

بررسی اثرات تقویت کارایی بتن بر پاسخ دینامیکی غیر خطی سد بتنی وزنی (مطالعه ی موردی سد سفیدرود)

سید مهدی موسوی نژاد^۱، محمد رضا شکاری^{۲*}

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران، کارشناس ارشد دفتر طرح های عمرانی دانشگاه یزد

۲- دانشیار دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، مرکز آموزش عالی استهبان- دانشگاه شیراز، استهبان، ایران

(نویسنده مسئول) shekari.2291@gmail.com

چکیده

کارکرد ایمن سدها در تکنولوژی سدسازی دارای اهمیت شایان توجهی است و لذا ساخت سدهای ایمن به اولویت تمامی طراحان حوزه سدسازی تبدیل شده است. همچنین در کنار سدهای ساخته شده اخیر، سدهایی وجود دارند که در سالهای دور و با معیارهای ایمنی گذشته بنا و ساخته شده‌اند. نتایج برخی پژوهش‌ها نشان می‌دهد، در مواردی سدهای بتنی وزنی دارای عملکرد کاملاً مطمئن نیستند و از همین رو ارزیابی ایمنی این سازه‌ها از اهمیتی قابل ذکر برخوردار است. در این تحقیق رو به منظور بررسی تأثیر هندسه سدهای بتنی وزنی در کنترل تنش های جداره سازه مطالبی ارائه شده است که جهت کنترل موردی آنها از سد سفیدرود بهره‌گیری شده است. ساختار سدهای وزنی به گونه‌ای است که پاسخ دینامیکی آنها وابستگی زیادی به محیط اطرافشان دارد و اثرات اندرکنش محیط مجاور مانند اندرکنش آب درون مخزن سد و انعطاف پذیری پوسته سد تأثیر بسزایی در پاسخ سد خواهد داشت. اکثر سدهای وزنی تحت بارهای سرویس و حرکات متوسط زمین ترک خواهند خورد. عموماً برای تحلیل حوزه زمان سدهای وزنی از روشهای تاریخچه زمانی و استاتیکی (تحلیل بار افزون) استفاده می‌شود. هدف از انجام تحقیق پیش‌رو، ارائه الگوی بار مناسبی برای تحلیل حوزه زمانی (خطی و غیرخطی) سد بتنی وزنی است. قیود مورد بررسی در این تحقیق شامل محدودیت هایی برروی تغییر شکل های اصلی در بدنه سد می باشند. جهت تحلیل دینامیکی سد در حالت خطی و غیرخطی مصالح، از نرم افزار آباکوس استفاده شده و سپس برای سد مخزنی سفیدرود تحلیل های حوزه زمان با طیف و رکورد زمین لرزه های مختلف انجام شده است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که، تقویت کارایی بتن می‌تواند تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر ساختار هندسی سد داشته باشد.

کلمات کلیدی: هندسه سد بتنی وزنی، سد سفیدرود، اندرکنش سد و مخزن، تحلیل دینامیکی حوزه زمان.

۱. مقدمه

با گسترش و رشد روزافزون علم و صنعت سدسازی در جهان، و نیز با توجه به ضرورت روزافزون احداث چنین سازه‌هایی در شرایط و محل های صعب العبور، مهم ترین چالش پیش روی صنعت سدسازی پیدا نمودن راهکارهایی برای غلبه

بر محدودیت‌های فنی موجود برای انواع متعارف و کلاسیک سدها و همچنین ارائه گزینه‌های اقتصادی‌تر احداث سدها در شرایط طبیعی نامطلوب و با امکانات اجرایی محلی مطرح می‌باشد.

زمین‌لرزه، از جمله مهمترین پارامترهایی است که می‌تواند اثرات مخرب بر روی سدها را به بار آورد. در دهه‌های اخیر سدهای بتنی زیادی ساخته شده و انتظار می‌رود که تعداد زیادتری نیز در مناطق مستعد ایجاد زمین‌لرزه ساخته شود. این سدها دیر یا زود علاوه بر عوامل زیان‌آور معمولی، در معرض زمین‌لرزه‌های مهمی نیز قرار خواهند گرفت. از آنجا که افراد زیادی در نقاط پایین دست این سازه‌ها زندگی می‌کنند، لازم است توجه فزاینده‌ای به ایمنی آنها در مقابل زلزله معطوف گردد. برای ارزیابی ایمنی و پایداری سدها نیز، لازم است که رفتار لرزه‌ای آنها به طور مقتضی بررسی شده و چگونگی عملکرد و نقاط ضعف آنها تحلیل و بررسی شود.

