایش ارتفاع سطح

تحت شرایط مختلف فشار داخلی و پارامترهای سیال بالادست و پایین دست به صورت دو بعدی توسط قوانلو و دانشمند^۹ در سال ۲۰۱۰ مورد بررسی قرار گرفت [۱۵]. ایشان یک روش تحلیلی برای آنالیز غیر خطی اندرکنش استاتیکی سیال و غشاء استوانه‌ای، ارائه کردند. مقایسه‌ی نتایج با نتایج آزمایشگاهی و تئوری محققین پیشین صحت روش جدید ایشان در پیش‌بینی اندرکنش غیرخطی استاتیکی را تایید می‌کرد. گنزalez و دیاز^{۱۰} (۲۰۱۵) به بررسی اثر جانمایی سد لاستیکی بر روی سرریز اوجی پرداختند. ایشان نتایج آزمایشگاهی را با نتایج عددی حاصل از تحلیل سازه به روش CFD^{۱۱} مقایسه کردند [۱۶].

با دقت در تاریخچه مطالعاتی می‌توان دریافت که در مطالعات پیشین با فرض طول بی‌نهایت سد از اثر تکیه‌گاه‌ها و جریان‌های عرضی در تغییرشکل نهایی سد چشم‌پوشی شده است. لذا در تحقیق حاضر به بررسی رفتار سه بعدی سد با اعمال شرایط مرزی برای سازه و سیال پرداخته می‌شود. شبیه‌سازی سد و سیال در نرم‌افزار ANSYS صورت می‌گیرد. این نرم‌افزار با حل هم‌زمان CFX و Transient Structural در محیط Workbench به حل سازه و سیال می‌پردازد. بنابراین سطح آزاد آب در جریان عبوری از روی سد و شکل نهایی سد با در نظر گرفتن اندرکنش سیال و سازه به دست می‌آید. سپس پارامترهای تاثیرگذار مشخص و اثر هر یک نشان داده می‌شود. بر پایه‌ی نتایج به دست آمده از مطالعات پیشین، در این تحقیق به بررسی ویژگی‌های تغییرشکل و هیدرولیک جریان در سدهای لاستیکی پرداخته می‌شود. در ادامه مشخصات میدان جریان بر روی سدهای لاستیکی شامل پروفیل‌های سرعت و فشار بررسی و با نتایج مربوط به سرریزهای تاج‌دایره‌ای مقایسه می‌شوند.

۲- مدل‌سازی عددی

نرم‌افزار ANSYS CFX بر اساس روش حجم محدود و بر اساس گسسته‌سازی دامنه‌ی مکانی به وسیله‌ی شبکه عمل می‌کند. این شبکه برای ساخت حجم‌های محدود، جهت حفظ کمیت‌های مربوطه مانند جرم، مومنتوم و انرژی به کار می‌رود. تمام متغیرهای حل و خواص سیال در رئوس شبکه ذخیره می‌شوند. حجم کنترل اطراف هر گره‌ی شبکه با استفاده از متوسط رئوس ساخته می‌شود (ANSYS CFX theory guide release (12.1) [۱۷]. معادلات بقای جرم (پیوستگی) و اندازه حرکت در مختصات دکارتی به روش حجم محدود روی شبکه‌ی محاسباتی گسسته‌سازی شده و توسط نرم‌افزار ANSYS CFX در کل ناحیه حل شده است. این نرم‌افزار با استفاده از شبکه با چیدمان هم مرکز به حل معادلات می‌پردازد. روش گسسته‌سازی برای ترم‌های زمانی، اویلری پس‌رو مرتبه‌ی دوم است که روشی کاملاً ضمنی با پایداری عددی است. برای محاسبه‌ی مقادیر مشتق‌ها در تمام ترم‌های پخش و گرادیان فشار تابع شکل استاندارد به کار می‌رود.

9 Ghavanloo & Daneshmand

10 Diaz & Gonzalez

11 computational fluid dynamics

به دست آورد. هریسون^۱ در سال‌های ۱۹۷۰ و ۱۹۷۱ با نظر به این که مصالح سازنده سد لاستیک بوده و از رابطه تنش- کرنش خطی پیروی می‌کنند [۵] و [۶]، سدهای لاستیکی آبی و بادی دو ردیفه را تحت فشار هیدرواستاتیک ناشی از هد آب بالادست و پایین دست بررسی کرد. او دریافت با افزایش هد آب بالادست نیروی کششی به وجود آمده در غشاء در سد بادی در مقایسه با سد آبی بیشتر کاهش می‌یابد. در سال ۱۹۷۳ باینی^۲ سدهای لاستیکی آبی را در حالی که سطح آب بالادست منطبق بر تاج سد است، مورد بررسی قرار داد [۷]. او تئوری انور را به دلیل مسئله‌ی نامحدود بودن محیط منحنی و عرض در کف، رضایت بخش ندانست. الوان^۳ در سال ۱۹۷۹ با استفاده از نتایج آزمایشگاهی دریافت که مقدار ضریب دبی جریان در سدهای لاستیکی آبی بین ۰/۳ تا ۰/۴ است [۸]. همچنین وی به این نتیجه رسید که سد لاستیکی در مواقع سرریزی، رفتاری شبیه به سرریز مستطیلی دارد. الشامی^۴ (۱۹۸۳) روابطی را برای تعیین ضریب دبی بر پایه نتایج آزمایشگاهی ارائه نمود [۹]. وی دریافت که ضریب دبی می‌تواند مقداری بین ۰/۳۵ تا ۰/۴ اختیار نماید. داکشی‌نامورتی^۵ و همکاران در سال ۱۹۹۵ ارتعاش سه بعدی سدهای دو ردیفه را با ثابت نگه داشتن آب پشت سد مورد بررسی قرار دادند [۱۰]. سد به صورت یک پوسته با فشار هوای داخلی مدل شده و روش اجزا محدود برای حل سازه و سطح آب خارجی مورد استفاده قرار گرفت. عبدالصابر^۶ (۱۹۹۷) رابطه تجربی را برای برقراری ارتباط بین دبی جریان و نسبت هد آب بالادست به ارتفاع سد لاستیکی ارائه نمود [۱۱]. لوری و لیاپیس^۷ در سال ۱۹۹۹ با توجه به پاسخ دینامیکی بهتر سازه در زمان نداشتن روگذری، سد لاستیکی بادی را در حالی که آب پشت سد به تاج سد محدود شده باشد [۱۲]، مورد مطالعه قرار دادند. مسئله‌ی سطح آزاد آب با استفاده از فرمولاسیون اویلری-لاگرانژی غیر خطی کامل بیان و سد با استفاده از المان‌های پوسته در نرم‌افزار ABAQUS مدل شد. الهمتی و همکاران^۸ (۲۰۰۵a) با استفاده از مدل فیزیکی سد لاستیکی بادی دریافتند که با افزایش هد آب بالادست، به‌ازای مقدار ثابت فشار داخلی مقادیر ضریب دبی به طور محسوسی افزایش می‌یابد و مقطع عرضی سد به طرف پایین دست تمایل پیدا می‌کند [۱۳]. الهمتی و همکاران (۲۰۰۵b) بر مبنای مطالعات انجام شده توسط هریسون به آنالیز سد لاستیکی آبی و بادی دوردیفه بدون روگذری پرداختند [۱۴]. آن‌ها مدل آزمایشگاهی سد لاستیکی را تهیه و نتایج حاصل از آن را در حالت هیدرواستاتیک با نتایج تئوری مقایسه کردند و دریافتند که در فشارهای داخلی بالا (ناشی از آب یا هوا) نتایج تئوری و آزمایشگاهی مطابقت بیشتری دارند. رفتار استاتیکی غشاء استوانه‌ای به صورت تئوری

