

ارزیابی اندرکنش دینامیکی سازه‌ی سرریز نیلوفری با آب مخزن سد به روش تلفیق حجم محدود - المان محدود

محمدحسین میرآبی (دانشجوی دکتری)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه قم

محمد عالم باقری* (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

احسان جباری (دانشیار)

طاهر رجایی (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه قم

مهندسی عمران شریف، (بهار ۱۳۹۹)
دوری ۲ - ۳۶، شماره‌ی ۱/۲، ص. ۱۳۳-۱۴۰، (یادداشت شتی)

در پژوهش حاضر، رفتار سازه‌ی تاج و گلوگاه سرریز نیلوفری در هنگام رخداد سیلاب ارزیابی شده است. سازه‌ی سرریز با استفاده از روش المان محدود و سیال مخزن سد با روش حجم محدود در نرم‌افزار ANSYS شبیه‌سازی شده است. رفتار سازه‌ی سرریز نیلوفری طی سه سناریو شبیه‌سازی شده است: الف) سناریوی تحلیلی استاتیکی مخزن خالی سد، ب) سناریوی تحلیلی استاتیکی مخزن پر که جریان روی تاج سرریز وجود ندارد و ج) سناریوی تحلیلی دینامیکی اندرکنش سازه - سیال. سناریوی (ج) در دو بخش: ۱) شروع حرکت جریان سیلاب بر روی سرریز طی گذر زمان و ۲) حالتی که جریان سیلاب بر روی سرریز به تعادل رسیده است، تقسیم‌بندی شده است. تحلیل سازه‌ی بتنی به صورت خطی انجام شده است. با توجه به نتایج به دست آمده، بحرانی‌ترین حالت برای سازه، از لحاظ بیشینه‌ی تنش کششی به مقدار ۵/۳ مگاپاسکال، در بخش اول سناریوی (ج) رخ داده است. همچنین بیشینه‌ی تنش فشاری به مقدار ۱۲/۳ مگاپاسکال نیز در بخش دوم سناریوی (ج) بوده است.

mh.mirabi@hotmail.com
alembagheri@modares.ac.ir
ehsan.jabbari@gmail.com
taher.rajaee@yahoo.com

واژگان کلیدی: دینامیک سیالات محاسباتی، اندرکنش سازه و سیال، سرریز نیلوفری، تحلیل عددی سازه.

۱. مقدمه

سرریزها از جمله سازه‌های مهم و حیاتی در طول عمر یک سد هستند که کارایی و عملکرد صحیح آن‌ها، مستلزم طراحی دقیق و مسئولانه است. سرریزهای نیلوفری به علت داشتن ساختاری ایستاده در داخل مخزن سد، اهمیتی دوچندان دارند. اعمال بارگذاری وزنی و هیدرودینامیکی به صورت توأمان بر بدنه‌ی ایستاده‌ی سازه‌ی بتنی سرریز هنگام سیلاب، تحلیل اندرکنش سازه و سیال آن را پیچیده می‌سازد.^[۱] با به‌کارگیری روش‌های عددی در دینامیک سیال‌های محاسباتی و تحلیل سازه‌ها، می‌توان رفتار سازه و پارامترهای هیدرودینامیک سیال را پیش‌بینی کرد. در دامنه‌ی سیال‌های مدل، انتخاب نوع معادله‌های ناویر استوکس^۱ متناسب با مدل ریاضی آشفتگی RANS^۲ کارآمد، امری بسیار حساس است. عمدتاً معادله‌های آشفتگی تک معادله‌ی، مانند: اسپالارت - آلماراس^۳ و یا معادله‌های دو معادله‌ی، نظیر:

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۷/۲/۲۶، اصلاحیه ۱۳۹۷/۵/۲، پذیرش ۱۳۹۷/۵/۱۳

DOI:10.24200/J30.2018.50970.2359

محدود انجام پذیرفته است. بارگذاری سازه، توسط کمیت فشار سیال بر دیواره‌ی سازه اعمال و پاسخ سازه به بارگذاری انجام شده، در حکم تغییرشکل شرایط مرزی دیواره‌ی دامنه‌ی سیال در آن لحاظ شده است. نتایج اندرکنش دو طرفه‌ی مذکور به صورت سری زمانی ارزیابی شده است. نتایج تحلیل‌های تمامی سه سناریو، به صورت تحلیل استاتیکی و دینامیکی بررسی و مقایسه شده‌اند و بحرانی‌ترین حالت ممکن برای سازه‌ی سرریز نیلوفری معرفی شده است.

۲. معادلات حاکم

معادلات به کارگرفته شده در نرم‌افزار برای بخش سیالات، معادله‌های دیفرانسیل انتقال برای پارامترهای هیدرودینامیکی جریان و ماتریس‌های جابه‌جایی و تنش المان‌های جامد برای قسمت سازه هستند. معادلات حاکم بر جریان، شامل معادله‌ی انتقال جرم (معادله‌ی ۱)، تکانه (معادله‌ی ۲) و انرژی جنبشی آشفتگی (معادله‌های ۳ و ۴)، از نوع RANS در دامنه‌ی سیال هستند. در پژوهش حاضر، از مدل ریاضی آشفتگی تنش رینولدز استفاده شده است که علت انتخاب آن، انتقال مجزای تک تک مؤلفه‌های تانسور تنش رینولدز در معادلات انتقال مجزاست. سایر معادلات ریاضی آشفتگی، از فرض ساده‌سازی شده‌ی بوزینسک استفاده می‌کنند که غیرایزوتروپیک بودن آشفتگی را محدود به نواحی خاصی می‌کنند. آشفتگی حاصل، توسط ترم تولید انرژی جنبشی آشفتگی ایجاد می‌شود و توسط ترم‌های انتشار مولکولی و حرکتی جریان گسترش می‌یابد. مؤلفه‌های تانسور تنش رینولدز نیز به صورت غیرایزوتروپیک، نوسان‌ها را در دامنه‌ی مدل ایجاد می‌کنند. نوسان‌های مذکور در قالب تغییرات زمانی پارامترهای هیدرودینامیکی جریان نظیر فشار ظاهر می‌شوند. تغییرات زمانی مذکور در فشار باعث تغییرات زمانی در بارگذاری می‌شوند و به نوبه‌ی خود وضعیت تنش‌های سازه‌ی سرریز را در هر زمان متغیر می‌سازند. از جمله مهم‌ترین ترم‌های موجود در معادله‌ی انتقال آشفتگی تنش رینولدز، ترم کرنش فشاری است که فشار نوسانی در یک راستا را به راستای دیگر مختصاتی منتقل می‌کند و مانند آنچه در طبیعت رخ می‌دهد، جریان را مدل می‌کند. لذا معادله‌ی ریاضی آشفتگی ۷ معادله‌ی تنش رینولدز، گزینه‌ی مناسبی برای پیش‌بینی رفتار تصادفی غیرایزوتروپیک پارامترهای هیدرودینامیکی جریان است.