چوپرا در سال ۱۹۶۸، اثرات تراکم پذیری آب مخزن سد را روی نیروی ناشی از اندرکنش سازه و سیال بررسی کرد و با در نظر گرفتن تاثیر انعطاف پذیر بودن پوسته سازه، نیروهای اندرکنش سد را به صورت سیستمی شامل جرم، میراگر و فنر تحلیل کرد. در ادامه، چوپرا مدل سد-مخزن را برای محاسبه پاسخ سد تحت اثر شتاب افقی زمین‌لرزه، با در نظر گرفتن اندرکنش سد و مخزن آنالیز کرد و نتیجه گرفت که هنگام در نظر گرفتن اثرات اندرکنش سد و مخزن، پاسخ نسبت به حالتی که از اثر اندرکنش صرف نظر می‌شود، به طور قابل توجهی افزایش پیدا می‌کند [۲۱].

سبزواری در سال ۱۳۸۷ به تحلیل پایداری سدهای بتنی وزنی با استفاده از روش مدل سازی عددی پرداخت. بررسی پایداری سدهای بتنی وزنی از لحاظ واژگونی، لغزش، تحلیل تنش‌ها و گسترش ترک‌ها در سدهای بتنی وزنی براساس بارهای وارده بر سد از جمله فشارهای آب ایستایی و زمین‌لرزه حائز توجه است [۳]. اندرکنش جسم جامد و مایع در تماس با آن از مسائل مهم در مهندسی است. این بحث در طراحی سازه‌های مربوط به نیروگاه‌های هسته‌ای، سازه‌های دریایی، سازه‌های دارای مایعات مانند مخازن آب و سیستم‌های سد-مخزن و انواع دیگر سیستم‌ها که سازه در اندرکنش با سیال است اهمیت دارد. خان محمدی و همکارانش در سال ۱۳۹۰ ارزیابی روش‌های اویلری و لاگرانژی در پاسخ سدهای بتنی وزنی با احتساب اندرکنش سد-پی-مخزن تحت اثر زلزله پرداختند [۴]. پورتنقی و همکارانش نیز در سال ۱۳۹۰ به تحلیل تاثیر اندرکنش آب و سازه در تخمین فشار هیدرودینامیکی وارد بر سد بتنی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی پرداختند. آنها در مطالعه خود به تخمین فشار هیدرودینامیکی وارد بر سد بتنی وزنی تحت اثر تحریک زلزله پرداختند [۵]. میارنعمی و همکارانش در سال ۱۳۹۵ به بررسی عملکرد روشهای فرم و مونتکارلو در محاسبه احتمال خرابی لغزشی سد بتنی وزنی تحت بارهای استاتیکی پرداختند [۶].

بررسی اندرکنش دینامیکی سد و مخزن و مرز متداخل جامد انعطاف پذیر که دارای حرکت متأثر از شرایط جریان است عموماً به یک مسئله غیرخطی منجر خواهد شد. با توجه به ساختار پیچیده مسائل غیرخطی دینامیک سیالاتی، استفاده از روشهای تحلیل عددی و دینامیک سیالات محاسباتی در بحث اندرکنش سیال-جامد یکی از راههای موثر جهت دسترسی به تحلیل‌های مطمئن و سریع است. زو و همکارانش در سال ۲۰۱۹ با بهره‌گیری از مدل‌سازی آزمایشگاهی و اندازه‌گیری امپدانس الکترومکانیکی به بررسی آسیب لرزه‌ای سدهای بتنی وزنی تحت زلزله پرداختند. آنها در تحقیق انجام شده به این مهم رسیدند که با بهره‌گیری از تکنیک امپدانس الکترومکانیکی براحتی می‌توان آسیب و عملکرد لرزه‌ای سدهای بتنی وزنی را پیش‌بینی نمود [۷]. گورای و مایتی در سال ۲۰۱۹ به بررسی پاسخ لرزه‌ای سدهای بتنی وزنی تحت زلزله‌های میدان دور و میدان نزدیک پرداختند. آنها با استفاده از ۱۲ رشته رکورد زلزله از روشهای المان محدود و درگیر معادلات اندرکنش برای بررسی پاسخ سیستم بهره‌گرفتند. آنها جهت برنامه‌ریزی روش اجزا محدود از معادله هلمولتز استفاده نموده و در نرم افزار متلب برنامه‌نویسی نمودند [۸]. شارما و همکارانش در سال ۲۰۲۰ با بهره‌گیری از مدل‌سازی زمان-فضای اجزاء محدود به بررسی پدیده شکست لرزه‌ای سدهای بتنی وزنی تحت زلزله پرداختند. آنها در بررسی‌های انجام شده به این نتیجه دست یافتند که پدیده اندرکنش بین سد و آب باعث تشدید تغییر مکان‌های تاج سد شده و تنش در بدنه سد را افزایش می‌دهد [۹]. اخیراً مرادلو و ادیب براساس الگوریتم یادگیری ماشین به بررسی میزان آسیب پذیری