1 Harrison

2 Binnie

3 Alwan

4 Al-Shami

5 Dakshina Moorthy

6 Abd-Alsaber

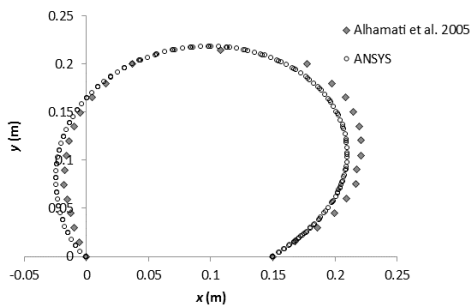
7 Lowery & Liapis

8 Alhamati et al.

است. آن چه در تعیین زمان حل نقش اساسی دارد، پروفیل سرعت روی تاج و یا به عبارتی ثابت شدن سطح آزاد آب است. بر اساس نتایج به دست آمده در ارتباط با پروفیل های سرعت و سطح آزاد آب و نیز شکل تعادل یافته ی مقطع سد زمان بهینه ی حل برابر با ۹ ثانیه تعیین گردید و با انتخاب گام زمانی ۰/۰۴ ثانیه همگرایی جواب حاصل می شود.

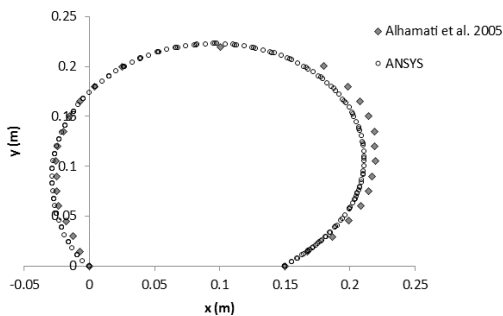
۳- صحت سنجی نتایج

به منظور مقایسه ی نتایج تغییر شکل حاصل از حل توسط نرم افزار ANSYS با نتایج آزمایشگاهی، شکل های ۱ و ۲ ارائه شده است. در تعریف این مدل از خصوصیات فیزیکی شرح داده شده در قسمت قبل استفاده شده است.



شکل ۱: سطح مقطع سد، دبی جریان ۵/۲۵ لیتر بر ثانیه و فشار داخلی برابر با ۴ کیلوپاسکال

Fig. 1. Cross section of dam for flow discharge of 5.25 lit/s and internal pressure of 4 kPa



شکل ۲: شکل سطح مقطع سد، دبی جریان ۵/۲۵ لیتر بر ثانیه و فشار داخلی برابر با ۵ کیلوپاسکال

Fig. 2. Cross section of dam for flow discharge of 5.25 lit/s and internal pressure of 5 kPa

بر اساس نتایج ارائه شده در شکل های ۱ و ۲ حداکثر اختلاف بین نتایج حاصل از حل عددی و نتایج آزمایشگاهی برای ارتفاع نهایی سد در حدود ۱/۹۷ و ۳/۲۳ درصد است.

۴- تحلیل نتایج

با توجه به پارامترهای مؤثر بر تغییر شکل سدهای لاستیکی در حالت

معیار همگرایی معادلات بر اساس باقیمانده RMS کوچکتر یا مساوی ۵-۱۰ تعریف گردید. سازه ی مورد نظر در نرم افزار به صورت Transient Structure مدل می شود. در شبیه سازی با استفاده از ANSYS Workbench برای سازه، بر مبنای روش اجزای محدود، انواع المان های ابتدایی و به صورت پیش فرض، المان منشوری ۱۰ گره ای چهار وجهی و المان ۲۰ گره ای شش وجهی برای مدل های با هندسه ی جامد و برای مدل های سطوح بسته از المان های پوسته ی ۴ گره ای استفاده می شود. این انتخاب بر اساس دقت و کارایی لازم صورت می گیرد. در مدل سازی سه بعدی از مدل آزمایشگاهی مورد استفاده در مطالعات [۱۳ و ۱۲] شامل کانالی با طول ۲ متر، ارتفاع ۰/۴۵ متر و عرض ۰/۹ متر برای شبیه سازی جریان استفاده شده است. برای تحلیل تغییر شکل های لاستیک به عنوان ماده ای الاستیک نیاز به حل همزمان ANSYS و CFX است. مدل از یک حجم برای معرفی به نرم افزار CFX و یک پوسته با ضخامت نازک برای نرم افزار ANSYS به عنوان سد لاستیکی تشکیل شده است.

به منظور بررسی تغییر شکل ها در سد لاستیکی از مدل پایه ای با طول محیط سطح مقطع ۰/۵۵ متر، عرض در کف ۰/۱۵ متر، ضخامت ۱ میلی متر استفاده شده است. فشار داخلی ۳ کیلو پاسکال در نظر گرفته شد. مدل الاستیسیته ی این سد ۴/۶۳۳ مگاپاسکال لحاظ گردید [۱۳-۱۵]. برای شبکه بندی مدل در نواحی با گرادیان های شدید یعنی سطح مشترک سازه و سیال، در سطح آزاد آب و در پایین دست (محل جدایش جریان)، شبکه ریزتر اختیار گردید. به دلیل انعطاف پذیر بودن سازه و تغییر شکل های زیاد آن خصوصاً در صورت کم بودن فشار داخلی و زیاد بودن هد جریان بالادست، ریز کردن شبکه بندی در اطراف سطح مشترک سازه و سیال از اهمیت بالایی برخوردار است. آنالیز حساسیت در مورد تعداد المان های شبکه انجام شد. برای این منظور چند شبکه مختلف با تعداد المان های متفاوت مطالعه شد تا بتوان به دقت قابل قبول دست یافت. با بررسی اثر تعداد المان ها بر دقت نتایج در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی مربوط به پروفیل های سرعت روی تاج و تغییر شکل لاستیک، در نهایت شبکه با تعداد ۷ میلیون المان انتخاب گردید. لازم به ذکر است که ریزتر کردن شبکه حل همزمان سازه و سیال را با مشکل مواجه می کرد.