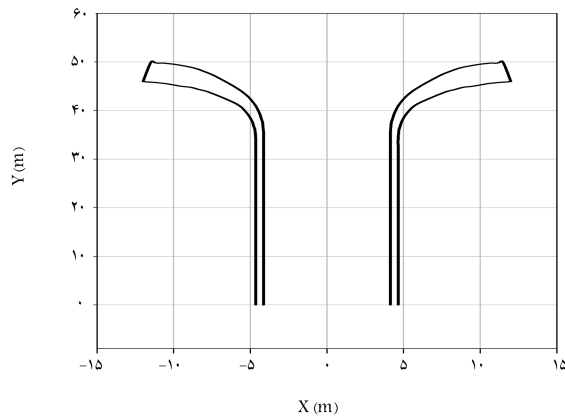
$$\frac{\partial(\rho)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right) + \frac{\partial(-\rho \bar{u}'_i \bar{u}'_j)}{\partial x_j} \quad (2)$$

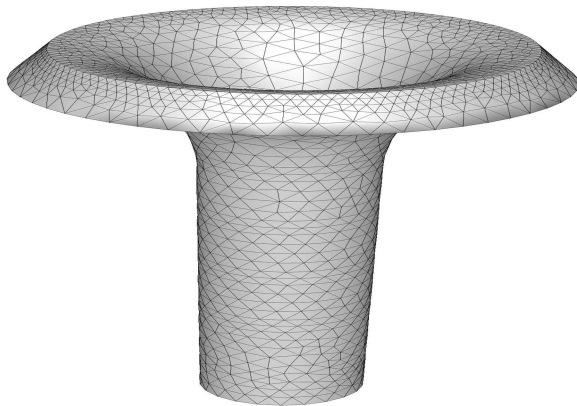
$$\frac{\partial(\rho \bar{u}'_i \bar{u}'_j)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_k \bar{u}'_i \bar{u}'_j)}{\partial x_k} = -\frac{\partial}{\partial x_k} \left(\rho \bar{u}'_i \bar{u}'_j \bar{u}'_k \right) + p \left(\delta_{kj} \bar{u}'_i + \delta_{ik} \bar{u}'_j \right) + \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\mu \frac{\partial}{\partial x_k} (\bar{u}'_i \bar{u}'_j) \right) - \rho \left(\frac{\partial \bar{u}'_i}{\partial x_k} \bar{u}'_j + \bar{u}'_j \frac{\partial \bar{u}'_i}{\partial x_k} \right) - \rho \beta \left(g_i \bar{u}'_j \bar{\theta} + g_j \bar{u}'_i \bar{\theta} \right) + p \left(\frac{\partial \bar{u}'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}'_j}{\partial x_i} \right) - 2\mu \frac{\partial \bar{u}'_i}{\partial x_k} \frac{\partial \bar{u}'_j}{\partial x_k} \quad (3)$$

(۱۹۷۹).^[۶] روش المان محدود در حل معادله‌های حاکم بر دامنه‌ی سیال را به کار گرفت و علاوه بر دقت مناسب تخمین، سرعت همگرایی نتایج را نیز افزایش داد. لی و همکاران (۱۹۸۹).^[۷] با به کارگیری روش المان محدود در دو بعد، توانستند انحنای بهتری در سطح آزاد آب واقع بر تاج سرریز نیلوفری را محاسبه کنند. اولسن و کیلسویگ^[۸] (۱۹۹۸). نیز با استفاده از معادله‌های ناویر استوکس RANS و مدل ریاضی آشفتگی کی - اپسیلون در سه بعد، ضریب تخلیه‌ی برخی از انواع سرریزهای نیلوفری را محاسبه کردند. همچنین میرآبی و منصور (۲۰۱۸).^[۹] نشان دادند که در جریان‌هایی با وضعیت آشفتگی متغیر، نظیر جت‌های مستغرق تحت تأثیر دیواره، مدل ریاضی آشفتگی تنش رینولدز در کنار معادله‌های ناویر استوکس مرتبط، دقت بسیار بالایی را از خود نشان می‌دهد. نتایج کارایشان بیانگر آن بود که ترم کرنش فشاری و ترم استهلاک انرژی جنبشی آشفتگی در معادله‌ی آشفتگی تنش رینولدز، به دقت پیش‌بینی می‌افزاید. هو^[۱۰] و همکاران (۲۰۱۵).^[۱۱] نیز اندرکنش‌های مختلف بین سازه و سیال را انجام دادند. سیال‌های به کار رفته در پژوهش آنان تراکم‌ناپذیر بوده‌اند. مطالعات ایشان، هر یک از روش‌ها و دقت‌شان درخصوص پیش‌بینی رفتار سازه و سیال را دسته‌بندی کرده است. گرندمونت و مادای^[۱۲] (۲۰۱۲). هم با مطالعه‌ی روش‌های مختلف پیرامون اندرکنش سازه و سیال، رفتار سیال را با سازه‌های صلب و کشسان بررسی کردند. همچنین سیال لزوج مورد استفاده در دو حالت تراکم‌پذیر و تراکم‌ناپذیر به کار گرفته شد و در نهایت، نتایج سری زمانی تنش‌ها و تغییرمکان سازه را ارزیابی کردند. لیا و چوپرا^[۱۳] (۱۹۷۴).^[۱۴] نیز تأثیر اندرکنش آب مخزن در پاسخ دینامیکی برج آبگیر را ارزیابی کردند. پاسخ دینامیکی برج مذکور تحت اثر زمین‌لرزه بوده و از اثر امواج سطحی ایجاد شده بر روی آب صرف‌نظر شده است. همچنین سیال آب به عنوان سیال تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته شده است. ایشان برای مدل کردن آب مخزن از روش جرم افزوده استفاده کردند و نتایج بیانگر آن بود که تحلیل اندرکنش باعث می‌شود بسامد نوسان‌های سازه‌ی آبگیر و نسبت دمپینگ مودال آن کاهش یابد. همچنین گویال^[۱۵] و چوپرا (۱۹۸۹).^[۱۶] اثر زمین‌لرزه بر برج‌های آبگیر، به صورت اندرکنش آب - سازه - خاک را بررسی کردند و نتیجه گرفتند که این نوع مدل‌سازی انجام شده، در بالا بردن دقت جواب شبیه‌سازی، بسیار مؤثر است. رضوی و احمدی (۲۰۱۷).^[۱۷] نیز سرریز نیلوفری را به صورت سه‌بعدی با نرم‌افزار Flow 3D شبیه‌سازی کردند و با مطالعه بر روی دقت مدل‌سازی رفتار جریان و ضریب تخلیه‌ی سرریز دریافتند که دقت شبیه‌سازی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی موجود، در حد قابل قبول است. سئو^[۱۸] و همکاران (۲۰۱۶).^[۱۹] بر روی شبیه‌سازی سه بعدی سرریزهای اندازه‌ی متوسط، مطالعاتی را بر روی ضریب تخلیه‌ی سرریز در شکل‌های مختلف انجام داده و نتیجه گرفته‌اند که مقدار تخلیه‌ی سرریزکنگره‌یی، ۷۱٪ بیشتر از سرریز اوجی خطی است. ایشان همچنین دریافتند رقوم کف کانال جانبی تخلیه‌ی سیلاب، مؤثرترین گزینه در تخلیه‌ی سیلاب است. انجیل‌زاده و نوهانی (۲۰۱۶).^[۲۰] نیز جریان بر روی سرریز نیلوفری را به وسیله‌ی نرم‌افزار Flow 3D شبیه‌سازی کردند و با مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی و داده‌های آزمایشگاهی دریافتند که خطای تخمین تخلیه در حدود ۶/۴٪ بوده است. همچنین تخمین عمق روی تاج سرریز، خطایی برابر با ۶/۴٪ داشته است.

در پژوهش حاضر، برای قسمت تاج و گلوگاه سازه‌ی سرریز نیلوفری که به صورت ایستاده در مخزن سد مستقر می‌شوند، در محدوده‌ی خطی ارزیابی شده‌اند. همچنین از معادلات دینامیکی قانون دوم نیوتن، ناویر استوکس آشفتگی و مدل ریاضی آشفتگی تنش رینولدز، برای تحلیل سیالاتی اندرکنش توسط نرم‌افزار ANSYS استفاده شده است. اندرکنش بین سازه و سیال، از طریق تلفیق روش‌های المان محدود و حجم



شکل ۱. ابعاد تاج، گلوگاه و بدنه‌ی سرریز نیلوفری.



شکل ۲. شبکه‌بندی سه‌بعدی سازه‌ی سرریز نیلوفری.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی بتن سازه‌ی سرریز نیلوفری.

نسبت پواسون	مدول کشسانی
۰٫۱۸	۳۰ گیگاپاسکال

را نشان می‌دهد. تعداد المان‌های به کار رفته در تقسیم‌بندی سازه‌ی سرریز، ۷۸۶۰ عدد و نوع المان چهارجبهی است.

