

# مقایسه روش‌های مودال وابسته و غیروابسته در تحلیل لرزه‌های سدهای بتنی وزنی در محدوده زمان

علی سمیعی<sup>i\*</sup>؛ وحید لطفی<sup>ii</sup>

## چکیده

با وجود ارائه روش‌های فراوان برای تحلیل دینامیکی سدهای بتنی در دامنه زمان، مطالعات برای یافتن روش‌هایی با کارایی بالاتر مورد توجه است. با توجه به لزوم تعیین پاسخ سد تحت رکوردهای گوناگون، روش مودال می‌تواند به طور مؤثری سرعت و کارایی تحلیل را بهبود بخشد. در این مقاله دو روش مودال برای تحلیل دینامیکی سدهای بتنی وزنی در اندرکنش با آب مخزن (با درجات آزادی فشار) مطالعه شده‌اند. روش مودال وابسته با استفاده از مدهای سیستم وابسته سد و مخزن به تحلیل مسأله می‌پردازد و روش مودال غیروابسته از مدهای مجزای بدنه سد و آب مخزن برای تحلیل استفاده می‌کند. تعیین مدهای وابسته با توجه به نامتقارن بودن مسأله مقادیر ویژه متناظر با آن، با پیچیدگی‌هایی همراه است. گرچه حل معادله حرکت سیستم با این روش بسیار سریع انجام می‌شود، در روش مودال غیروابسته به علت تقارن مسأله مقادیر ویژه مربوط به آن، سرعت تعیین مدها زیاد است. حل معادله حرکت دینامیکی نیز در این روش با سرعت مناسب انجام پذیر است. در پایان، یک سیستم سد و مخزن نمونه مورد تحلیل قرار گرفته است. انجام تحلیل با دو روش مورد بررسی، نشان از کارایی بالای آنها به واسطه کاهش محاسبات و حافظه مورد نیاز در تحلیل دارد.

## کلمات کلیدی

سد بتنی وزنی، روش مودال غیروابسته، مدهای وابسته، روش نیومارک

## *Comparison of Coupled and Decoupled Modal Approaches in Seismic Analysis of Concrete Gravity Dams in Time Domain*

Ali Samii, Vahid Lotfi

### ABSTRACT

In spite of the fact that different methods are available for dynamic analysis of concrete dams, researchers are still studying other more efficient alternatives. Modal approach can highly improve the efficiency of analysis, since the response of dam must be generally calculated for several earthquake ground motion records. In this paper, two different methods have been considered for dynamic analysis of concrete gravity dams including dam-reservoir interaction (with pressure degrees of freedom for fluid domain). The coupled modal approach utilizes the coupled modes of the system for the analysis, and the decoupled modal approach employs the decoupled modes of system for this purpose. Calculation of the

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۸۴/۹/۵

تاریخ اصلاحات مقاله: ۱۳۸۵/۶/۲۹

<sup>i\*</sup> نویسنده مسئول و دانشجوی دکترای مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر،

Email: a.samii@gmail.com

<sup>ii</sup> استاد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، Email: vahlotfi@aut.ac.ir

coupled modes involves some complications, due to its corresponding unsymmetrical eigen-problem induced. However, dynamic equation of motion can be solved very efficiently by using this method. In decoupled approach, the symmetry in the assumed corresponding eigen-problem results in faster calculation of modes. The equation of motion can also be solved with reasonable speed in this method.

In the last part of this paper, analysis of a typical dam-reservoir system is performed by both methods mentioned above. Both of these approaches have shown to be very efficient and have their own advantages at point of view of the calculation cost and memory allocations.

**KEYWORDS**

Concrete gravity dam, Decoupled modal approach, Coupled modes, Dynamic analysis

**۲- معادله حرکت دینامیکی سیستم سد و مخزن**

معادله حرکت دینامیکی، اساس تحلیل سیستم سد و مخزن در سه روش مورد بحث در این مقاله است. این معادله از ترکیب معادلات مجزای مربوط به بدنه سد و آب مخزن حاصل می‌شود. معادله حرکت دینامیکی بدنه سد را می‌توان به صورت رابطه (۱) نوشت [۶]:

$$M\ddot{\mathbf{r}} + C\dot{\mathbf{r}} + K\mathbf{r} = \mathbf{F}(t) - M\mathbf{J}\mathbf{a}_g(t) \quad (1)$$