مرزهای سیال در نرم افزار ANSYS-CFX در واقع سطوح خارجی و داخلی از مدل هندسی است که سیال و کمیت های قابل حمل توسط آن مانند جرم، مومنتوم و انرژی به ناحیه ی حل وارد و یا از آن خارج می شود. در تحقیق حاضر از شرط سطح آب بالادست در ورودی و بازشدگی در پایین دست استفاده شده است. در واقع سازه ی کنترل کننده ای در پایین دست سد وجود ندارد و شرایطی مانند پس زدگی جریان را به وجود نمی آورد. لذا بررسی اثر شرط مرزی پایین دست بر شکل نهایی سازه می تواند موضوع پژوهش های آتی قرار گیرد. برای تعیین زمان کافی برای حل از مقایسه ی شکل تعادل یافته ی مقطع سد و پروفیل سرعت روی تاج سد استفاده شده

1 Root Mean Square

دسته بندی شده در جدول ۱، بررسی شده است. شکل (۴-الف) اثر عرض در کف سد روی شکل تعادل یافته‌ی سد را نشان می‌دهد. با افزایش عرض در کف، ارتفاع سازه کاهش می‌یابد، روگذری سازه افزایش یافته و سد حالت پایدارتری به خود می‌گیرد. شکل (۴-ب) اثر مدول الاستیسیته را بر تغییر شکل نهایی سازه نشان می‌دهد. با افزایش مدول الاستیسیته، تغییر شکل‌ها کاهش می‌یابد، سازه به سمت بالادست متمایل شده و ارتفاع سد کم می‌شود. بنابراین رفتار سد به رفتار سرریز تاج دایره‌ای نزدیک‌تر خواهد شد. شکل (۴-ج) نشان دهنده‌ی اثر محیط بدنه‌ی سازه بر تغییر شکل نهایی سازه است. با کاهش محیط سد، ارتفاع سد و تغییر شکل‌ها کاهش می‌یابد. شکل (۴-د) اثر فشار داخلی سازه بر تغییر شکل نهایی را نمایش می‌دهد. با کاهش فشار، بخش بالادستی بدنه مقدار تغییر شکل بیش‌تری دارد و فرورفتگی در بدنه مشاهده می‌شود. با افزایش فشار داخلی، سازه شکل استوانه‌ای اولیه‌ی خود را بیشتر حفظ می‌کند، در قسمت بالادست خود کشیده‌تر می‌شود و ارتفاع سازه بیش‌تر می‌شود.

شکل (۴-ه) نشان دهنده‌ی اثر دبی جریان عبوری (هد جریان بالادست) بر تغییر شکل نهایی سازه است. در این سازه‌ها، با افزایش دبی عبوری به دلیل شرایط تکیه‌گاهی و سه‌بعدی شدن جریان، فرورفتگی در بدنه در مقطع وسط سد بیش‌تر است. در این حالت اثر مثلی شدن در پلان و ارتفاع سد در مقطع وسط افزایش می‌یابد. با نزدیک شدن به مقطع وسط سد، شکل سطح مقطع سد از حالت دایره‌ای اولیه خود بیش‌تر خارج می‌شود و جدایش جریان

روگذری، در ادامه به بررسی پروفیل‌های سطح آب، سرعت و فشار در مقاطع مختلف و روی تاج سد پرداخته می‌شود. وجود جابه‌جایی‌های بیش از اندازه زیاد سازه، بزرگ بودن اندازه‌ی شبکه‌ی سیال در مرز میان سازه و سیال و یا تخصیص شکل خاصی از المان به شبکه‌ی سازه و سیال باعث اختلال در حل اندرکنش میان سازه و سیال شده و رد و بدل کردن اطلاعات میان سازه و سیال را با مشکل روبه‌رو می‌کند. این موضوع نهایتاً جابه‌جایی‌های سازگار میان شبکه‌های سازه و سیال را مختل می‌کند. میزان انعطاف‌پذیری سازه بر حساسیت این بحث می‌افزاید. شکل ۳ تغییر شکل نهایی سازه را به صورت سه‌بعدی نشان می‌دهد. چنان‌که ملاحظه می‌شود، بیش‌ترین جابه‌جایی متعلق به تاج سد در مقطع وسط سد است. این موضوع به دلیل نوع اتصال سد به دیوارهای کانال و به‌وجود آمدن جریان‌های عرضی است که تمرکز جریان را در وسط سد به‌وجود می‌آورد. ارتفاع سد در مقطع سد زیاد شده به دنبال آن فشردگی جریان بیش‌تر شده و ضریب دبی جریان افزایش می‌یابد. این شکل ضمناً گویای اثر مثلی شدن سد نیز هست. بر طبق آنچه پیش‌تر بیان شد، با زیاد کردن عرض کانال رفتار این سد دو بعدی شده و ارتفاع در مقطع وسط نسبت به طرفین کمتر می‌شود. که این مورد باعث مثلی شدن سد در ارتفاع نیز می‌شود.

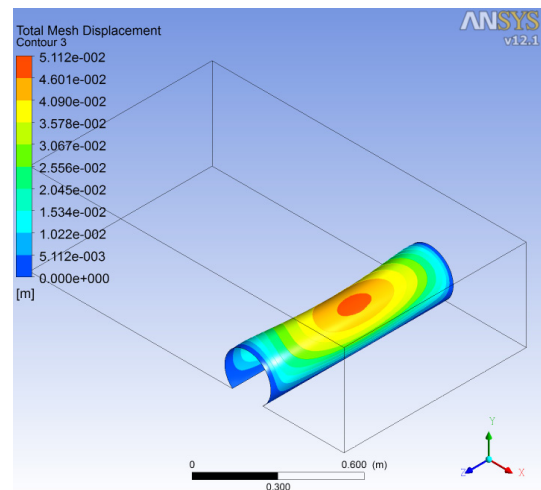
با کم بودن فشار داخلی هر دو اثر تشدید می‌شود. در عمل پدیده مثلی شدن سد که در شرایط کم بودن فشار داخلی اتفاق می‌افتد، باعث ناپایداری سازه، ایجاد ارتعاش در سازه، نوسان در دبی عبوری و تخریب فنداسیون می‌گردد.