جنس سازه‌ی سرریز نیلوفری از بتن است. جهت تحلیل خطی سازه، بر مقدار مدول کشسانی، مقاومت کششی و فشاری بتن افزوده شده است تا آثار حضور آرماتورهای فولادی به شکل ضمنی لحاظ شود. مشخصات فیزیکی بتن سرریز نیلوفری در جدول ۱ ارائه شده است. افزایش مقادیر پارامترهای فیزیکی مذکور، فقط جهت مدل کردن سازه در محدوده‌ی خطی و معادل با بتن مسلح بوده است. قسمت دیواره‌ی تحتانی محاط بر محل تخلیه از سرریز، به صورت اتصال گیردار به زمین مدنظر قرار گرفته است. مدل آشفته‌گی تنش رینولدز، قابلیت مدل کردن کرنش ناگهانی ناشی از فشار در جهت‌های مختلف (ترم کرنش فشاری) را دارد. با توجه به این موضوع، این قبیل کرنش‌ها می‌توانند مانند بارگذاری ضربه‌یی بر پیکره‌ی سازه‌ی سرریز عمل کنند. بنابراین لازم است چنین حالتی مانند آنچه در واقعیت رخ می‌دهد، در شبیه‌سازی مدنظر قرار گیرد. این قابلیت فقط در مدل ریاضی آشفته‌گی تنش رینولدز وجود دارد.

دامنه‌ی عبوری سیال نیز با نوع شبکه‌بندی مشابه سازه، از نوع چهارجبهی به احجام کنترل محدود تقسیم‌بندی شده است. شرایط مرزی مدل، شامل مرزهای:

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\varepsilon\bar{u}_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) - \rho C_{\varepsilon 1} \left(\nu \rho \bar{u}_i' \bar{u}_k' \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k} - C_{\varepsilon 2} \rho \beta \left(g_i \bar{u}_i' \theta + g_i \bar{u}_i' \theta \right) \right) - \rho C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

که در آن‌ها، u_i مؤلفه‌های بردار سرعت جریان، p مؤلفه‌ی فشار استاتیکی جریان، $u_i' u_j'$ مؤلفه‌های تانسور تنش رینولدز و ε نرخ استهلاک انرژی جنبشی آشفته هستند. همچنین مقادیر $C_{\varepsilon 1}$ ، $C_{\varepsilon 2}$ و σ_ε به ترتیب برابر ۱٫۴۴، ۱٫۹۲ و ۱ فرض شده‌اند.^[۱] مقدار $C_{\varepsilon 2}$ نیز تابعی از سرعت سیال است. برای مدل کردن جریان در مجاورت دیواره هم از توابع دیواره‌ی استاندارد استفاده شده و شرط عدم لغزش در مرزهای دیواره برقرار است. برای گسسته‌سازی معادلات در دامنه، روش حجم محدود به کار می‌رود و هر یک از معادلات انتقال در حجم‌های کنترل، مؤلفه‌های مجهول را تحلیل می‌کنند.

معادله‌ی دینامیکی تعادل در قانون دوم نیوتن، از معادلات تحلیل سازه است (معادله‌ی ۵) که برای تمامی المان‌های سازه‌ی سرریز نیلوفری به کار می‌رود و تغییرمکان‌ها، سرعت و شتاب المان‌ها محاسبه می‌شوند. تغییرمکان و تنش‌های هر المان نیز با معادله‌های ۶ تا ۱۰ محاسبه می‌شوند. المان‌های هندسه‌ی سرریز نیلوفری، از نوع چهارجبهی است، بنابراین لازم است در معادله‌های ۹ و ۱۰، از تابع شکل متناسب المان چهارجبهی استفاده شود.

$$\{F^{load}(t)\} = [M] \{\ddot{x}(t)\} + [C] \{\dot{x}(t)\} + [K] \{x(t)\} \quad (5)$$

$$\{\sigma(t)\} = [D] \{\varepsilon^{ela}(t)\} \quad (6)$$

$$[M] = \rho \int_{vol} [N]^T [N] dV \quad (7)$$

$$[C] = \alpha [M] + \beta [K] \quad (8)$$

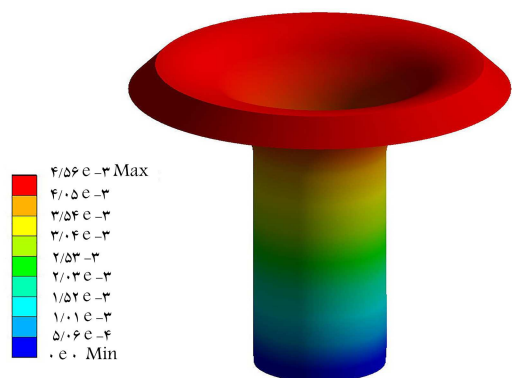
$$[K] = \int_{vol} [B]^T [D] [B] dV \quad (9)$$

$$\{\varepsilon^{ela}(t)\} = [B] \{x(t)\} \quad (10)$$

که در آن‌ها، $[M]$ ماتریس جرم المان، $[C]$ ماتریس میرایی المان، $[K]$ ماتریس سختی المان، $[D]$ ماتریس کشسانی المان، $[N]$ ماتریس تابع شکل المان و $[B]$ ماتریس کرنش - جابه‌جایی المان هستند. همچنین α و β به ترتیب ضریب متناسب با ماتریس جرم و سختی هستند. برای مستهلک کردن انرژی به وجود آمده در سازه‌ی بتنی سرریز نیلوفری، مقدار ۵٪ میرایی بحرانی در نظر گرفته شده است. میرایی مذکور با استفاده از روش رایلی و با توجه به مقادیر α و β در تحلیل سازه لحاظ می‌شود.^[۱۷]

۳. مشخصات هندسی و فیزیکی مدل

سازه‌ی تاج و گلوگاه سرریز نیلوفری از جنس بتنی و به صورت سه‌بعدی در نرم افزار ANSYS بررسی شده است. ابعاد مقطع سازه‌ی سرریز نیلوفری در شکل ۱ مشاهده می‌شود. پروفیل شکل تاج و قسمت گلوگاه با توجه به دبی عبوری سیلاب از سرریز براساس ضوابط موجود در USBR طراحی شده است.^[۱۸] ارتفاع کلی سازه، ۵۰ متر و ضخامت آن در تراز تاج و پایه به ترتیب حدود ۳٫۸ و ۱ متر است. شکل ۲، شبکه‌بندی المان‌های به کار رفته برای تحلیل المان محدود سازه‌ی سرریز نیلوفری



شکل ۴. تغییرشکل سازه بر حسب متر.

جدول ۲. تنش‌های بیشینه و محل وقوع آن‌ها در سناریوی اول.

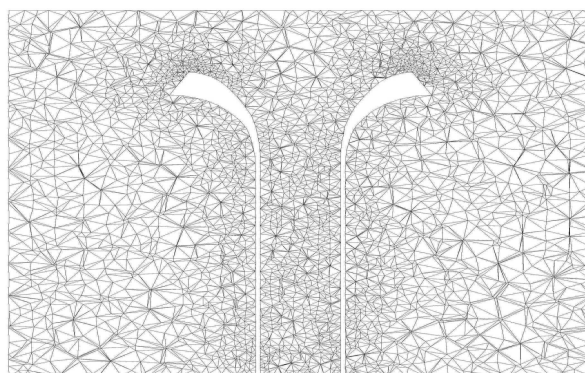
تنش‌ها	مقدار و محل وقوع
بیشینه‌ی کششی	۰٫۴۵ مگاپاسکال (دیواره تاج)
بیشینه‌ی فشاری	۴٫۶ مگاپاسکال (دیواره مجاور تکیه‌گاه)

مخزن سد آب وجود دارد، اما بر روی سرریز جریانی وجود ندارد. در این حالت بارهای وزن و هیدرواستاتیک، معادل با سطح آب در تراز تاج سرریز به بدنه‌ی بتنی سرریز وارد می‌شوند. سناریوی سوم، مربوط به زمانی است که جریان سیلاب توسط سرریز در حال تخلیه است. با توجه به ماهیت مسئله، برای دو سناریوی اول، تحلیل استاتیکی و برای سناریوی سوم، تحلیل دینامیکی انجام شده است. در تحلیل‌های استاتیکی، بار وزن سازه و بار هیدرواستاتیک آب مخزن بر سازه اعمال می‌شوند. اما در تحلیل دینامیکی، ریزش جریان سیال آب در داخل سرریز نیلوفوری، به‌وسیله‌ی اندرکنش دوطرفه‌ی سازه و سیال مدل شده است.