در این رابطه،  $M$ ،  $K$  و  $C$  ماتریس‌های ترکیب (Assemble) شده جرم، سختی و میرایی بدنه سد هستند.  $\mathbf{r}$  بردار جابجایی‌های نسبی گره‌ها و  $\mathbf{a}_g$  بردار شتاب صلب زمین است.  $\mathbf{J}$  نیز ماتریسی است دو ستونی که هر دو سطر آن برابر با ماتریس واحد  $2 \times 2$  است.  $\mathbf{F}(t)$  بردار نیروی اندرکنش است که از سوی آب مخزن به سد وارد می‌شود. چگونگی محاسبه آن بر پایه انتگرال‌گیری از فشار هیدرودینامیک بر روی سطح تماس سد و آب مخزن است. بر این اساس می‌توان  $\mathbf{F}$  را به واسطه ماتریس اندرکنش ( $\mathbf{B}$ ) به بردار فشارهای گرهی ( $\mathbf{P}$ ) نسبت داد:

$$\mathbf{F} = \mathbf{B}^T \mathbf{P} \quad (2)$$

با استفاده از معادله انتشار موج فشاری در محدوده آب مخزن، گسسته‌سازی محیط به روش اجزاء محدود، بکارگیری روش گالرکین و اعمال شرایط مرزی می‌توان معادله ماتریسی (۳) را برای محدوده سیال بدست آورد:

$$\frac{1}{c^2} \mathbf{G}\ddot{\mathbf{P}} + \mathbf{L}\dot{\mathbf{P}} + \mathbf{H}\mathbf{P} = -\rho\mathbf{B}(\mathbf{J}\mathbf{a}_g + \ddot{\mathbf{r}}) \quad (3)$$

$\mathbf{G}$ ،  $\mathbf{L}$  و  $\mathbf{H}$  ماتریس‌های ترکیب شده محدوده آب مخزن هستند. صورت‌های گسترده این ماتریس‌ها نیز مانند ماتریس  $\mathbf{B}$  در مراجع مختلف موجود هستند [۱۳].  $\mathbf{a}_g$  و  $\ddot{\mathbf{r}}$  به ترتیب بردار شتاب صلب کف مخزن و بردار شتاب نسبی گره‌های بدنه سد در فصل مشترک سد و مخزن هستند.  $\rho$  نشان‌دهنده جرم مخصوص آب و  $c$  سرعت انتشار امواج فشاری در آب است.

**۱- مقدمه**

مطالعات گسترده‌ای در زمینه تحلیل دینامیکی سدهای بتنی با استفاده از روش اجزاء محدود انجام شده است. در بسیاری از این مطالعات مدلی متشکل از المان‌های سازه سد و آب مخزن بکارگرفته می‌شود که درجات آزادی جابجایی برای بدنه سد و بیشتر درجات آزادی فشار برای آب مخزن در نظر گرفته می‌شوند [۱] - [۱۲].

تحلیل مدل در دامنه زمان به دو روش مستقیم یا مودال قابل انجام است که هرکدام بر دیگری مزایایی دارند. برتری اصلی روش مستقیم دقت بالای آن و پیاده‌سازی آن بر روی مسائل غیرخطی است. مهمترین برتری روش مودال نیز سرعت بالای روش است.

یکی از روش‌های تحلیل به روش مستقیم استفاده از روش نوسانی است که مبتنی بر نوعی روش آزمون و خطاست [۳]. انتخاب دیگر، استفاده از روند متقارن [۱۳] است که بدون کاهش دقت، لزوم تکرار برای مسائل خطی را منتفی می‌سازد. استفاده از روند شبه - متقارن [۵] به دلیل حذف المان‌های حذفی و بکارگیری درجات آزادی معمول مسئله، روش مستقیم را از لحاظ برنامه‌نویسی بسیار جذاب‌تر می‌سازد.

استفاده از روش مودال با استفاده از مودهای وابسته یا غیروابسته [۶] امکان‌پذیر است. مهمترین برتری استفاده از مودهای وابسته افزایش سرعت حل معادله حرکت دینامیکی سیستم سد و مخزن است. برتری اصلی بکارگیری مودهای غیروابسته نیز حل بسیار کارآمد معادله مقادیر ویژه متناظر با آنها با استفاده از روش‌های رایج موجود است.

در این مقاله، روش‌های مودال وابسته و غیروابسته به لحاظ کارایی و دقت در ازای افزایش تعداد مودها، مطالعه می‌شوند. از روش مستقیم نیز (روند شبه - متقارن) به عنوان معیاری برای محک دقت این دو روش استفاده شده است.

البته با استفاده از روش تکرار ضریب رایلی می‌توان به گونه مؤثری همگرایی این روش را اصلاح نمود.

### ۳-۱- تکرار معکوس برای تعیین مودهای مسئله نامتقارن

در حل مسائل مقادیر ویژه نامتقارن، دو دسته مود برای تحلیل معادله به روش مودال، باید تعیین گردند که تحت عنوان مودهای راست و چپ شناخته می‌شوند. برای تعیین مودهای راست و چپ به ترتیب از دو معادله (۶) و (۷) استفاده می‌شود:

$$\bar{\mathbf{K}}\mathbf{X}^R = \bar{\mathbf{M}}\mathbf{X}^R\bar{\boldsymbol{\Lambda}} \quad (6)$$

$$\bar{\mathbf{K}}^T\mathbf{X}^L = \bar{\mathbf{M}}^T\mathbf{X}^L\bar{\boldsymbol{\Lambda}} \quad (7)$$

در معادلات یاد شده،  $\mathbf{X}^L$  و  $\mathbf{X}^R$  نشان‌دهنده ماتریس‌هایی هستند که ستون‌هایشان به ترتیب شامل مودهای سمت راست و چپ مربوطه است.  $\bar{\boldsymbol{\Lambda}}$  نیز نشان‌دهنده ماتریسی قطری است که قطر آن شامل مقادیر ویژه مربوط به دو معادله (۶) و (۷) است.