سدهای بتنی وزنی پرداخته اند. استفاده صحیح و مناسب از این الگوزیم می تواند، به عنوان ابزاری جهت کنترل و مدیریت آسیب وارده بر چنین سازه هایی هنگام وقوع زلزله مورد استفاده قرار بگیرد [۱۰].

۲. مدل سازی در نرم افزار اجزا محدود

آباکوس علیرغم اینکه مجموعه قابلیت های بسیار گسترده ای را در استفاده از نرم افزار اختیار کاربر قرار می دهد، کار نسبتاً ساده ای می باشد. پیچیده ترین مسایل را می توان براحتی مدل کرد. به عنوان مثال مسایل شامل بیش از یک جزء را می توان با تولید مدل هندسی هر جزء و سپس نسبت داده رفتار ماده مربوطه به هر جزء و سپس مونتاژ اجزاء مختلف مدل کرد. در اغلب شبیه سازی ها، حتی مدل های با درجه غیر خطی بالا، کاربر می بایست تنها داده های مهندسی نظیر هندسه مساله، رفتار ماده مربوط به آن، شرایط مرزی و بارگذاری آن مساله را معین کند.

این نرم افزار قابلیت بررسی و تحلیل مسایل از یک تحلیل خطی ساده تا پیچیده ترین مدلسازی غیر خطی را دارا می باشد. همچنین حاوی یک سری المانهای گسترده می باشد که هرگونه هندسه ای را می توان توسط این المان ها مدل سازی کرد. همچنین دارای مدل های رفتاری بسیار زیادی است که در مدلسازی انواع مواد با رفتار و رفتار گوناگون نظیر فلزات، لاستیک ها، پلیمرها، کامپوزیت ها، بتن مسلح، فومهای فنی و نیز شکننده و همچنین مصالحی ژئوتکنیکی نظیر خاک و سنگ، قابلیت بسیار زیادی را ممکن می سازد. نظر به اینکه آباکوس یک ابزار مدلسازی عمومی و گسترده است، بهره گیری از آن تنها محدود به تحلیل مسائل مکانیک جامدات (یعنی مسئله تنش - کرنش) نمی شود. با بهره گیری از این نرم افزار می توان مسایل گوناگونی نظیر انتقال حرارت، نفوذ جرم، تنش های حرارتی اجزاء الکتریکی، اکوستیک، تراوش و پیرو الکتریک را مورد تحلیل قرار داد.

از محاسن این نرم افزار نسبت به دیگر نرم افزارهای موجود می توان به توان بالای تحلیل مسائل غیرخطی نظیر تغییر شکلهای بزرگ و رفتار پلاستیک، تحلیل شکست قطعات و گسترش ترک اشاره نمود. بدین ترتیب می توان گسترش دینامیکی ترک را در مواد ایزوتروپ و مواد مرکب تحلیل و بررسی نمود. توانایی ویژه در حوزه مسائل مربوط به مواد کامپوزیت و توانایی حل مسائل گوناگون به دو روش ضمنی و صریح، از خصوصیات این نرم افزار می باشد.