جدول ۱: دسته‌بندی مدل‌های مورد بحث و تعیین مقادیر معلوم در

هر دسته

Table 1. Different models considered in the present study and their hydraulic/geometric parameters

دسته	محیط سطح مقطع (متر)	ضخامت لاستیک (میلی‌متر)	عرض در کف (متر)	مدول الاستیسیته (مگاپاسکال)	سطح آب بالادست (میلی‌متر)	فشار داخلی سد (کیلوپاسکال)
۱	۰/۵۵	۱	۰/۱۵ تا ۰/۳۵	۴/۶۳	۲۶۵/۴	۳
۲	۰/۵۵	۱	۰/۱۵	۴/۲ تا ۴/۶	۲۶۵/۴	۳
۳	۰/۲۷۵ تا ۰/۵۵	۱	۰/۱۵	۴/۶۳	۲۶۵/۴	۳
۴	۰/۵۵	۱	۰/۱۵	۴/۶۳	۲۶۵/۴	۱ تا ۵
۵	۰/۵۵	۱	۰/۱۵	۴/۶۳	۲۴۰ تا ۳۲۰	۳
۶	۰/۵۵	۰/۵ تا ۲	۰/۱۵	۴/۶۳	۲۶۵/۴	۳

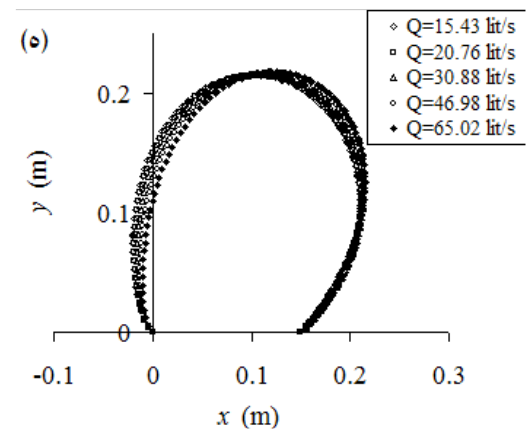
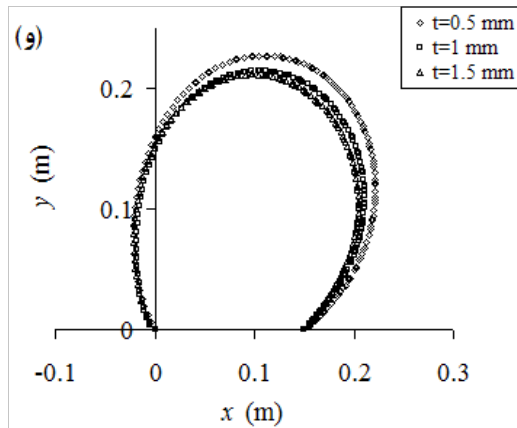
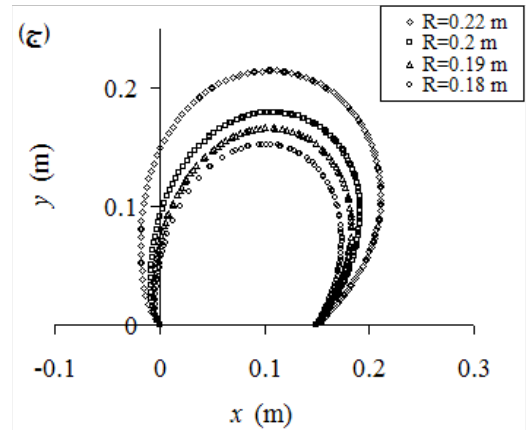
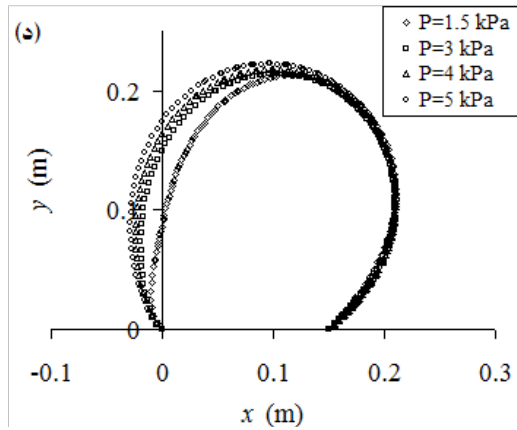
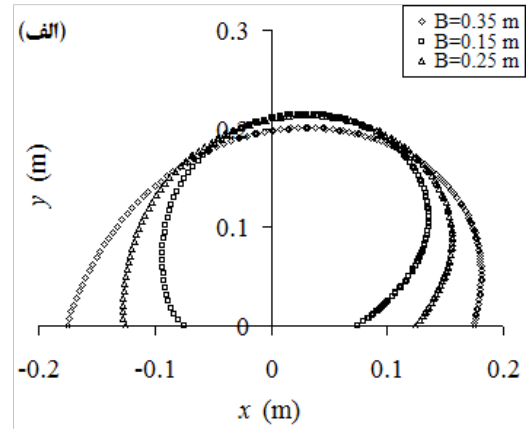
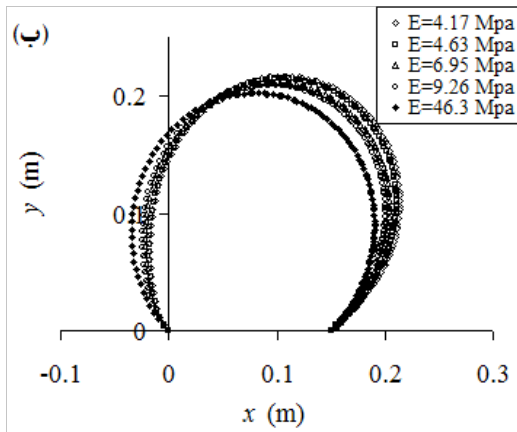


شکل ۳: تغییر شکل نهایی سازه

Fig. 3. Final deformed shape of the dam

به منظور بررسی اثر پارامترهای مؤثر بر مسأله، مدل‌ها به شش دسته تقسیم شدند. جدول ۱ دسته‌بندی مدل‌ها و پارامترهای متغیر در هر دسته را نشان می‌دهد. در شکل ۴ اثر هریک از پارامترهای عرض در کف (B)، مدول الاستیسیته (E)، شعاع داخلی سد (R)، فشار داخلی (P)، دبی جریان عبوری (Q) و ضخامت پوسته (t) بر تغییر شکل سازه در هریک از مدل‌های

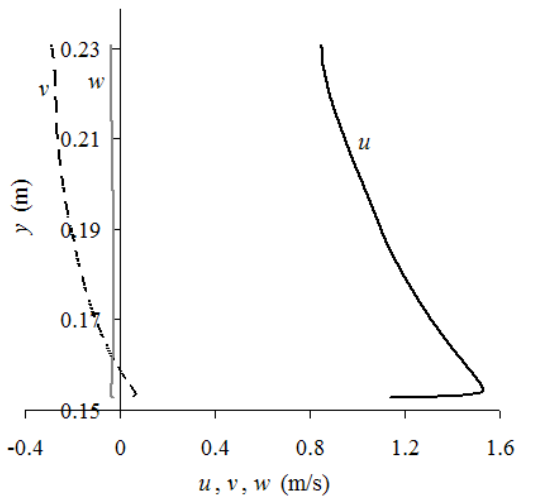
در فاصله‌ی دورتری نسبت به تاج اتفاق می‌افتد. شکل (۴-و) اثر ضخامت لاستیک بر تغییر شکل نهایی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است، در دسته‌ی ششم با کاهش ضخامت، تغییر شکل سد در برابر جریان عبوری افزایش می‌یابد.