روابط تعامد مودها نیز در قالب دو رابطه (۸) و (۹) قابل طرح است:

$$(\mathbf{X}^L)^T \bar{\mathbf{M}} \mathbf{X}^R = \mathbf{I} \quad (8)$$

$$(\mathbf{X}^L)^T \bar{\mathbf{K}} \mathbf{X}^R = \bar{\boldsymbol{\Lambda}} \quad (9)$$

همانطور که اشاره شد برای تعیین مودهای چپ و راست و مقادیر ویژه موردنظر، روش تکرار معکوس می‌تواند به طرز مؤثری به کار گرفته شود. برای این منظور روند گام‌به‌گام زیر پیشنهاد می‌شود. در این روند فرض بر این است که زمود اول سیستم با استفاده از همین روش تعیین شده‌اند و هدف، تعیین بردارهای ویژه  $z+1$ ام و مقدار ویژه متناظر با آنهاست.

گام ۱- فرض یک بردار اولیه دلخواه ( $\mathbf{V}_1$ ) و صفر کردن سهم مودهای قبلی موجود در آن:

$$\varepsilon_{ii}^R = \frac{(\mathbf{X}_i^L)^T \bar{\mathbf{K}} \mathbf{V}_1}{(\mathbf{X}_i^L)^T \bar{\mathbf{M}} \mathbf{V}_1} \quad (10)$$

$$\varepsilon_{ii}^L = \frac{(\mathbf{V}_1)^T \bar{\mathbf{K}} \mathbf{X}_i^R}{(\mathbf{V}_1)^T \bar{\mathbf{M}} \mathbf{X}_i^R} \quad (11)$$

با استفاده از رابطه (۱۰)، سهم مود  $i$ ام ( $\mathbf{X}_i$ ) که  $z+1 < z$  است در بردار اولیه سمت راست محاسبه می‌شود. برای محاسبه سهم همان مود  $i$ ام در بردار اولیه سمت چپ، رابطه (۱۱) قابل استفاده است.

گام ۲- روند تکرار معکوس، همزمان برای تعیین بردارهای ویژه چپ و راست انجام شود. روند تکرار معکوس برای تعیین

از ترکیب معادلات (۱) و (۳) و منظور نمودن رابطه (۲)، معادله‌ای حاصل می‌شود که تحت عنوان معادله سیستم سد و مخزن وابسته نامیده می‌شود:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} & \mathbf{0} \\ \mathbf{B} & \frac{1}{\rho c^2} \mathbf{G} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{r}} \\ \bar{\mathbf{p}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \frac{1}{\rho} \mathbf{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\bar{\mathbf{r}}} \\ \dot{\bar{\mathbf{p}}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K} & -\mathbf{B}^T \\ \mathbf{0} & \frac{1}{\rho} \mathbf{H} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{r} \\ \mathbf{p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mathbf{M}\mathbf{J}\mathbf{a}_g \\ -\mathbf{B}\mathbf{J}\mathbf{a}_g \end{bmatrix} \quad (4)$$

معادله (۴) را می‌توان به صورت فشرده‌تر نیز نوشت:

$$\bar{\mathbf{M}} \ddot{\bar{\mathbf{r}}} + \bar{\mathbf{C}} \dot{\bar{\mathbf{r}}} + \bar{\mathbf{K}} \bar{\mathbf{r}} = \bar{\mathbf{R}} \quad (5)$$

ملاحظه می‌شود که ماتریس‌های  $\bar{\mathbf{M}}$  و  $\bar{\mathbf{K}}$  در معادله فوق نامتقارن هستند. نامتقارن بودن این ماتریس‌ها منجر به نامتقارن شدن ماتریس سختی مؤثر در روش نیومارک خواهد شد. از اینرو طی روش متقارن [۱۳]، قسمت پایین معادله (۴) در  $a_0^{-1}$  یکی از ضرایب روش نیومارک است، ضرب شده و معادله‌ای حاصل می‌شود که اگر با استفاده از روش نیومارک حل شود، ماتریس سختی مؤثر حاصل از آن، متقارن خواهد شد [۵] و [۱۳].