۳. روابط حاکم

در این بخش از تحقیق، تحلیل فشار هیدرودینامیکی ناشی از ارتعاش مایع تحت اثر تحریک زلزله با در نظر گرفتن فرضیات زیر انجام می شود:

- ۱- سیال ایده ال و همگن فرض می شود.
 - ۲- از ویسکوزیته سیال صرف نظر می شود.
 - ۳- دامنه امواج کوچک فرض می شود.
 - ۴- عدد رینولدز کوچک فرض می شود (چشم پوشی از اثرات آشفتگی در جریان سیال)
 - ۵- فرض می شود که میدان سیال غیر چرخشی است و پدیده جدایی اتفاق نمی افتد.
- حال با در نظر گرفتن ذره ای از سیال به ابعاد Δx و Δy و Δz با جرم Δm ، مجموعه نیروهای اعمالی به این ذره را در رابطه زیر می آوریم:

$$\sum F = \rho(\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z) a \quad (1)$$

با فرض اینکه سیال نیوتنی باشد داریم :

$$\tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) \quad (2)$$

$$\sigma_x = -P + 2\mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} - \frac{1}{3} \vec{\nabla} \cdot \vec{V} \right) \quad (3)$$

برایتنش برشی در سایر جهات نیز می توان رابطه خطی بین لزجت دینامیکی و سرعت نوشت. از جایگذاری رابطه اخیر در معادله حرکت و صرفنظر کردن از ویسکوزیته داریم :

$$\rho \cdot g_x - \frac{\partial P}{\partial x} = \rho \cdot a_x \quad (4)$$

و در حالت کلی معادله فوق به شکل زیر در می آید :

$$\rho \cdot g - \nabla P = \rho \cdot a \quad (5)$$

این معادله به معادله اولر مشهور است. و با انتگرال گیری خواهیم داشت :

$$-\rho \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} \right) + \rho g (H - Z) = P \quad (6)$$

که در آن ترم $\rho g (H - Z)$ یعنی ترم هیدرواستاتیک فشار و ترم ثانویه ترم هیدرودینامیکی فشار. حال فرض می کنیم که مایع تراکم پذیر خطی باشد. پس در بازه زمانی $\Delta t = t - t_0$ داریم :

$$k \varepsilon_v = \Delta P_d \quad (7)$$

که در این رابطه k مدول با لک و ε_v کرنش حجمی مایع را نشان میدهد. از طرفی برای کرنش حجمی رابطه زیر برقرار است :

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta \left(\frac{m}{\rho} \right)}{\frac{m}{\rho_0}} = - \frac{\Delta \rho}{\rho_0} \quad (8)$$

که در این رابطه m و V_0 و ρ_0 به ترتیب مقادیر جرم، حجم و چگالی اولیه میباشند. در نتیجه داریم :

$$\Delta \rho \cdot \frac{K}{\rho} = \Delta P_d \quad (9)$$

با تقسیم بر Δt و میل دادن آن به صفر رابطه بالا به صورت زیر در می آید :

$$\frac{\partial P_d}{\partial t} = \frac{K}{\rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (10)$$

با جایگذاری مقدار P_d و استفاده از معادله بقاء جرم داریم :

$$\nabla^2 \phi - \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = 0 \quad (2-26)$$

معادله فوق به معادله هلمولتز مشهور است و پایه حل مسائل ارتعاشات در سیالات تراکم پذیر است (میرزایی و خاجی، ۱۳۸۸).

۴. شرح مدل سازی و تحلیل نتایج

در این بخش از مطالعه ابتدا به کلیاتی در مورد سازه‌ی مورد بررسی، پرداخته می‌شود و خصوصیات مکانیکی مصالح به

کار رفته در مدل سازه مورد معرفی قرار می گیرد. در ادامه، به مرور نتایج به دست آمده از تحلیل مدل در نرم افزار آباکوس پرداخته می شود و در نهایت پاسخ های به دست آمده تحلیل می گردند.

سازه ای که در این تحقیق مورد بحث قرار گرفته است، سد سفیدرود واقع در استان گیلان می باشد. در اثر زلزله مخرب ۳۱ خرداد ماه ۱۳۶۹ این سد دچار خسارات و صدمات جدی شد، لیکن منهدم نگردید. با توجه به خسارت وارد به سد امکان بهره برداری بیشتر از آن در آینده وجود نداشت (شکل ۱)