شکل ۴: مقایسه‌ی تغییر شکل‌های مقطع سد به‌ازای تغییر الف) عرض کف، ب) مدول الاستیسیته، ج) شعاع اولیه‌ی مقطع سد، د) فشار داخلی سد، ه) دبی جریان، و) ضخامت لاستیک

Fig. 4. Deformation of dam's cross section by the variation of a- base width, b- modulus of elasticity, c- radius of the dam's primary cross section, d-internal pressure, e- flow discharge and f- rubber thickness

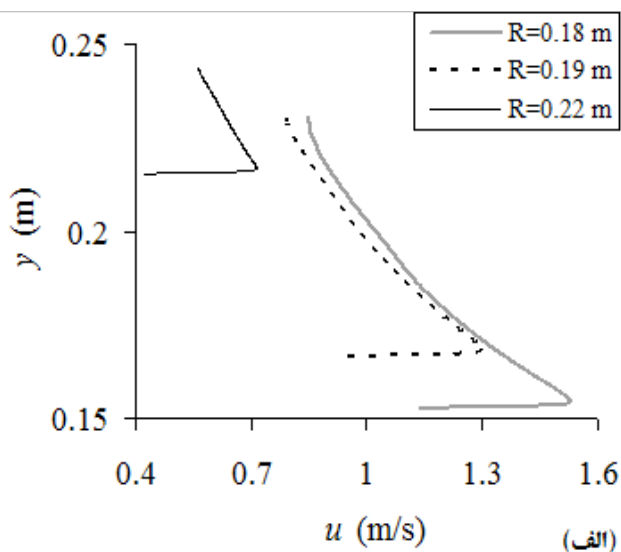
داخلی قرار دارد، است.



شکل ۵: نمایش پروفیل‌های سرعت در جهات x ، y و z روی تاج سد

Fig. 5. Velocity profiles in x , y and z direction

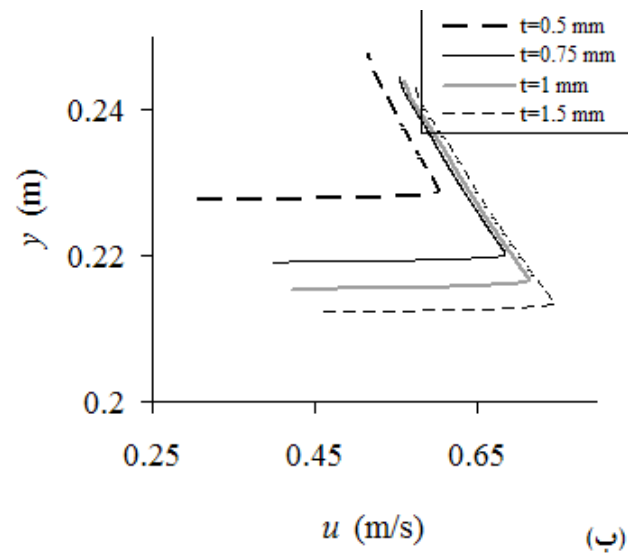
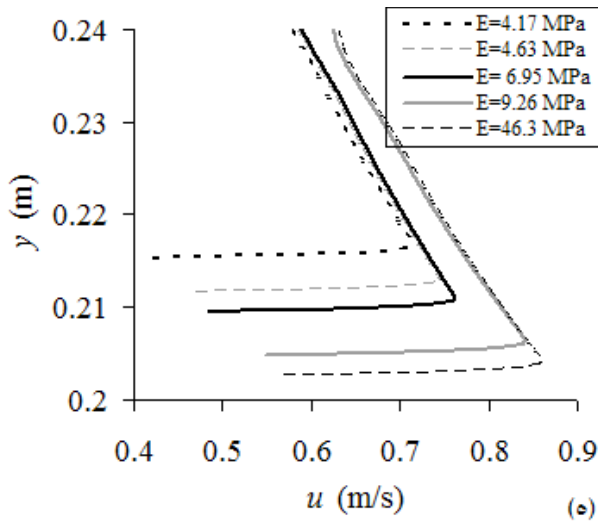
در سرریزهای تاج دایره‌ای و به خصوص در سدهای لاستیکی به دلیل انحنای خطوط جریان روی تاج سرریز، توزیع فشار از حالت هیدرواستاتیک خارج می‌شود. با افزایش بار آبی و سرعت جریان روی سرریز فشار روی تاج منفی شده و جدایش جریان در نقطه‌ای قبل از تاج سد اتفاق می‌افتد.



با افزایش تغییر شکل‌ها ارتفاع سد در مقطع وسط سد افزایش می‌یابد و سازه به سمت پایین دست خود متمایل می‌شود.

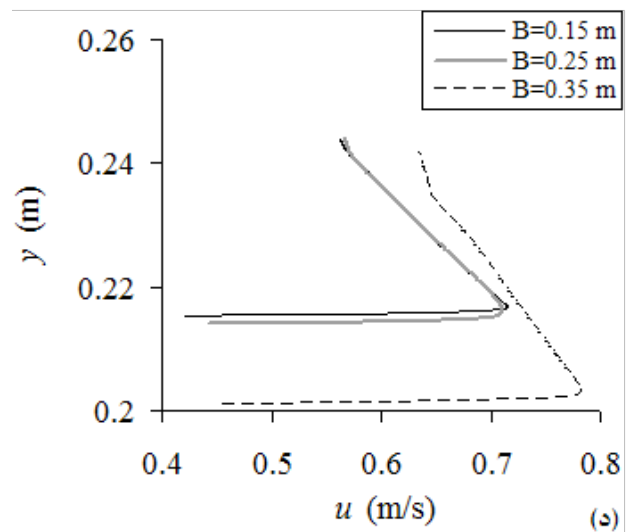
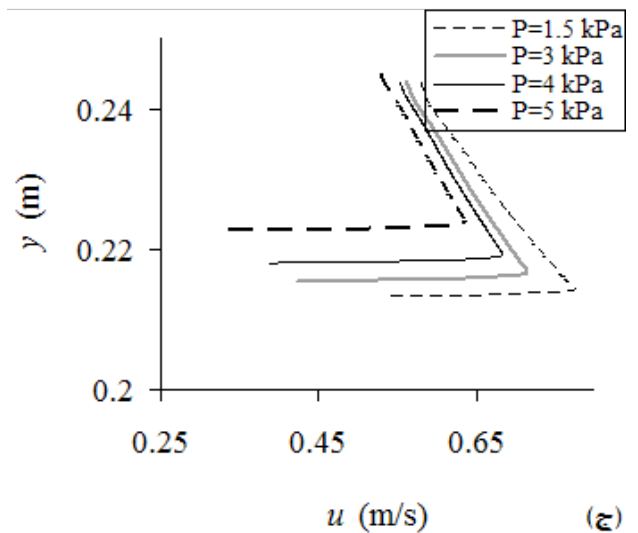
مهم‌ترین وجه مشخصه‌ی یک جریان، که سایر مشخصات نیز مستقیماً به آن بستگی دارند، میدان سرعت است. در واقع تعیین سرعت غالباً معادل با حل مسأله‌ی جریان است. مطالعاتی که در زمینه‌ی سرریز تاج دایره‌ای نرمال صورت گرفته است، نشان می‌دهد که مقادیر سرعت از تاج سرریز به طرف سطح آب کاهش می‌یابد. در ادامه توزیع سرعت جریان عبوری از روی تاج سدهای لاستیکی مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل ۵ پروفیل سرعت روی تاج سد را در صفحه‌ی XY در راستای جریان x ، y و z نمایش می‌دهد. به دلیل انعطاف‌پذیری سازه و وجود تکیه‌گاه‌ها در طرفین، تمرکز و فشردگی جریان در وسط سد به وجود می‌آید. بنابراین همان‌طور که پیش از این شرح داده شد، ارتفاع سازه در این مقطع افزایش می‌یابد. در نتیجه با نزدیک شدن به مرکز سد، سرعت در جهت x و z کاهش و در جهت y افزایش می‌یابد. با دقت در مقادیر سرعت در شکل ۵ می‌توان به غالب بودن سرعت در راستای جریان پی برد. بیش‌ترین مقدار سرعت در فاصله‌ی δ (ضخامت لایه‌ی مرزی) اتفاق می‌افتد.