روند متقارن نیازمند محاسبه ماتریس اندرکنش به صورت مستقل و جاگذاری آن در ماتریس‌های جرم و سختی است. این دو عملیات در روشی بنام روند شبه - متقارن حذف می‌شوند. در این روش همانطور که پیشتر نیز یاد شد، با حذف المان‌های میان‌لایه‌ای احتیاجی به محاسبه مستقل ماتریس اندرکنش نیز وجود ندارد. در این روش اثر ماتریس اندرکنش در قالب المان‌های مایع مجاور لحاظ می‌شود. با استفاده از روند شبه - متقارن عملاً در یک مرحله ماتریس‌های مربوط به تمام المان‌های موجود در سیستم محاسبه می‌شوند و در یک مرحله نیز ترکیب می‌شوند.

### ۳- تحلیل با استفاده از مودهای وابسته

با توجه به عدم تقارن ماتریس‌های  $\bar{\mathbf{M}}$  و  $\bar{\mathbf{K}}$  در معادله (۵)، نمی‌توان از حل‌کننده‌های معمول متقارن برای حل مسئله مقادیر ویژه مرتبط با این معادله استفاده کرد. از میان روش‌هایی که برای حل مسائل نامتقارن مطرح هستند، روش تکرار معکوس از مبانی ساده‌ای برخوردار است. این روش همواره به بردار ویژه‌ای همگرا می‌شود که متناظر با کوچکترین مقدار ویژه مسئله است [۱۴]. استفاده از روش تکرار معکوس برای تعیین مود اول یک مسئله مقادیر ویژه کارآمد است ولی با افزایش تعداد مودها، کارایی روش دچار افت شدید می‌شود.

روش تکرار معکوس، این روش نیز برای محاسبه مودهای بالای سیستم نامناسب است. از اینرو برای اصلاح نرخ همگرایی آن، استفاده از روش تکرار ضریب رایلی پیشنهاد می‌شود. توضیحات بیشتر در مورد این روش و مبنای آن در مراجع دیگر [۱۴] موجود است. تکرار ضریب رایلی روشی است که مبنای آن بهره‌گیری از روش انتقال است. گرچه، روش تکرار رایلی، همواره به برداری که متناظر با کوچکترین مقدار ویژه است، همگرا نمی‌شود. از اینرو باید روش تکرار معکوس تا بدست آمدن یک دقت مناسب به کار گرفته شود. پس از آن، تکرار بعدی با انتقال مسأله به اندازه ضریب رایلی انجام می‌شود. البته بازهم احتمال انحراف همگرایی به مودهای بالاتر وجود دارد. از اینرو، باید به‌ازای هر تکرار با انتقال، یک تکرار نیز بدون انتقال انجام شود تا از همگرایی به کوچکترین مقدار ویژه اطمینان حاصل شود.

### ۳-۳- تحلیل دینامیکی با استفاده از مودهای وابسته

با فرض اینکه  $m$  مود اول سیستم  $n$  درجه آزادی سد و مخزن وابسته تعیین شده‌اند، در این بخش، روش تحلیل دینامیکی سیستم با استفاده از مودهای وابسته تشریح می‌شود. مطابق روند رایج در تحلیل مودال، ابتدا بردار  $\bar{Y}$  در رابطه (۵)، به‌صورت حاصل‌ضرب بردارهای مودی در وزن‌های مربوط به هر مود نوشته می‌شود.

$$\bar{Y} = \bar{X}^R \bar{Y} \quad (18)$$

در این رابطه،  $\bar{X}^R$  ماتریسی است  $n \times m$  که هر ستون آن متناظر با یکی از  $m$  مود اول سمت راست سیستم است.  $\bar{Y}$  نیز برداری شامل سهم  $m$  مود اول است که در طی تحلیل بدست می‌آید. با قرار دادن رابطه (۱۸) در معادله (۵) و پیش‌ضرب کردن طرفین در  $(\bar{X}^L)^T$  معادله (۱۹) حاصل می‌شود:

$$\left( (\bar{X}^L)^T \bar{M} \bar{X}^R \right) \ddot{\bar{Y}} + (\bar{C}^*) \dot{\bar{Y}} + \left( (\bar{X}^L)^T \bar{K} \bar{X}^R \right) \bar{Y} = (\bar{X}^L)^T \bar{R} \quad (19)$$

در رابطه (۱۹)،  $\bar{C}^*$  برابر با  $(\bar{X}^L)^T \bar{C} \bar{X}^R$  است. در این مقاله از میرایی رایلی برای احتساب اثر میرایی بدنه سد استفاده شده است. گرچه در تحلیل مودال، میرایی ویسکوز رایج‌تر است.