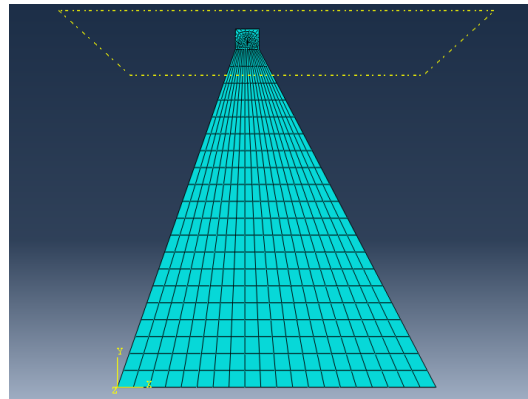
شکل ۱- شمایی از سد بتنی وزنی سفیدرود

جهت مدل سازی سد در نرم افزار، از مرتفع ترین مونولیت این سد استفاده می شود. ارتفاع این مونولیت ۱۰۶ متر و عرض آن در پی و تاج به ترتیب ۱۰۲ و ۸ متر می باشد. ارتفاع مخزن پشت سد ۱۰۲ متر و طول آن نیز ۳ برابر ارتفاع مخزن، یعنی ۳۰۶ متر فرض می شود. در جداول (۱) و (۲) خصوصیات فیزیکی سیال درون مخزن و بتن به کار رفته در بدنه ی سد نشان داده شده است.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی سیال مخزن		جدول ۲- مشخصات فیزیکی بتن به کار رفته در بدنه ی سد	
پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
مدول بالک k- (GPa)	2.07	مدول الاستیسته E- (GPa)	20
چگالی ρ- (kg/m ³)	1000	ضریب پواسون ν-	0.167
		ضریب میرایی α	1.95
		ضریب میرایی β	0.0011
		چگالی ρ- (kg/m ³)	2500

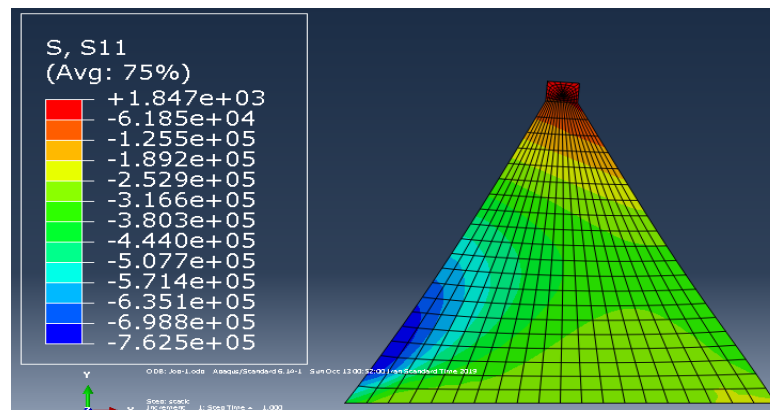
ابتدا سازه سد را در نرم افزار آباکوس مدل سازی کرده و سپس سازه را تحلیل نمودیم. در قسمت زیر سازه المان بندی شده نشان داده شده است. المان های استفاده شده برای بدنه ی سد نیز از نوع المان تنش صفحه ای (Plane Stress) چهار گرهی می باشد (شکل ۲).

هدف از انجام تحلیل های حاضر شناخت رفتار تنش-کرنشی سازه با مقاومت های فشاری متفاوت تحت اثر نیروی زلزله می باشد. در کلیه تحلیل های بالا مقاومت فشاری بتن ۲۱ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. حال برای درک بهتر رفتار سازه ای بر طراحی نواحی مختلف سد، بتن را با مقاومت ۸۰ و ۱۵۰ مگاپاسکال در نظر گرفته و نتایج را مورد بررسی قرار می دهیم. به منظور تحلیل دینامیکی سازه سد از شتابنگاشت زلزله بم، نورتریج و چی چی استفاده می شود. شتابنگاشت ها ابتدا همپایه و سپس به سازه وارد می شود.



شکل ۲- نمایی از مدل سد به همراه مش بندی

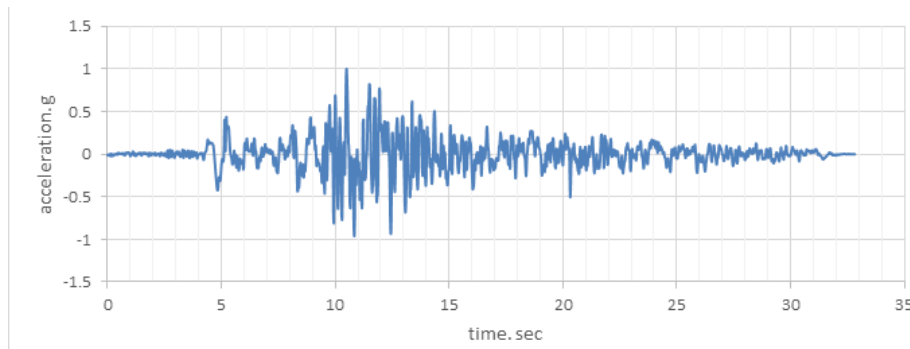
در شکل (۳) بخشی از نتایج تحلیل استاتیکی سد ارائه گردیده است. همان گونه که از نتایج مشاهده می شود، بیشترین تنش در قسمت پاشنه سد می باشد و قسمت های بالا تنش کمتری را احساس می کنند.