۱.۴. سناریوی اول (مخزن سد خالی)

شکل ۴، تغییرشکل سازهی سرریز تحت سناریوی اول (فقط بار وزن) را نشان می‌دهد که تحت بار وزن با توجه به تقارن موجود، سازه نشست جزئی به میزان ۴٫۵ میلی‌متر داشته و تغییرشکل جانبی نداشته است. به دلیل اتصال گیردار در محل تحتانی سرریز، قسمت تاج سرریز نیلوفوری، تغییرشکل قائم بیشتری نسبت به سایر نقاط داشته است. کانتورهای تنش‌های شعاعی، محیطی، قائم، تنش اصلی بیشینه و کمینه‌ی سازهی سرریز نیلوفوری، تحت سناریوی اول در شکل ۵ مشاهده می‌شود.

با توجه به وضعیت تنش‌های مشخص شده در شکل ۵، بیشینه‌ی تنش کششی به‌وجود آمده تحت فقط بار وزن در دیواره‌ی تاج سرریز نیلوفوری با میزان ۰٫۴۵ مگاپاسکال رخ داده است. همچنین میزان بیشینه‌ی تنش فشاری موجود، در قسمت دیواره‌ی داخلی مجاور تکیه‌گاه سازه با میزان ۴٫۶ مگاپاسکال به‌وجود آمده است. تمامی تنش‌های به‌وجود آمده در محدوده‌ی خطی رفتار بتن چه در کشش و چه در فشار بوده و احتمال بروز ترک در بدنه‌ی بتنی سازهی سرریز وجود نداشته است. با توجه به مقادیر تنش بیشینه و کمینه، دیواره‌ی قسمت تحتانی و همچنین تاج سرریز نیلوفوری در سناریوی اول، به ترتیب بیشترین تنش‌های فشاری و کششی را تجربه می‌کنند. در جدول ۲، مقدار تنش‌های بیشینه‌ی کششی و فشاری، و محل وقوع آن‌ها طی سناریوی اول ارائه شده است.



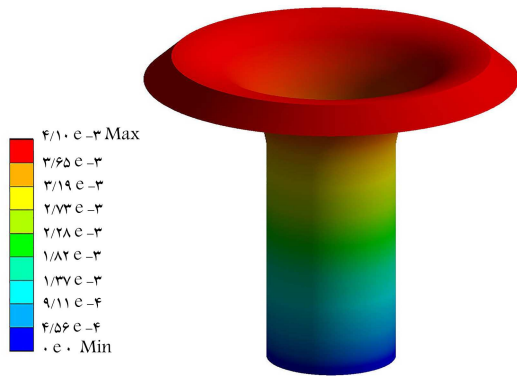
شکل ۳. شبکه‌بندی دامنه‌ی عبوری سیال در مجاورت سازهی سرریز نیلوفوری.

ورودی سرعت، ورودی فشار، خروجی فشار، مرز دیواره و مرز تقارنی است. تعداد احجام کنترل در دامنه برابر ۱۲۶۲۲۰ عدد است. نوع شبکه‌بندی به دلیل وجود انحنا در پروفیل سرریز، از نوع غیر ساختاریافته است و باید توزیع شبکه در هر دو قسمت دامنه و سازه با یکدیگر منطبق باشند. دلیل این انطباق، توزیع بهتر فشار استاتیکی اعمال شده از جانب سیال، به‌عنوان بارگذاری بر روی سازهی سرریز نیلوفوری است. جهت افزایش دقت در محاسبات اندرکنش دو طرفه‌ی سازه و سیال، در مجاورت مرز دیواره‌ی سازه بر تراکم شبکه‌بندی افزوده شده است. سیال مورد استفاده در دامنه‌ی شبیه‌سازی، سیال آب در دمای ۲۰ درجه‌ی سانتی‌گراد است. کلیه‌ی مشخصات فیزیکی استاندارد آب، در دمای مذکور برای مدل مدنظر قرار گرفته است. در شکل ۳، برشی از چگونگی شبکه‌بندی دامنه‌ی عبوری سیال مشاهده می‌شود.

مقدار دبی سیلاب طرح برای سرریز، ۵۵ مترمکعب بر ثانیه است. برای جلوگیری از بروز پدیده‌ی خلاءزایی و اعمال بارگذاری ضربه‌ی ناخواسته‌ی ناشی از پدیده‌ی ایجاد حفره ۱۸، چهار مجرای هوا در طول گلوگاه در نظر گرفته شده است. هوادهای مذکور، هوا با دبی معادل ۸٪ دبی عبوری را به داخل گلوگاه می‌دمند.^[۱۹] جریان هوای ورودی باعث کاهش چگالی جت ریزشی در گلوگاه می‌شود و ریسک کاهش فشار استاتیکی نسبت به فشار اتمسفر کاهش می‌یابد. مجاری مذکور، در قالب شرایط مرزی ورودی فشار به‌صورت پشت سر هم در داخل گلوگاه قرار گرفته است (شکل ۵۸). شرایط مرزی دیواره، شامل زبری بتن، در حدود ۱ میلی‌متر است. اعمال زبری به دیواره‌ها باعث اثرگذاری در چگونگی رشد لایه‌های مرزی می‌شود و رفتار جریان در مجاورت دیواره را به آنچه در واقعیت است، نزدیک‌تر می‌کند. در صورت لحاظ کردن زبری در شرایط مرزی دیواره، آشفتگی ایجاد شده در تکامل یافتگی جریان در مجاورت دیواره مؤثر خواهد بود. همچنین رفتار متقابل زیرلایه‌های لایه مرزی در مقابل رفتار آشفتگی مجاور دیواره با دقت بالاتری مدل می‌شود. قسمت‌های بیرونی مدل به صورت مرز متقارن مدنظر قرار گرفته‌اند. با انجام این کار، گرادیان سرعت در مرز مذکور صفر خواهد بود و امواج تولیدی به داخل دامنه باز نخواهند گشت. در حقیقت، این حالت وجود سیال تا فواصلی دورتر از سازهی سرریز نیلوفوری را ایجاد می‌کند. در مرز فوقانی دامنه، فشار اتمسفر برقرار است.

۴. تحلیل نتایج و بحث

همان‌گونه که توضیح داده شد، شبیه‌سازی مدل در پژوهش حاضر، طی سه سناریو بررسی شده است. سناریوی اول، هنگامی است که مخزن سد خالی از آب است و سازهی سرریز تحت اثر وزن خود خواهد بود. سناریوی دوم، زمانی است که در



شکل ۶. تغییرشکل سازه‌ی سرریز تحت سناریوی دوم (بار وزن و هیدرواستاتیک) بر حسب متر.

جدول ۳. تنش‌های بیشینه و محل وقوع آن‌ها در سناریوی دوم.

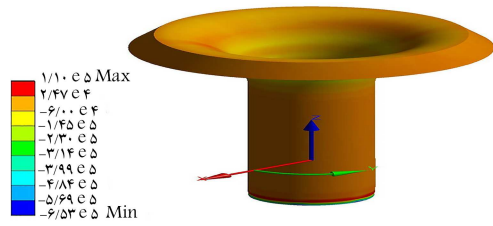
تنش‌ها	مقدار و محل وقوع آن‌ها
بیشینه‌ی کششی	۰٫۸۷ مگاپاسکال (دیواره‌ی مجاور تکیه‌گاه)
بیشینه‌ی فشاری	۷٫۹ مگاپاسکال (دیواره‌ی مجاور تکیه‌گاه)

باید دستخوش تغییر شود. تغییرشکل سازه تحت بارگذاری سناریوی دوم در شکل ۶ مشاهده می‌شود. مجدداً با توجه به تقارن مسئله، سازه‌ی سرریز دچار نشست به مقدار ۴/۱ میلی‌متر شده و تغییرشکل جانبی نداشته است. مقدار نشست سازه در این حالت نسبت به سناریوی اول حدود ۹٪ کمتر است که علت آن می‌تواند مؤلفه‌ی نیروی رو به بالا (نیروی شناوری) وارد بر قسمت تاج سرریز ناشی از بار هیدرواستاتیک باشد. بنابراین وزن ظاهری سازه کاهش یافته است.