با به‌کارگیری روابط (۸) و (۹) (تعامل مودها)، معادله (۱۹) به‌صورت رابطه (۲۰) در می‌آید:

$$\mathbf{I} \ddot{\bar{Y}} + (\bar{C}^*) \dot{\bar{Y}} + \bar{\Lambda} \bar{Y} = (\bar{X}^L)^T \bar{R} \quad (20)$$

با بکارگیری روش نیومارک بر روی معادله (۲۰):

$$\hat{\bar{K}} \bar{Y}_{n+1} = \hat{\bar{R}}_{n+1} \quad (21)$$

که  $\hat{\bar{K}}$  ماتریس سختی مؤثر و  $\hat{\bar{R}}_{n+1}$  بردار نیروی مؤثر

بردارهای چپ و راست بسیار شبیه به هم هستند و در اینجا، تکرار برای تعیین بردار ویژه راست تشریح شده است.

همانطور که اشاره شد در ابتدا باید سهم مودهای قبلی از بردار تکرار اولیه ( $V_1$ ) حذف شود:

$$V_1^R = V_1 - \sum_{i=1}^j \epsilon_{i1}^R X_i^R \quad (12)$$

سپس  $y_1^R$  با ضرب کردن ماتریس  $\bar{M}$  در بردار  $V_1^R$  بدست می‌آید:

$$y_1^R = \bar{M} V_1^R \quad (13)$$

پس از این مرحله، سیکل تکرار برای تعیین همزمان مودهای چپ و راست شروع می‌شود. در ابتدای هر سیکل،  $\bar{V}_{k+1}^R$  مطابق رابطه (۱۴) محاسبه می‌شود و در ادامه  $\bar{y}_{k+1}^R$  بدست می‌آید:

$$\bar{K} \bar{V}_{k+1}^R = y_k^R \quad (14)$$

$$\bar{y}_{k+1}^R = \bar{M} \bar{V}_{k+1}^R \quad (15)$$

همانطور که پیشتر نیز گفته شد به موازات تکرار برای تعیین بردار سمت راست، تکرارهای مربوط به بردار سمت چپ نیز انجام می‌شوند. در تکرارهای مربوط به بردار سمت چپ به‌جای ماتریس‌های  $\bar{M}$  و  $\bar{K}$  به ترتیب از ماتریس‌های  $\bar{M}^T$  و  $\bar{K}^T$  استفاده می‌شود. پس از آنکه بردارهای چپ نیز تعیین شدند، ضریب رایلی ( $\rho$ ) در هر گام قابل محاسبه است. این ضریب به سمت، مقدار ویژه  $\lambda_{j+1}$  و معادلات (۶) و (۷) همگرا می‌شود:

$$\rho_{k+1} = \frac{(\bar{V}_{k+1}^L)^T y_k^R}{(\bar{V}_{k+1}^L)^T \bar{y}_{k+1}^R} \quad (16)$$

در این مرحله لازم است که دوباره سهم مودهای قبلی از بردار تکرار حذف شود که با استفاده از روابط مشابه روابط (۱۰) و (۱۱) انجام‌پذیر است.

سیکل بعدی تکرار از رابطه (۱۴) آغاز می‌شود و تکرارها تا رسیدن به همگرایی مورد نظر ادامه می‌یابند. ولی پیش از شروع سیکل بعدی،  $y_{k+1}^R$  باید مطابق رابطه (۱۷) محاسبه شود:

$$y_{k+1}^R = \frac{\bar{y}_{k+1}^R}{\sqrt{(\bar{V}_{k+1}^L)^T \bar{y}_{k+1}^R}} \quad (17)$$

گام ۳- در پایان  $\bar{V}_{k+1}^R$  به سمت ضریبی از  $X_{j+1}^R$  همگرا می‌شود و  $\rho_{k+1}$  به مقدار ویژه متناظر با آن همگرا می‌شود. تعیین بردار ویژه چپ نیز همانطور که اشاره شد، همزمان و طی روندی مشابه با تعیین بردار ویژه راست انجام می‌شود.

### ۳-۲- اصلاح سرعت همگرایی روش تکرار معکوس

با وجود کارایی مناسب روند یاد شده، به واسطه طبیعت

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{X}_2 \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$\mathbf{\Lambda} = \begin{bmatrix} \mathbf{\Lambda}_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{\Lambda}_2 \end{bmatrix} \quad (30)$$

در روابط (29) و (30)،  $\mathbf{X}_1$  و  $\mathbf{X}_2$  ماتریس‌هایی هستند که به ترتیب شامل بردارهای ویژه بدنه سد و آب مخزن هستند.  $\mathbf{\Lambda}_1$  و  $\mathbf{\Lambda}_2$  نیز ماتریس‌هایی قطری شامل مقادیر ویژه متناظر با  $\mathbf{X}_1$  و  $\mathbf{X}_2$  هستند.