شکل ۳- تنش صفحه ای در بدنه سد

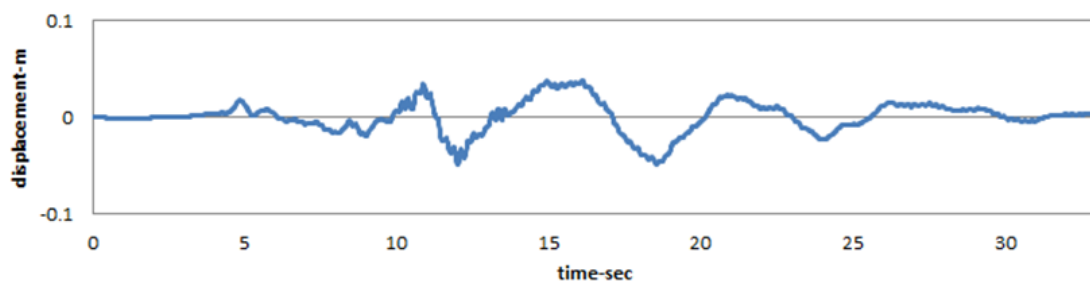
نتایج کمی تحلیل ها بیانگر این مطلب است که، قسمت های بالایی سد کرنش بیشتری را تجربه می کنند و در کانتورها اثر فشار هیدرواستاتیکی وارد شده به بدنه را به وضوح نشان می دهد؛ به نحوی که، با کاهش عرض بدنه مقدار کرنش نیز قطعاً افزایش می یابد. در این راستا می توان دریافت، بیشترین تنش در قسمت تاج سد می باشد و قسمت پاشنه تنش کمتری را تجربه می کند.

بخشی از تحلیل های دینامیکی به آنالیز حوزه زمان پاسخ سازه تحت تأثیر زلزله بم بوده است. در شکل (۴) شتابنگاشت زلزله بم نشان داده شده است. رکورد مورد استفاده شتابنگاشت زلزله بم دارای $PGA = 0.828$ می باشد.



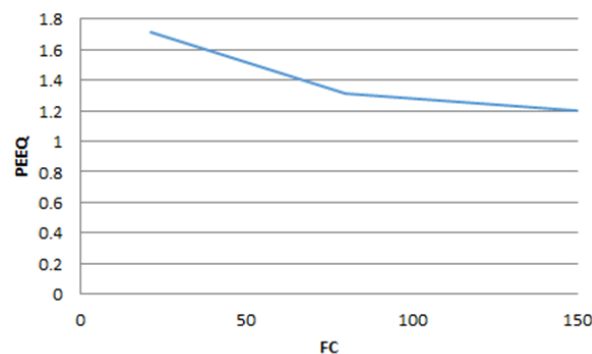
شکل ۴- شتاب نگاشت زلزله بم

پس از بارگذاری لرزه ای به سازه، با انتخاب یک گره در تاج سازه سد نتیجه زیر بدست آمد که در شکل (۵) نمایش داده شده است.



شکل ۵- شتاب نگاشت زلزله بم

همانطور که از نتایج شکل مشخص است، بیشینه جابجایی تاج سد در زمان تقریبی 18 ثانیه رخ داده است، و مقدار آن 4.6 سانتیمتر است. نکته قابل توجه این است که زمان مذکور با بیشینه شتاب زمین تطابق ندارد. بنابراین رخداد پدیده آسیب به بدنه سد بسیار به محتوای فرکانسی شتاب زمین ارتباط دارد. در ادامه، قسمتی از نتایج نیز به تحلیل کرنش در بدنه سد اختصاص یافته است، که قسمتی از نتایج آن در شکل (۶) ارائه شده است. با توجه به نتایج مشخص است که افزایش مقاومت فشاری باعث کاهش قابل تغییر شکل های بدنه سازه می گردد.