شکل‌های (۶-الف تا ه) اثر پارامترهای مختلف سد لاستیکی بر توزیع سرعت روی تاج سد در ۶ دسته مدل شرح داده شده را نمایش می‌دهند. این بررسی‌ها در صفحه‌ی XY در وسط سد صورت گرفته است. شکل (۶-الف) اثر ارتفاع سد را بر توزیع سرعت روی تاج سد نشان می‌دهد. ارتفاع آب بالادست در همه‌ی این حالات برابر است. چنان‌که در شکل (۶-الف) مشاهده می‌شود با کاهش ارتفاع سد و افزایش روگذری، تغییرات شیب منحنی پروفیل سرعت و بیش‌ترین مقدار آن افزایش می‌یابد. همان‌طور که در شکل (۶-ب) مشاهده می‌شود با افزایش ضخامت لاستیک، تغییر شکل‌ها کاهش می‌یابند. بنابراین هد جریان و بیش‌ترین سرعت جریان روی تاج سرریز افزایش می‌یابد. از آنجایی که مقدار روگذری تغییر زیادی نمی‌کند، الگوی سرعت ثابت می‌ماند. شکل (۶-ج) اثر فشار داخلی را در مقدار هد و سرعت جریان روی تاج سد نشان می‌دهد. افزایش فشار داخلی و به تبع آن افزایش ارتفاع، منجر به کاهش هد جریان و کاهش سرعت روی تاج می‌شود. با افزایش عرض در کف همان‌طور که در شکل (۶-د) ملاحظه می‌شود، ارتفاع سد کاهش می‌یابد و به دنبال آن هد جریان و سرعت روی تاج افزایش می‌یابد. شکل (۶-ه) اثر الاستیسیته را بر پروفیل سرعت جریان نشان می‌دهد. با افزایش الاستیسیته رفتار سد لاستیکی به رفتار سرریز استوانه‌ای نزدیک‌تر می‌شود و سد انعطاف‌پذیری کم‌تری را از خود نشان می‌دهد. در نتیجه هد جریان روی تاج سد و مقدار سرعت افزایش می‌یابد. به منظور مقایسه‌ی نتایج، داده‌های آزمایشگاهی سرریز تاج دایره‌ای مرجع [۱۸] استفاده شده است. شکل ۷ تشابه رفتار سد لاستیکی را با سرریز تاج دایره‌ای نشان می‌دهد. در شکل (۷) عمق جریان (Y) و سرعت افقی (u) به ترتیب با شعاع استوانه (R) و سرعت روی تاج (U_1) بدون بعد شده است. R در سد لاستیکی شعاع اولیه سد وقتی که سازه تنها تحت فشار

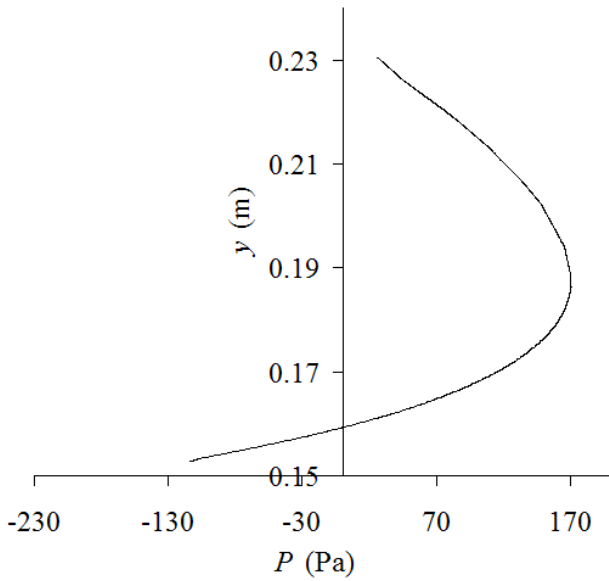


شکل ۶: مقایسه‌ی پروفیل‌های سرعت روی تاج سد به
 ازاء تغییر الف) شعاع اولیه‌ی مقطع سد، ب) ضخامت
 لاستیک، ج) فشار داخلی سد، د) عرض در کف سد و
 ه) مدول الاستیسیته‌ی سد

Fig. 6. Velocity profiles over the dam crest versus a- radius of dam's primary cross section, b- rubber thickness, c-internal pressure, d- base width and e-modulus of elasticity