با توجه به روابط (24)، (25) و (28) تعامد مودها مطابق دو رابطه (31) و (32) نوشته می‌شود:

$$\mathbf{X}^T \bar{\mathbf{M}} \mathbf{X} = \mathbf{I} + \mathbf{X}^T \mathbf{M}_U \mathbf{X} \quad (31)$$

$$\mathbf{X}^T \bar{\mathbf{K}} \mathbf{X} = \mathbf{\Lambda} + \mathbf{X}^T \mathbf{K}_U \mathbf{X} \quad (32)$$

بردار مجهول در رابطه (5) را می‌توان به صورت ترکیبی خطی از بردارهای ویژه بدنه سد و آب مخزن نوشت:

$$\bar{\mathbf{Y}} = \mathbf{X} \mathbf{Y} \quad (33)$$

که ماتریس  $\mathbf{Y}$  در رابطه (33) شامل ضرایب مشارکت مودی است. از جایگذاری این رابطه در معادله (5) و پیش‌ضرب کردن طرفین در  $\mathbf{X}^T$  معادله (34) حاصل می‌شود:

$$(\mathbf{X}^T \bar{\mathbf{M}} \mathbf{X}) \dot{\mathbf{Y}} + (\mathbf{C}^*) \dot{\mathbf{Y}} + (\mathbf{X}^T \bar{\mathbf{K}} \mathbf{X}) \mathbf{Y} = \mathbf{R}^*(t) \quad (34)$$

در این رابطه،  $\mathbf{C}^*$  و  $\mathbf{R}^*(t)$  عبارتند از:

$$\mathbf{C}^* = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_1^T \mathbf{C} \mathbf{X}_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \frac{1}{\rho} \mathbf{X}_2^T \mathbf{L} \mathbf{X}_2 \end{bmatrix} \quad (35)$$

$$\mathbf{R}^*(t) = -\mathbf{X}^T \bar{\mathbf{M}} \bar{\mathbf{J}} \mathbf{a}_g(t) \quad (36)$$

همچنین با توجه به مزایای استفاده از میرایی ویسکوز در آنالیز مودال،  $\mathbf{C}^*$  را می‌توان به شکل دیگری نیز در نظر گرفت:

$$\mathbf{C}^* = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_1^* & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \frac{1}{\rho} \mathbf{X}_2^T \mathbf{L} \mathbf{X}_2 \end{bmatrix}$$

که عبارت است از:

$$\mathbf{C}_1^* = 2\beta_d \mathbf{\Lambda}_1^{1/2} \quad (37)$$

در این رابطه  $\beta_d$  ضریب میرایی است که در این مطالعه برای مودهای مختلف یکسان فرض می‌شود. در صورتیکه روش نیومارک بر روی معادله (34) به کار گرفته شود، ماتریس سختی مؤثر و بردار نیرو در گام زمانی  $n+1$  حاصل می‌شود. ماتریس سختی مؤثر در این حالت نامتقارن است، با این حال برای متقارن ساختن این ماتریس کافی است که بخش پایین کل

هستند. رابطه سختی مؤثر مطابق رابطه (22) بدست می‌آید:

$$\hat{\mathbf{K}} = a_0 \mathbf{I} + a_1 (\bar{\mathbf{C}}^*) + \bar{\mathbf{\Lambda}} \quad (22)$$

بردار نیروی مؤثر مربوط به گام زمانی  $n+1$  را نیز می‌توان مطابق رابطه (23) زیر تعیین کرد:

$$\hat{\mathbf{R}}_{n+1} = (\bar{\mathbf{X}}^L)^T \bar{\mathbf{R}}_{n+1} + \mathbf{I} (a_0 \bar{\mathbf{Y}}_n + a_2 \dot{\bar{\mathbf{Y}}}_n + a_3 \ddot{\bar{\mathbf{Y}}}_n) + (\bar{\mathbf{C}}^*) (a_1 \bar{\mathbf{Y}}_n + a_4 \dot{\bar{\mathbf{Y}}}_n + a_5 \ddot{\bar{\mathbf{Y}}}_n) \quad (23)$$

با جایگذاری روابط (22) و (23) در معادله (21)،  $\bar{\mathbf{Y}}$  در هر گام زمانی تعیین می‌شود و با استفاده از رابطه (18) جایابی گره‌های سد و فشار در گره‌های مخزن حاصل می‌شوند.

## ع- روش مودال غیروابسته

روش مودال غیروابسته [6] از مودهای مجزا یا غیروابسته بدنه سد و آب مخزن برای تحلیل سیستم سد و مخزن بهره می‌گیرد. برتری عمده این روش بر استفاده از مودهای وابسته، تقارن مسأله مقادیر ویژه حاصل است. این مسأله متقارن، قابل حل با روش‌هایی مانند تکرار زیرفضاست که هم سرعت بالایی دارد و هم بخش کوچکی از حافظه را اشغال می‌کند.