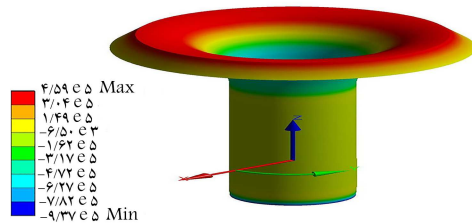
کانتورهای تنش شعاعی، محیطی، قائم، تنش اصلی بیشینه و کمینه‌ی سازه‌ی سرریز نیلوفری، تحت سناریوی دوم در شکل ۷ مشاهده می‌شود. با توجه به تنش‌های نمایش داده شده، مقدار بیشینه‌ی تنش کششی در سازه، ۰٫۸۷ مگاپاسکال در محل دیواره‌ی مجاور تکیه‌گاه گیردار است. مقدار تنش بیشینه‌ی کششی نسبت به سناریوی اول ۹۳٪ افزایش داشته و محل آن نیز تغییر کرده است. مقدار بیشینه‌ی تنش فشاری در سناریوی دوم ۷٫۹ مگاپاسکال بوده است، که نسبت به سناریوی اول، ۷۲٪ افزایش داشته و همچنین محل بیشینه‌ی تنش فشاری نیز از قسمت بیرونی دیواره‌ی مجاور محل تکیه‌گاه گیردار در سناریوی اول، به دیواره‌ی داخلی مجاور تکیه‌گاه انتقال یافته است. لذا با توجه به نتایج ذکر شده، مقدار بیشینه‌ی تنش‌های کششی و فشاری در بتن سرریز نیلوفری در سناریوی دوم، نسبت به سناریوی اول افزایش محسوس داشته است. می‌توان به این نتیجه رسید که وجود آب در مخزن، تغییرشکل نهایی سازه را کاهش می‌دهد، اما بر مقادیر تنش کششی و فشاری سازه می‌افزاید. لذا سناریوی دوم نسبت به سناریوی اول، شرایط بحرانی‌تری دارد؛ هر چند که مقدار تنش‌های کششی و فشاری ایجاد شده در داخل بدنه‌ی بتنی سرریز، همچنان کمتر از مقاومت کششی و فشاری بتن است و بدنه‌ی سرریز دچار مشکل ترک‌خوردگی نخواهد شد. در جدول ۳، مقدار تنش‌های بیشینه‌ی کششی و فشاری، و محل وقوع آن‌ها، طی سناریوی جاری ارائه شده است.

۳.۴. سناریوی سوم (مخزن پر همراه جریان بر روی سرریز)

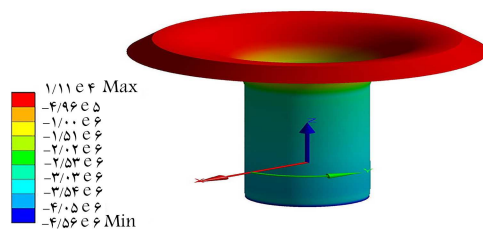
در قسمت اول سناریوی سوم به صورت دینامیکی در طول زمان، اندرکنش سازه‌ی سرریز و سیال آب روی آن از بدو شروع جریان سیلاب تا به تعادل رسیدن آن به صورت



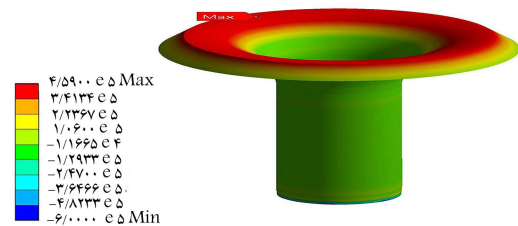
الف) تنش شعاعی X؛



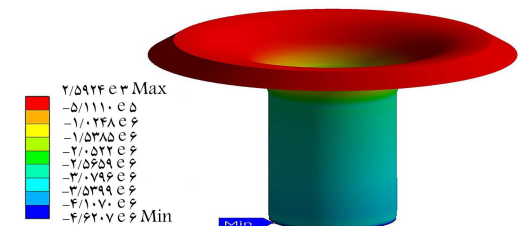
ب) تنش محیطی Y؛



ج) تنش قائم Z؛



د) تنش اصلی بیشینه؛

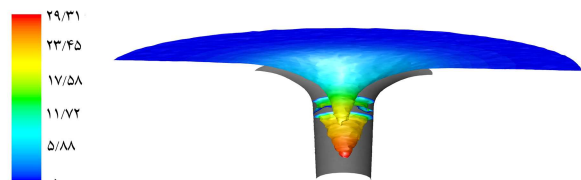


ه) تنش اصلی کمینه.

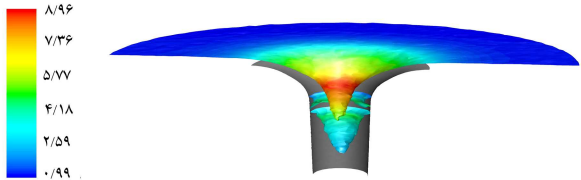
شکل ۵. کانتور تنش بدنه‌ی سازه‌ی سرریز نیلوفری تحت سناریوی اول (فقط بار وزن) واحدها براساس پاسکال هستند.

۲.۴. سناریوی دوم (مخزن پر بدون جریان بر روی سرریز)

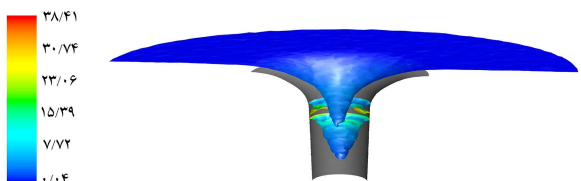
سناریوی دوم، حالتی را برای سازه بارگذاری می‌کند که بار وزن، به اضافه‌ی بار هیدرواستاتیک مخزن پر در تراز تاج سرریز به شکل هم‌زمان اعمال می‌شوند، اما جریان بر روی سرریز جاری نمی‌شود. با توجه به حضور نیروهای هیدرواستاتیک دارای مؤلفه‌های افقی و قائم، مقدار تنش‌های ایجاد شده نسبت به سناریوی اول



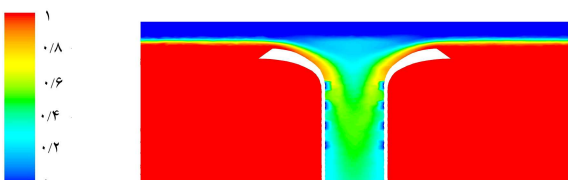
الف) کانتور بزرگی سرعت جریان (m/s)؛



ب) کانتور انرژی جنبشی آشفته (m/s²)؛



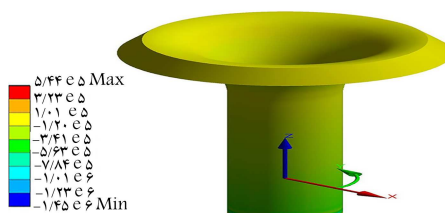
ج) کانتور استهلاك انرژی جنبشی آشفته (m³/s²)؛



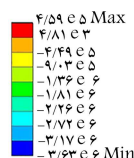
د) کانتور کسر حجمی آب (بدون بعد).

شکل ۸. الگوی ریزش جریان سیلاب بر روی تاج سرریز نیلوفوری.