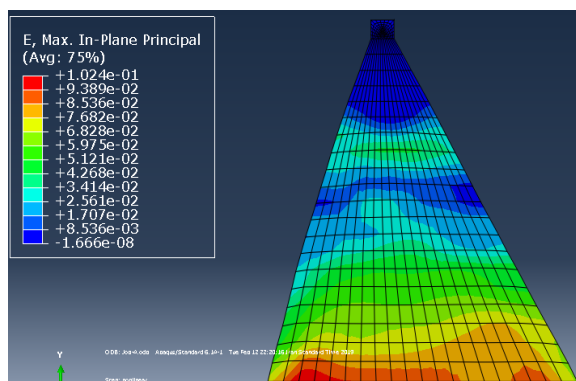


شکل ۶- تغییرات مقاومت فشاری-کرنش اصلی حداکثر بر حسب مگاپاسکال

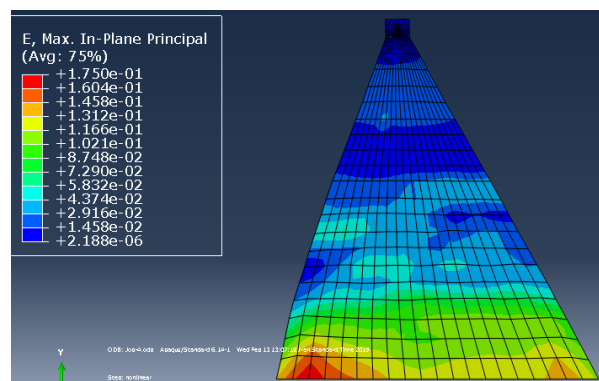
با بررسی نتایج تحلیل ها مشاهده می گردد، مقادیر تنش ها با افزایش مقاومت فشاری افزایش، و کرنش ها و تغییرمکان ها هم محدود می شوند.

براساس تحلیل های انجام شده می توان دریافت، که مقاومت بتن در کشش بسیار کم تر از مقاومت آن در فشار می باشد. از این رو، نقاط بحرانی بدنه ی سد، از لحاظ وارد شدن نیروی کششی می بایست شناسایی گردد. براساس آنالیزهای دینامیکی صورت گرفته، پاشنه ی سد و بالادست و پایین دست گردن سد، به عنوان نقاط بحرانی از لحاظ وارد شدن تنش های کششی می باشند.

در شکل ۷ نتایج تحلیل غیر خطی بدنه سد برای کرنش در بدنه سد در نقطه اوج زلزله نشان داده شده است. با توجه به نتایج، زمانی که مقاومت فشاری بتن کاهش پیدا کند در نقاط نزدیک به پاشنه و پنجه سد کرنش های نسبتاً بالایی رخ داده است.



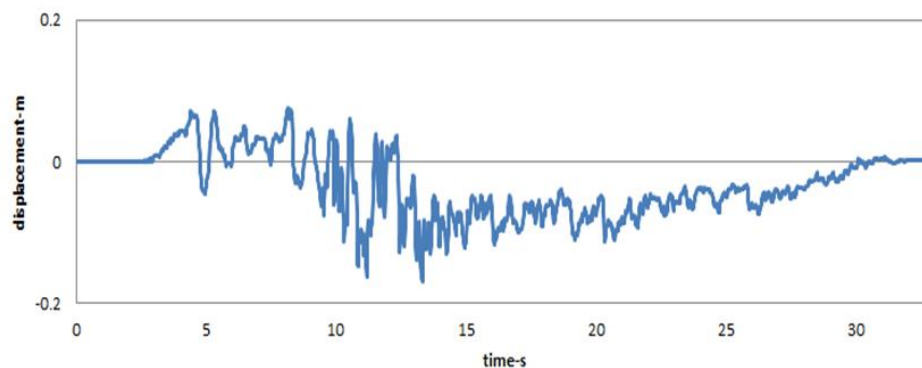
ب- مقاومت فشاری ۱۵ مگاپاسکال



الف- مقاومت فشاری ۲۱ مگاپاسکال

شکل ۷- کانتور کرنش اصلی بدنه سد در نقطه اوج زلزله

در ادامه تحلیل غیر خطی نتایج بارگذاری لرزه ای به سازه، با انتخاب یک گره در تاج سازه سد و یک گره در پاشنه نتیجه زیر بدست آمد که در شکل (۸) نمایش داده شده است.