در رابطه (5) می‌توان  $\bar{\mathbf{M}}$  و  $\bar{\mathbf{K}}$  را مطابق دو رابطه (24) و (25) به دو بخش متقارن و نامتقارن جدا کرد:

$$\bar{\mathbf{M}} = \mathbf{M}_U + \mathbf{M}_S \quad (24)$$

$$\bar{\mathbf{K}} = \mathbf{K}_U + \mathbf{K}_S \quad (25)$$

در (24) و (25) ماتریس‌های سمت راست روابط عبارتند از:

$$\mathbf{M}_S = \begin{bmatrix} \mathbf{M} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \frac{1}{\rho c^2} \mathbf{G} \end{bmatrix}, \mathbf{M}_U = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{B} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$\mathbf{K}_S = \begin{bmatrix} \mathbf{K} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \frac{1}{\rho} \mathbf{H} \end{bmatrix}, \mathbf{K}_U = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & -\mathbf{B}^T \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (27)$$

اگر به جای حل معادلات (6) و (7)، مسأله زیر حل شود، مودهای غیروابسته سیستم سد و مخزن بدست می‌آیند.

$$\mathbf{K}_S \mathbf{X} = \mathbf{M}_S \mathbf{X} \mathbf{\Lambda} \quad (28)$$

در صورتیکه در حل معادله (28) روش‌های موجود برای حل مسائل مقادیر ویژه به طریقی تنظیم شوند که ابتدا همگرایی به سمت مودهای بدنه سد رخ دهد و بعد از آن مودهای مربوط به آب مخزن بدست آیند، ماتریس‌های  $\mathbf{X}$  و  $\mathbf{\Lambda}$  موجود در رابطه (28) را می‌توان مطابق رابطه (9) تعریف کرد:

### ۵-۱- پارامترهای مدل

بتن بدنه سد بعنوان یک جامد همگن و ایزوتروپ فرض می‌شود. آب مخزن نیز بعنوان یک سیال تراکم‌پذیر و غیر ویسکوز در نظر گرفته می‌شود. در جدول ۱ مشخصات مربوط به آب مخزن و بتن بدنه سد آمده است.

مدول الاستیسیته بتن ( $E_c$ )	۲۲/۷۵ گیگاپاسکال
ضریب پواسون بتن ( $\nu_c$ )	۰/۲
وزن مخصوص بتن ( $\gamma_c$ )	۲۴/۸ کیلونیوتن بر مترمکعب
سرعت انتشار موج فشاری در آب (c)	۱۴۴۰ متر بر ثانیه
وزن مخصوص آب	۱۰ کیلونیوتن بر مترمکعب

برای انتهای مخزن از شرایط مرزی سامرفیلد استفاده شده است. کف مخزن در بازتاب امواج فشاری، صلب فرض می‌شود. ضریب میرایی ویسکوز ( $\beta_d$ ) برای تمام موها یکسان و مساوی ۰/۰۵ در نظر گرفته می‌شود. در تحلیل به روش مستقیم، مقادیر ضرایب میرایی رایلی طوری در نظر گرفته می‌شوند که در فرکانس‌های نزدیک به فرکانس مودی اول و سوم سد، ضریب میرایی ۵٪ میرایی بحرانی باشد.

### ۵-۲- بارگذاری مدل

در این مطالعه فرض بر این است که سد پیش از اعمال هر نوع بار دینامیکی، تحت بارهای استاتیکی وزن و فشار آب قرار دارد. پس از این بارگذاری استاتیکی، بارگذاری دینامیکی مدل آغاز می‌شود. یعنی در لحظه شروع بارگذاری دینامیکی تنش‌ها و تغییرشکل‌های استاتیکی در مدل موجودند. برای بارگذاری دینامیکی مدل از مؤلفه  $S_{69E}$  زلزله تفت استفاده می‌شود که در راستای افقی به مدت ۱۳ ثانیه بر مدل اعمال می‌شود.

### ۵-۳- نتایج تحلیل

از آنجا که هدف از این مطالعه مقایسه کارایی دو روش مودال وابسته و غیروابسته است، در نمودارها و اشکال ارائه شده، نتایج این دو روش در مقایسه با روش مستقیم که از دقت آن اطمینان وجود دارد، رسم شده‌اند.

### ۵-۳-۱- روش مودال وابسته

۵ فرکانس طبیعی اول سیستم وابسته سد و مخزن در جدول ۲ ارائه شده‌اند. شکل مودهای اول و دوم سیستم نیز در اشکال ۲ تا ۵ نشان داده شده‌اند. پاسخ جابجایی افقی و قائم تاج سد و پوش تنش‌های اصلی حداکثر و حداقل برای ۶ ترکیب مودی محاسبه شده‌اند. نام ترکیب مودهای مختلف، متناسب با تعداد مودهای ترکیب شده در جدول ۳ درج شده است.