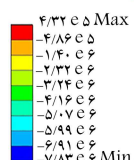
سیلاب ورودی و دبی تخلیه شده از سرریز را نشان می‌دهد. رویه‌ی نمایش داده شده در شکل‌های مذکور، سطح آب جاری شده بر روی سرریز است. با توجه به سرعت بالای جریان در هنگام ریزش آب در داخل سرریز، نوسان‌های اعمال شده به سازه قابل توجه است. نوسان‌های مذکور در قالب انرژی جنبشی آشفته ظاهر (شکل ۸ ب) و با وارد شدن بر پیکره‌ی سازه، باعث حرکت نوسانی آن شده‌اند. با توجه به میرایی ۵ درصدی سازهی بتنی سرریز و استهلاك انرژی آشفته‌ی جریان، میزان دامنه‌ی نوسان‌های سازه به تدریج مستهلک شده است. محل ۴ هواده واقع بر گلوگاه سرریز جهت جلوگیری از خلاءزایی، در شکل ۸ د مشخص است. با توجه به جریان روی سرریز، پاسخ سازه در طول زمان ارزیابی شده است. جابه‌جایی ایجاد شده در دو قسمت تاج و گلوگاه سازه‌ی سرریز در شکل ۹ برای مدت ۲۰ ثانیه نشان داده شده است. جریان هنگام وارد شدن به داخل سرریز، باعث جابه‌جایی جانبی سازه تا ۲ میلی‌متر در تراز تاج و ۰/۵ میلی‌متر در تراز گلوگاه سرریز شده است. با اعمال بارگذاری نوسانی توسط پدیده‌ی آشفته‌گی موجود، نوسان‌های رخ داده در داخل جریان، به وسیله‌ی فشار سیلاب به دیواره‌های سازه اعمال می‌شوند. جابه‌جایی جانبی سازه از لحظه‌ی شروع ریزش سیلاب به داخل سرریز در شکل ۹ مشاهده می‌شود. در تحلیل دینامیکی، با در نظر گرفتن نیروهای اینرسی در پاسخ سازه به بارگذاری نوسانی توسط سیلاب، تنش‌ها به صورت چرخه‌یی کم و زیاد می‌شوند. این حالت ممکن است پدیده‌ی خستگی را برای سازه ایجاد



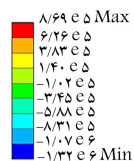
الف) تنش شعاعی X؛



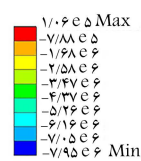
ب) تنش محیطی Y؛



ج) تنش قائم Z؛



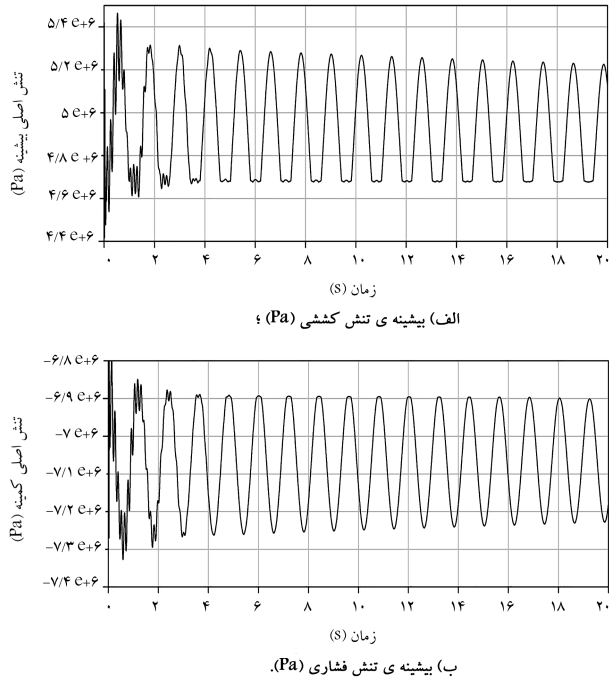
د) تنش اصلی بیشینه؛



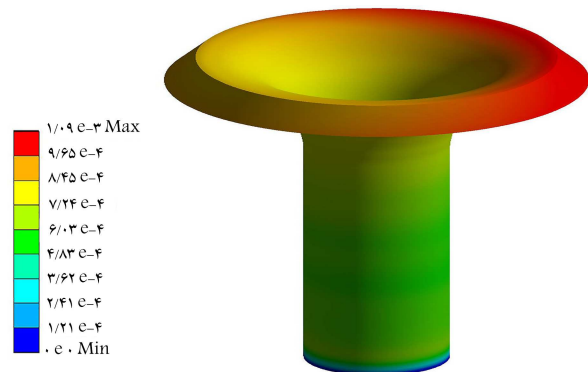
ه) تنش اصلی کمینه.

شکل ۷. کانتور تنش بدنه‌ی سازه سرریز نیلوفوری تحت سناریوی دوم (بار وزن و هیدرواستاتیک). واحدها بر اساس پاسکال می‌باشد.

متقابل ارزیابی شده است. در این حالت، علاوه بر وجود بار وزن و بار هیدرواستاتیک مخزن پر، بار ناشی از ریزش جت ریزشی بر روی تاج و گلوگاه سرریز نیز به عنوان بارگذاری مدنظر قرار گرفته است. به دلیل اینکه جریان سیلاب دارای آشفته‌گی است، نوسان‌های ایجاد شده در اثر آن باید در بارگذاری اعمال شود. این کار به وسیله‌ی مدل آشفته‌گی به کار رفته در پیش‌بینی رفتار جریان انجام می‌پذیرد. شکل ۸، الگوی ریزش جریان سیلاب بر روی تاج سرریز نیلوفوری، هنگام برقراری تعادل بین دبی



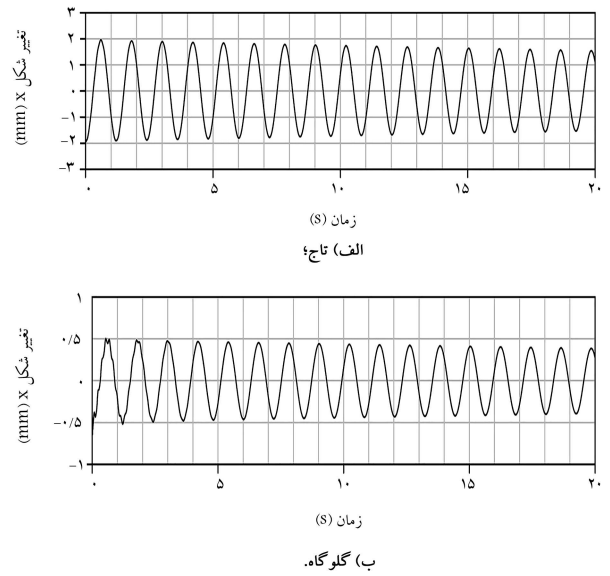
شکل ۱۰. نمودار تاریخچه‌ی زمانی تغییرات بیشینه‌ی تنش‌های فشاری و کششی به‌وجود آمده در سازه‌ی سرریز تحت سناریوی سوم.



شکل ۱۱. تغییر شکل سازه‌ی سرریز تحت سناریوی سوم (پس از به تعادل رسیدن جریان) بر حسب متر.

تغییر شکل رفت و برگشتی سازه بروز می‌کنند. این حرکت رفت و برگشتی، مانند طره، سازه را وادار به نوسان می‌کند. دامنه‌ی نوسان‌های بیشینه‌ی تنش‌های کششی و فشاری در شکل ۱۰ (الف و ب) مشاهده می‌شوند.

پس از رسیدن جریان سیلاب به تعادل، یعنی هنگامی که دبی تخلیه‌ی سرریز نیلوفری با دبی سیلاب برابر شد، از دامنه‌ی نوسان‌ها کاسته و بارگذاری متعادل می‌شود. در قسمت دوم از سناریوی سوم، الگوی حرکت جریان سیلاب در سرریز پایدار و متوسط زمانی پارامترهای هیدرودینامیک جریان ثابت می‌شود و در طول زمان تغییر نمی‌کند. در این حالت نیز وضعیت سازه بررسی شده است. تغییر شکل نهایی سازه پس از به تعادل رسیدن جریان سیلاب بر روی آن در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود. مقدار تغییر شکل بیشینه در این حالت ۱/۱ میلی‌متر است. کاهش تغییر شکل سازه نسبت به سناریوهای پیشین، به علت فشار دینامیکی اعمال شده ناشی از حرکت جریان سیلاب بر قسمت زیرین تاج سرریز (به سمت بالا) و همچنین فشار دینامیکی وارد بر داخل گلوگاه سرریز نیلوفری، ناشی از حرکت ریزشی جت است.



شکل ۹. مقدار جابه‌جایی جانبی سرریز نیلوفری تحت سناریوی سوم (وقوع جریان بر روی سرریز).