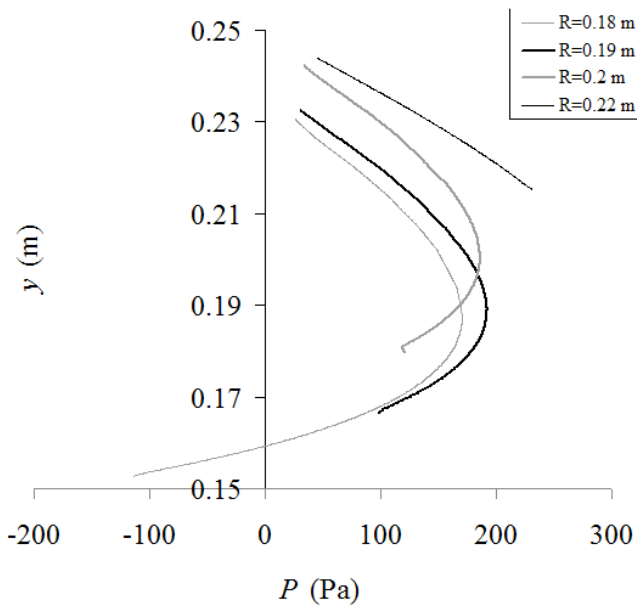


هدف از تعیین توزیع فشار بر روی تاج سرریز، مشخص نمودن نحوه تغییرات پارامتر فشار در عرض و در عمق تاج است. اطلاع از چگونگی توزیع فشار، در به کار بردن آگهانه معادلات انرژی و اندازه حرکت در سرریزها سودمند است. چنانچه در شرایط طراحی، فشار وارده بر سرریز بیش از فشار اتمسفر باشد، باعث کاهش دبی و اگر کمتر از فشار اتمسفر باشد، باعث افزایش دبی و همزمان ایجاد پدیده کاویتاسیون می‌گردد. به این ترتیب بررسی توزیع فشار روی تاج سرریز دارای اهمیت است. فشار استاتیکی در هر نقطه از سیال به صورت نسبی نسبت به فشار مرجع (۱ اتمسفر) در نرم‌افزار تعریف شده است. فشار کل برابر فشار استاتیکی و دینامیکی است. شکل ۸ پروفیل فشار روی تاج سد را در صفحه‌ی XY نمایش می‌دهد. با نزدیک شدن به مقطع وسط ارتفاع سد افزایش، سرعت کاهش و نهایتاً فشار روی تاج سد افزایش می‌یابد. بنابراین جدایش جریان در فاصله‌ی دورتری از تاج سد اتفاق می‌افتد. شکل ۹ اثر کاهش ارتفاع سد و افزایش بار آبی را بر توزیع فشار در مقطع وسط سد نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است با افزایش بار آبی و به دنبال آن افزایش سرعت توزیع فشار از حالت هیدرواستاتیک خارج شده و سپس فشار منفی روی تاج سرریز ایجاد می‌شود. نتایج به‌دست آمده از مطالعات حیدرپور و چمنی [۱۸] در سرریز استوانه‌ای



شکل ۸: توزیع فشار روی تاج سد در صفحه xy

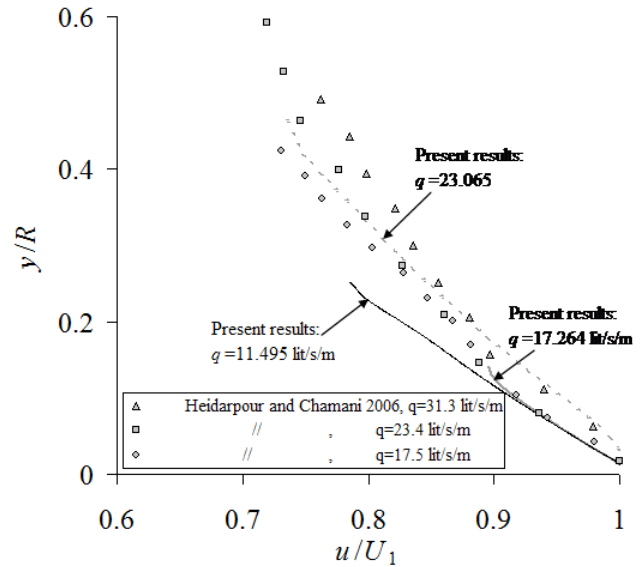
Fig. 8. Distribution of pressure over the dam crest in x - y plane



شکل ۹: توزیع فشار روی تاج سد به ازای افزایش ارتفاع اولیه سد

Fig. 9. Distribution of pressure over the dam crest against the primary height of the dam

نشان می‌دهد که برای H_1/R کمتر از $0/8$ توزیع سرعت به صورت خطی و فشار هیدرواستاتیک است، حال آن که برای مقادیر بیش‌تر از $0/8$ توزیع فشار از حالت هیدرواستاتیک خارج می‌شود. H_1 بار کل از سطح تاج سد و شعاع سرریز استوانه‌ای است. در شکل ۱۰ به مقایسه‌ی نتایج پروفیل فشار حاصل از تحقیق حاضر با نتایج آزمایشگاهی [۱۹] پرداخته شده است. در تحقیق حاضر برابر با شعاع اولیه‌ی سد (وقتی که سازه تنها تحت فشار داخلی است)، در نظر گرفته شده است و Y_2 هد آب روی سرریز است. بررسی این شکل نشان می‌دهد که داده‌های آزمایشگاهی با مدل عددی صرف‌نظر از شرایط جریان در آزمایشگاه و مدل عددی دارای مشابهت قابل قبولی است. همان‌گونه که در شکل نشان داده شده است با افزایش H_1/R توزیع فشار از حالت هیدرواستاتیک خارج می‌شود. با کاهش y/Y_2 به دلیل تغییر رفتار و نیز تفاوت شکل نهایی سدهای لاستیکی نسبت به سرریزهای تاج دایره‌ای، انحراف نتایج محاسباتی از مقادیر مشاهده شده بیشتر می‌شود. زیرا در هد بالادست ثابت سرریز با شکل خطوط جریانی در مقایسه با سایر انواع سرریزها، دبی بیشتری را از خود عبور می‌دهد. بنابراین شکل نهایی سد باعث به‌وجود آمدن تغییر در پروفیل‌های سرعت و فشار می‌شود.



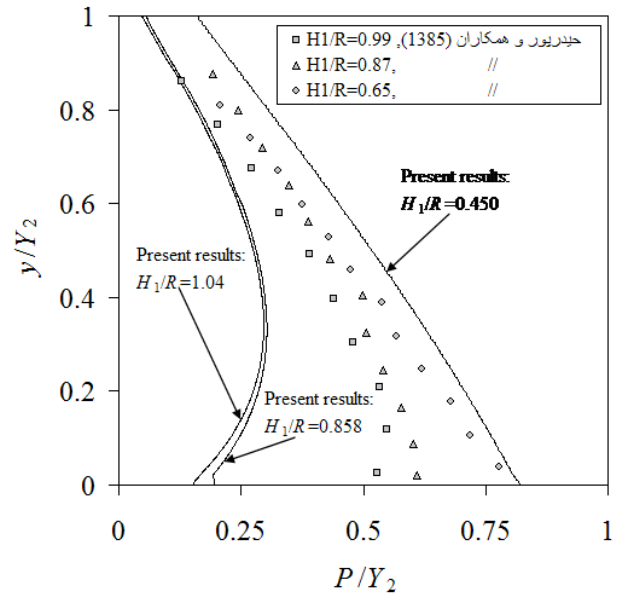
شکل ۷: مقایسه‌ی پروفیل‌های سرعت روی تاج سد به ازاء تغییر در عرض در کف سد