شکل ۸- تغییرمکان نسبی تاج سد نسبت به پاشنه

همانطور که از نتایج شکل مشخص است، بیشینه جابجایی نسبی در زمان تقریبی ۱۸.۵ ثانیه رخ داده است، و مقدار آن ۱۸ سانتیمتر است. واضح است که زمان مذکور با بیشینه شتاب زمین تطابق ندارد. بنابراین رخداد پدیده کرنش غیر خطی به نقطه رخداد حداکثر شتاب زمین الزاماً ارتباطی ندارد.

۵. نتیجه گیری

با توجه به نتایج تحلیل حاضر می توان دریافت، که تحلیل دینامیکی غیر خطی می تواند منجر به نتایج متفاوتی نسبت به سایر تحلیل های خطی گردد. با توجه به نتایج می توان دریافت که افزایش مقاومت فشاری باعث کاهش قابل ملاحظه کرنش در بدنه سازه می گردد که البته اثرات آن در افزایش ناخواسته تنش در برخی نقاط از بدنه سازه است. از سویی دیگر می دانیم، مقاومت بتن در کشش بسیار کم تر از مقاومت آن در فشار می باشد. از این رو، نقاط بحرانی بدنه ی سد، از لحاظ وارد شدن نیروی کششی می بایست شناسایی گردد. براساس تحلیل های انجام شده، پاشنه ی سد و بالادست و پایین دست گردن سد، به عنوان نقاط بحرانی از لحاظ وارد شدن تنش های کششی می باشند. نتایج تحلیل غیر خطی نشان داد، زمان رخداد بیشینه جابجایی تاج سد الزاماً با زمان رخداد بیشینه شتاب زمین تطابق ندارد، بنابراین رخداد پدیده آسیب به بدنه سد بسیار به محتوای فرکانسی شتاب زمین ارتباط دارد.

۶. مراجع

1. Chopra, A. K. (1968), "Earthquake behavior of reservoir-dam systems," Journal of engineering mechanics division, **94**, pp 1475-1500.
2. Chopra, A. K., (1970), "Earthquake response of concrete gravity dams," Journal of engineering mechanics division, **96**, pp 443-454.
- ۳- سبزواری، ت. (۱۳۸۷)، "تحلیل پایداری سدهای بتنی وزنی با استفاده از نرم افزار CADAM2000"، مجله مهندسی آب. شماره ۲، ۱۱-۲۲.
- ۴- خان محمدی، ل.، واثقی امیری، ج و نوائی نیا، ب. (۱۳۹۰)، "ارزیابی روش های اویلری و لاگرانژی در پاسخ سدهای بتنی وزنی با احتساب اندرکنش سد -پی -مخزن تحت اثر زلزله"، مجله علمی -پژوهشی، عمران مدرس، دوره یازدهم، شماره ۴.
- ۵- پورتنقی، ا.، پورباقری، ح.، پاسبانی خیای، م. و اشتیری، پ. (۱۳۹۰)، "بررسی تاثیر اندرکنش آب و سازه در تخمین فشار هیدرو دینامیکی وارد بر سد بتنی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی"، اولین کنفرانس بین المللی سد و نیروگاه برقابی.
- ۶- میارنعمی، م.، عزیزیان، غ و اکبری، غ، (۱۳۹۵)، "ارزیابی عملکرد روش های فرم و مونت کارلو در محاسبه احتمال خرابی لغزشی سد بتنی وزنی تحت بارهای استاتیکی"، مجله عمران مدرس، دوره ۱۶، شماره ۳، ۲۴۰-۲۲۷.
7. Shaoyu, Z., Shuli, F., Jianyun, C. (2019), "Quantitative assessment of the concrete gravity dam damage under earthquake excitation using electro-mechanical impedance measurements," Engineering Structures, **191**, pp 162-178.
8. Soumya, G., Damodar, M. (2019), "Seismic response of concrete gravity dams under near field and far field ground motions," Engineering Structures, **119**, 109292.
9. Sharma, V., Fujisawa, K., Murakami, A. (2020), "Space-time FEM with block-iterative algorithm for nonlinear dynamic fracture analysis of concrete gravity dam," Soil Dynamics and Earthquake Engineering, **131**, 105995.

10. Adib, A., Moradloo, A. J. (2026) ,“Seismic damage prediction in concrete gravity dams using a new framework based on Machine learning,” International Journal of Solids and Structures, **333**, 113928.

۱۱- میرزایی، م.، خاجی، ن.، (۱۳۸۸)، "تأثیر مرز دوردست در توزیع فشار هیدرودینامیکی وارد بر سدهای بتنی وزنی،" هشتمین کنگره بین المللی مهندسی عمران.