کند. در واقع شکل‌گیری جریان آشفته مستلزم دریافت انرژی جنبشی آشفته توسط المان‌های سیال است. ابعاد ساختارهای چرخشی کوچک و بزرگ تولید شده (ادی) توسط نوسان‌های مذکور، بستگی مستقیم به ابعاد مجرا و مقیاس‌های کولموگروف دارد.^[۲۰] این بدین معنی است که در صورت تغییر ابعاد سرریز، میزان بودجه‌ی انرژی جنبشی آشفته‌ی اختصاص‌یافته به جریان، دستخوش تغییر می‌شود. بنابراین علت اصلی بروز حرکت نوسانی در دامنه‌ی کوچک، نوسان‌های ناشی از آشفتگی جریان است. وجود ترم مستهلک‌کننده‌ی انرژی در معادله‌ی انتقال آشفتگی باعث می‌شود انرژی جنبشی نوسانی ایجاد شده، پس از رسیدن ادی‌ها به ریزمقیاس‌های کولموگروف به گرما تبدیل شوند. لذا بیشینه‌ی دامنه‌ی نوسان‌های سازه، از حدود ۲ میلی‌متر تجاوز نمی‌کنند و دامنه‌ی مذکور طی گذر زمان، کم کم رو به کاهش می‌گذارد. همچنین شکل‌ها نشان می‌دهند با نزدیک شدن به تکیه‌گاه گیردار سرریز نیلوفری، از دامنه‌ی نوسان‌های موجود در سازه کاسته می‌شود، و این موضوع با واقعیت مطابقت دارد.

نمودار تاریخچه‌ی زمانی تغییرات بیشینه‌ی تنش‌های فشاری و کششی به‌وجود آمده در سازه‌ی سرریز در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود. این تنش‌ها عمدتاً در قسمت‌های نزدیک به تکیه‌گاه گیردار ایجاد شده‌اند. مقادیر بیشینه‌ی تنش‌ها، نسبت به سناریوهای قبلی تغییراتی داشته است. بیشینه‌ی تنش کششی نسبت به دو سناریوی اول افزایش محسوسی یافته و به ۵/۳ مگاپاسکال رسیده است. این مقدار از مقاومت کششی معمول بتن بیشتر است و می‌تواند منجر به ترک‌خوردگی آن شود. با توجه به مستغرق بودن سازه‌ی سرریز، امکان نشت آب در داخل ترک‌های ایجاد شده و رشد و گسترش آن‌ها محتمل است. این امر ممکن است منجر به خرابی پیش‌رونده‌ی داخل بدنه‌ی سرریز و در نهایت شکست آن شود.

بیشینه‌ی تنش فشاری با مقدار ۷/۳ مگاپاسکال نسبت به سناریوی اول، افزایش و نسبت به سناریوی دوم، اندکی کاهش یافته است. مسئله‌ی مورد توجه، بحث نوسان‌های ایجاد شده در تنش‌های سازه‌ی سرریز است. نوسان‌های مذکور، به علت آشفتگی موجود از جانب جریان سیلاب به پیکره‌ی سازه اعمال می‌شوند و در قالب

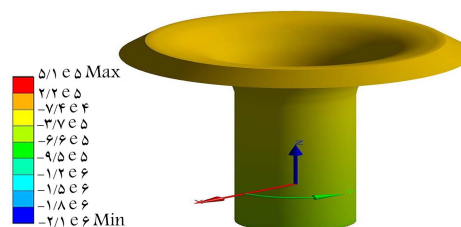
جدول ۴. تنش‌های بیشینه و محل وقوع آن‌ها در سناریوی سوم.

تنش‌ها	مقدار و محل وقوع
بیشینه کششی ق ۱	۵٫۳ مگاپاسکال (دیواره‌ی مجاور تکیه‌گاه)
بیشینه فشاری ق ۱	۷٫۳ مگاپاسکال (دیواره‌ی مجاور تکیه‌گاه)
بیشینه کششی ق ۲	۴٫۸ مگاپاسکال (دیواره‌ی مجاور تکیه‌گاه)
بیشینه فشاری ق ۲	۱۲٫۳ مگاپاسکال (دیواره‌ی مجاور تکیه‌گاه)

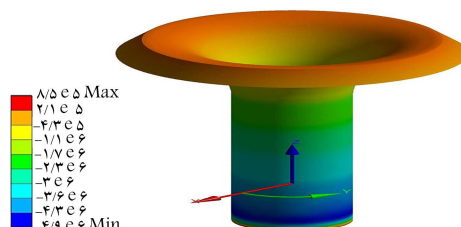
سرریز عمق مشخص و پایداری دارد که باعث بارگذاری وزنی بر روی کل سازه خواهد شد. لذا بیشینه‌ی تنش‌های کششی و فشاری وارد بر المان‌های دیواره‌ی بیرونی و داخلی مجاور تکیه‌گاه گیردار، نسبت به سناریوهای اول و دوم افزایش یافته است. اما بیشینه‌ی تنش کششی با مقدار ۴٫۸ مگاپاسکال، در مقایسه با قسمت اول سناریوی سوم اندکی کاهش از خود نشان می‌دهد. هر چند مقدار تنش کششی همچنان از مقدار معمول مقاومت کششی بتن (حدود ۴ مگاپاسکال) بیشتر است و امکان ترک‌خوردگی و آسیب به بدنه‌ی سرریز وجود دارد. کاهش ذکر شده در بیشینه‌ی تنش کششی، باعث افزایش بیشینه‌ی تنش فشاری در سازه‌ی سرریز طی بخش دوم سناریوی سوم تا حدود ۱۲٫۳ مگاپاسکال شده است. این مقدار از مقاومت فشاری معمول بتن (حدود ۲۰ مگاپاسکال) کمتر است. با توجه به اینکه سرریز نیلوفری برای دبی سیلاب مشخصی طراحی شده است، لذا در صورت اینکه دبی سیلاب افزایش یابد، در داخل سرریز فشار استاتیکی کاهش می‌یابد و تعادل سیستم بارگذاری را از بین می‌برد. زمانی که جریان سیال در بازه‌ی دبی سیلاب طرح برقرار است، پروفیل طراحی‌شده برای تاج سرریز به‌گونه‌ی است که فشار استاتیکی همواره بر روی آن مثبت است. این فشار، از سمت دیواره‌ی داخلی گلوگاه سرریز، بارگذاری را متعادل نگه می‌دارد. بنابراین سرریز نیلوفری هیچ‌گاه نباید از دبی سیلاب طرح، جریان بیشتری را عبور دهد. در جدول ۴، مقدار تنش‌های بیشینه‌ی کششی و فشاری و محل وقوع آن‌ها، طی سناریوی سوم مشاهده می‌شود.

۵. نتیجه‌گیری

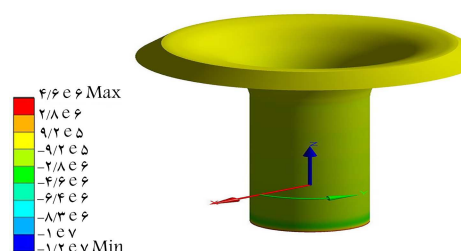
در پژوهش حاضر، اندرکنش سازه و سیال در مورد سازه‌ی سرریز نیلوفری بررسی شده است. انواع حالت‌های ممکن در طول عمر بهره‌برداری از سرریز، طی سه سناریو ارزیابی شده‌اند. سناریوی استاتیکی اول، هنگامی است که مخزن سد خالی باشد. سناریوی استاتیکی دوم، هنگام بر بودن مخزن سد تا تراز تاج سرریز و سناریوی دینامیکی سوم، در حالت اول، هنگام شروع سیلاب و جاری شدن آن بر روی تاج سرریز و در حالت دوم، هنگام به تعادل رسیدن جریان عبوری بر روی آن است. برای شبیه‌سازی اندرکنش دو طرفه، از تلفیق روش حجم محدود برای قسمت دامنه‌ی سیال و المان محدود برای قسمت سازه استفاده شده است. بارگذاری بر سازه از طریق فشار استاتیکی سیال اعمال و پاسخ سازه به بارگذاری انجام شده، به عنوان تغییرشکل شرایط مرزی دیواره‌ی سرریز، بر دامنه‌ی سیال لحاظ شده است. برای قسمت سیال، از مدل ریاضی آشفتگی غیرایزوتروپیک تنش رینولدز استفاده شده است. نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد، بحرانی‌ترین حالت بارگذاری در ایجاد بیشینه‌ی تنش کششی (۵٫۳ مگاپاسکال)، در قسمت اول سناریوی سوم رخ می‌دهد. این مقدار تنش کششی، در حدود ۱۱٫۷۸ برابر تنش کششی سناریوی اول و ۶٫۹ برابر تنش