Fig. 7. Velocity profiles over the dam crest with against the base width

عرض در کف، ارتفاع سازه کاهش می‌یابد، روگذری سازه افزایش یافته و سد حالت پایدارتری به خود می‌گیرد. با افزایش مدول الاستیسیته، تغییر شکل‌ها کاهش می‌یابد، سازه به سمت بالادست متمایل شده و ارتفاع سد کم می‌شود. بنابراین رفتار سد به رفتار سرریز تاج دایره‌ای نزدیک‌تر خواهد شد. با کاهش محیط سطح مقطع ارتفاع سد و تغییر شکل‌ها کاهش می‌یابد. با کاهش فشار بخش بالادستی بدنه مقدار تغییرشکل بیش‌تری دارد و فرورفتگی در بدنه مشاهده می‌شود. با افزایش دبی عبوری به دلیل شرایط تکیه‌گاهی و سه بعدی شدن جریان، فرورفتگی در بدنه در مقطع وسط سد بیش‌تر اتفاق می‌افتد. در این حالت اثر مثلی شدن در پلان و ارتفاع سد در مقطع وسط افزایش می‌یابد. با کاهش ضخامت، تغییر شکل سد در برابر جریان عبوری افزایش می‌یابد. در ادامه به بررسی پروفیل‌های سرعت روی تاج سد پرداخته شد. چنان‌که نشان داده شد نیمرخ‌های سرعت از الگوی نیمرخ حاکم بر سرریز استوانه‌ای پیروی می‌کرد. نهایتاً بررسی فشار روی تاج سد نشان داد که به دلیل انحنای خطوط جریان روی تاج، فشار از حالت هیدرواستاتیک خارج شده و با بیش‌تر شدن دبی عبوری مقداری منفی به خود می‌گیرد. به ازای H_1/R بیش‌تر از 0.8 فشار روی تاج از حالت هیدرواستاتیک خارج می‌شود که نتایج آزمایشگاهی این نکته را تأیید کرد.

مراجع

- [1] Chanson, H., Montes, J.S., "Overflow Characteristics of Circular Weirs: Effect of Inflow Conditions", Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, 124(3) (1998) 152-162.
- [2] Chu, J., Guo, W., Yan, S.W., "Geosynthetic Tubes and Geosynthetic mats: Analyses and Applications", Journal of the SEAGS & AGSSEA, 42(1) (2011).
- [3] Najmaei, M., "Rubber dams", Large dams National Committee Tehran, Iran, 2001(In Persian).
- [4] Anwar, H.O., "Inflatable dams", Journal of Hydraulic Division, ASCE, 93(Hy3) (1967) 99-119.
- [5] Harrison, H.B., "The analysis and behavior of inflatable dams under static loading", Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 45 (1970) 661-676.
- [6] Harrison, H.B., "The analysis and behavior of inflatable dams under static loading (Discussion)", Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 48 (1971) 131-139.
- [7] Binnie, A.M., "The theory of flexible dams inflated by water pressure", Journal of Hydraulic Research, 11(1) (1973) 61-68.
- [8] Alwan, A.D., "The analysis and design of inflatable dams", University of Sheffield, Sheffield, United Kingdom, 1979.
- [9] Al-Shami, A., "Theory and design of inflatable structures", University of Sheffield, Sheffield, United Kingdom, 1983.



شکل ۱۰: خارج شدن توزیع فشار روی تاج سد از حالت هیدرواستاتیک به ازای افزایش در مقدار H_1/R

Fig. 10. Deviation from the hydrostatic pressure distribution over the dam crest by increasing H_1/R

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

سدهای لاستیکی سازه‌های انعطاف‌پذیر استوانه‌ای هستند که به فونداسیون صلب متصل می‌شوند. اگرچه تعداد بسیار زیادی از این سدها در حالت برافراشته به صورت دائمی مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند، در عین حال می‌توانند در مواقع عدم نیاز، از سیال خالی شوند و به صورت تخت روی بستر قرار گیرند. در تحقیق حاضر به بررسی رفتار سه بعدی سد با اعمال شرایط مرزی برای سازه و سیال پرداخته شد. در تحقیق حاضر به بررسی تغییر شکل و هیدرولیک جریان بر روی سد های لاستیکی پرداخته شد. نتایج بررسی‌هایی از اطن دست می‌تواند در نهایت منجر به دست یابی به روابطی برای تعیین ضریب دبی جریان تحت تأثیر تغییر شکل نهایی سد منجر شود [۲۰]. با توجه به پارامترهای مؤثر مدلهایی در شش دسته تعریف شد. اثر هر پارامتر بر تغییرشکل مقطع سد و سرعت روی تاج در هر دسته نشان داده و تغییرات فشار بررسی شد. شبیه‌سازی سد و سیال در نرم‌افزار ANSYS صورت گرفت. این نرم‌افزار با حل هم‌زمان CFX و Transient Structural در محیط Workbench به حل سازه و سیال می‌پردازد. بنابراین سطح آزاد آب در جریان عبوری از روی سد با در نظر گرفتن اندرکنش سیال و سازه به‌دست می‌آید. به‌منظور دست‌یابی به سطح آزاد آب از حل دو فازی آب و هوا و در مدل کردن جدایش جریان در پایین دست سد از مدل آشفتگی SST در محیط CFX استفاده شده است. در ادامه اثر پارامترهای مختلف بر تغییرشکل مقطع سد و سرعت روی تاج در هر دسته نشان داده شد و تغییرات فشار در مدل بررسی شد. با افزایش

- [15] Ghavanloo, E., Daneshmand, F., "Analytical analysis of the static interaction of fluid and cylindrical membrane structures", *European Journal of Mechanics A/Solids*, 29 (2010) 600-610.
- [16] Diaz, S., Gonzalez, J., "Hydraulic effects of an inflatable rubber weir located over a WES original spillway profile: experimental and CFD approaches", in: *E-proceedings of 36th IAHR Word Congress*, 2015.
- [17] ANSYS CFX theory guide release 12.1, in, Inc.
- [18] Heidarpour, M., Chamani, M.R., "Velocity distribution over cylindrical weirs", *Journal of Hydraulic Research*, 44(5) (2006) 708-711.
- [19] Heidarpour, M., Izadnia, E., Saadatpour, A., "Pressure distribution over circular-crested weirs of different heights", *Proceedings of the National Irrigation and Drainage Networks Management Congress*, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran, 2006 (In Persian).
- [10] D. Moorthy, C. M., Reddy, J. N., Plaut, R. H., "Three-dimensional vibrations of inflatable dams", *Thin-Walled Structures*, 21 (1995) 291-306.
- [11] Abd-Alsaber, I.B., "Effects of sediments and tailwater depths on the performance of air inflated dams", University of Mosul, Mosul, Iraq, 1997.
- [12] Lowery, K., Liapis, S., "Dynamic analysis of an inflatable dam subjected to a flood", *Computational Mechanics*, 24 (1999) 52-64.
- [13] Alhamati, A.A.N., e. al., "Determination of Coefficient of Discharge for Air-Inflated Dam Using Physical Model", *Suranaree Journal of Science and Technology*, 12(1) (2005) 19-27.
- [14] Alhamati, A.A.N., e. al., "Behavior of inflatable dams under hydrostatic conditions", *Suranaree Journal of Science and Technology*, 12(1) (2005) 1-18.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

N. Cheraghi-Shirazi, A.R. Kabiri-Samani, B. Boroomand, "Flow Field over the Rubber Dams Based on Fluid-Structure Interactions", *Amirkabir J. Civil Eng.*, 49(3) (2017) 477-486.

DOI: 10.22060/ceej.2016.705