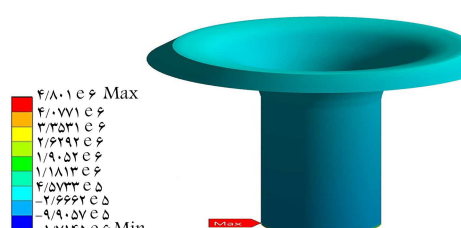
الف) تنش شعاعی X



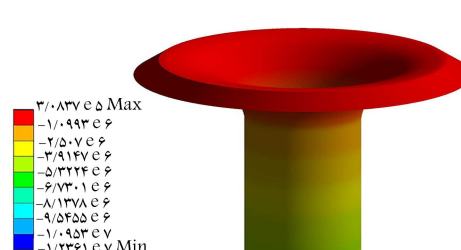
ب) تنش محیطی Y



ج) تنش قائم Z



د) تنش اصلی بیشینه



ه) تنش اصلی کمینه

شکل ۱۲. کانتور تنش بدنه‌ی سازه‌ی سرریز نیلوفری تحت سناریوی سوم (پس از به تعادل رسیدن جریان) واحدها براساس پاسکال هستند.

کانتورهای تنش شعاعی، محیطی، قائم، تنش اصلی بیشینه و کمینه‌ی سازه‌ی سرریز نیلوفری، تحت سناریوی سوم پس از به تعادل رسیدن جریان در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود. پس از به تعادل رسیدن جریان، قسمت‌های داخلی گلوگاه سرریز نیلوفری مملو از آب شده است. بنابراین دیواره‌ی قسمت داخلی آن، در برابر فشار هیدرواستاتیک دیواره‌ی بیرونی، بارگذاری فشاری صورت گرفته و بر تنش‌ها نیز در راستای محور قائم افزوده شده است. علاوه بر این، جریان آب بر روی تاج

۵ درصدی سازه و ترم استهلاک انرژی جنبشی آشفته، به تدریج از دامنه‌ی نوسان سازه می‌کاهد. لذا نتیجه‌گیری می‌شود که شروع جریان سیلاب و سپس تعادل جریان آن بر روی سرریز نیلوفری، بیشترین تنش‌های کششی و فشاری را در سازه ایجاد می‌کنند. لذا پیشنهاد می‌شود برای پژوهش‌های آتی، ظهور جریان گردابی بر روی تاج سرریز، دبی‌های مختلف عبوری از سرریز، آثار خطای ساخت سازه‌ی سرریز و همچنین بارگذاری ناشی از پدیده‌ی خلاءزایی در سازه‌ی سرریز نیلوفری بحث و بررسی شود.

کششی سناریوی دوم است. همچنین بحرانی‌ترین حالت بارگذاری در ایجاد بیشینه‌ی تنش فشاری (۱۲/۳ مگاپاسکال)، در قسمت دوم سناریوی سوم نمود دارد. این مقدار تنش فشاری نیز در حدود ۲/۶۷ برابر تنش فشاری سناریوی اول و ۱/۵۶ برابر تنش فشاری سناریوی دوم است. قسمت اول سناریوی سوم نیز، ایجاد بارگذاری چرخه‌یی را برای سازه‌ی سرریز رقم می‌زند و این احتمال وجود دارد که اضافه تنش‌های ناشی از خستگی، سازه را تحت تأثیر قرار دهند. بنا به آنچه نتایج تحلیل نشان می‌دهد، میرایی

پانویس‌ها

1. Navier-Stokes
2. reynolds averaged navier-stokes (RANS)
3. spalart-allmaras
4. K- ϵ
5. K- ω
6. Boussinesq hypothesis
7. anisotropic
8. RSM
9. Maynard
10. Cassidy
11. Betts
12. Olsen & Kjellesvig
13. Hou
14. Grandmont & Maday
15. Liaw & Chopra
16. Goyal
17. Seo
18. pitting

منابع (References)

1. Launder, B.E., Reece, G.J. and Rodi, W. "Progress in the development of a Reynolds stress turbulence closure", *J. Fluid. Mech.*, **68**(3), pp. 537-566 (1975).
2. Hinze, J.O. "Turbulence, in mechanical engineering", 2th Edn., McGraw-Hill Education, New York, US (1975).
3. Hinze, P.A. and Pettersson-Reif, B.A. "Statistical theory and modeling for turbulence flow", Wiley, UK (2011).
4. Maynard, S.T. "General spillway investigation", Technical Report HL-85-1, Waterways Exp. Station, Corps of Eng., MS, submitted to Dep. of the US Army (1985).
5. Cassidy, J.J. "Irrotational flow over spillways of finite height", *J. Engrg. Mech. Div.*, **91**(6), pp. 155-173 (1965).
6. Betts, P.L. "A variation principle in term of stream function for free surface flows and its application to finite element method", *Comp. Flu.*, **7**(2), pp. 145-153 (1979).
7. Li, W., Xie, Q. and Chen, C.J. "Finite analytic solution of flow over spillways", *J. Engrg. Mech.*, **115**(12), pp. 2635-2648 (1989).
8. Olsen, N.R. and Kjellesvig, H.M. "Three-dimensional numerical flow modeling for estimation of spillway capacity", *J. Hyd. Res.*, **36**(4), pp. 775-784 (1998).
9. Mirabi, M.H. and Mansoori, A. "Assessment of multi-equation mathematical models of turbulence in estimation of hydrodynamic parameters at submerged jet", *J. Modares. Civ. Eng.*, **17**(6), pp. 245-258 (2018).
10. Hou, H., Wang, J. and Layton, A. "Numerical method for fluid-structure interaction- A review", *Comm. Comp. Phys.*, **12**(2), pp. 337-377 (2015).
11. Grandmont, C. and Maday, Y. "Fluid-structure interaction: A theoretical point of view", *J. Comp. Mech.*, **9**(6-7), pp. 633-653 (2012).
12. Liaw, C.Y. and Chopra, A.K. "Dynamics of tower surrounded by water", *Eart. Eng. Struct. Dyn.*, **3**(1), pp. 33-49 (1974).
13. Goyal, G.A. and Chopra, A.K. "Earthquake analysis of intake-outlet towers including tower-water-foundation-soil interaction", *Eart. Eng. Struct. Dyn.*, **18**(3), pp. 325-344 (1989).
14. Razavi, A.R. and Ahmadi, H. "Three-Dimensional simulation of flow field in morning glory spillway to determine flow regimes (Case Study: Haraz Dam)", *Civil. Eng. Jou.*, **3**(11), pp. 1133-1145 (2017).
15. Seo, I.W., Kim, Y.D., Park, Y.S. and et al. "Spillway discharges by modification of weir shapes and overflow surroundings", *Env. Earth. Sci.*, **75**(496), pp. 112-125 (2016).
16. Enjilzadeh, M.R. and Nohani, E. "Numerical modeling of flow field in morning glory spillway and determining rating curve at different flow rates", *Civil. Eng. J.*, **2**(9), pp. 448-457 (2016).
17. Chopra, A.K. "Dynamics of structures", 4th Edn., Pearson Education, Boston, MA, US (2012).
18. USBR, "Design of small dams", 3th Edn., US. Dep. of Interior (1987).
19. Peterka, A.J. "The effect of entrained air on cavitation's pitting", 5th IAHR. Cong., pp. 507-518 (1953).
20. Landahl, M.T. and Mollo-Christensen, E. "Turbulence and random processes in fluid mechanics", Cambridge University Press, UK (1990).