معادله (بخشی که مربوط به درجات آزادی فشار در مخزن است)، در  $-a_0^{-1}$  ضرب شود. صورت پایانی و گسترده ماتریس سختی مؤثر و بردار نیرو به‌قرار رابطه (۳۸) است:

$$\hat{K} = \begin{bmatrix} a_0 \mathbf{I}_1 & \mathbf{0} \\ -\mathbf{X}_2^T \mathbf{B} \mathbf{X}_1 & -\mathbf{I}_2 \end{bmatrix} + a_1 \begin{bmatrix} 2\beta_d \Lambda_1^{1/2} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & -\frac{1}{\rho a_0} \mathbf{X}_2^T \mathbf{L} \mathbf{X}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Lambda_1 & -\mathbf{X}_1^T \mathbf{B}^T \mathbf{X}_2 \\ \mathbf{0} & -\frac{1}{a_0} \Lambda_2 \end{bmatrix} \quad (38)$$

$$\hat{R}_{n+1} = \begin{bmatrix} -\mathbf{X}_1^T \mathbf{M} \mathbf{J} \mathbf{a}_g \\ -\frac{1}{a_0} \mathbf{X}_2^T \mathbf{B} \mathbf{J} \mathbf{a}_g \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{I}_1 & \mathbf{0} \\ -\frac{1}{a_0} \mathbf{X}_2^T \mathbf{B} \mathbf{X}_1 & -\frac{1}{a_0} \mathbf{I}_2 \end{bmatrix} (a_0 \mathbf{Y}_n + a_2 \dot{\mathbf{Y}}_n + a_3 \ddot{\mathbf{Y}}_n) \quad (39)$$

$$+ \begin{bmatrix} 2\beta_d \Lambda_1^{1/2} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & -\frac{1}{\rho a_0} \mathbf{X}_2^T \mathbf{L} \mathbf{X}_2 \end{bmatrix} (a_1 \mathbf{Y}_n + a_4 \dot{\mathbf{Y}}_n + a_5 \ddot{\mathbf{Y}}_n)$$

با استفاده از روابط (۳۸) و (۳۹)، در هر گام زمانی تعیین می‌شود و با قرار دادن آن در رابطه (۳۳) جابجایی گره‌های سد و فشار در گره‌های مخزن حاصل می‌شوند.

### ۵-۴- مدل‌های تحلیل شده

بر مبنای سه روش مشروح در این مقاله، یک برنامه کامپیوتری به زبان فرترن نوشته شده است. در این بخش نتایج تحلیل یک سد با استفاده از سه روش یاد شده، ارائه می‌شود. سد مورد نظر، سد پایین فلت به طول تاج ۵۶۰/۸۳ متر است. این سد بر روی رود کینگ در کالیفرنیا آمریکا واقع است. با توجه به انجام تحلیل در دو بعد، مرتفع‌ترین مقطع سد برای تحلیل در نظر گرفته شده است که ارتفاع آن ۱۲۱/۹۲ متر است. طول مخزن نیز در کف آن ۲۰۰ متر لحاظ شده است. شکل ۱ شامل جزئیات هندسی مدل است.

در گسسته‌سازی سیستم سد و مخزن، از المان هشت-گره‌ای ایزوپارامتریک استفاده شده است که از انعطاف‌پذیری مناسبی برخوردار است. المان‌های بدنه سد در حالت تنش مسطحه فرض شده‌اند. در مدل اجزاء محدود مورد بحث ۴۳۹ گره و ۱۳۰ المان وجود دارد. در این میان ۲۹۰ گره مربوط به بدنه سد، ۳۰۹ گره مربوط به آب مخزن و ۱۹ گره نیز در فصل مشترک سد و مخزن قرار دارند.

جدول ۵- تنش‌های اصلی حداکثر و حداقل بر حسب (MPa) در بدنه

سد برای ترکیب مودهای مختلف و در صد خطای مربوطه

خطا	مقدار پاسخ	پارامتر مورد بررسی	نام ترکیب
۳/۲۵	۳/۵۷	تنش اصلی حداکثر	C۱
۲/۲۶	-۳/۸۹	تنش اصلی حداقل	
۱/۰۸	۳/۷۳	تنش اصلی حداکثر	C۳
۱/۰۱	-۳/۹۴	تنش اصلی حداقل	
۲/۴۴	۳/۷۸	تنش اصلی حداکثر	C۵
۰/۷۵	-۳/۹۵	تنش اصلی حداقل	
۰/۲۰	۳/۶۹	تنش اصلی حداکثر	C۱۰
۰/۲۵	-۳/۹۷	تنش اصلی حداقل	
۰/۳۷	۳/۶۸	تنش اصلی حداکثر	C۱۵
۰/۲۵	-۳/۹۷	تنش اصلی حداقل	
۰/۳۷	۳/۶۸	تنش اصلی حداکثر	C۳۰
۰/۲۵	-۳/۹۷	تنش اصلی حداقل	

۵-۳-۲ روش مودال غیروابسته

۵ فرکانس طبیعی اول بدنه سد و آب مخزن، در جدول ۶ ارائه شده‌اند. همچنین شکل مودهای اول و دوم سد در شکل ۹ و شکل مودهای اول و دوم مخزن در اشکال ۱۰ و ۱۱ نمایش داده شده‌اند.

جدول ۶- فرکانس‌های طبیعی ۵ مود اول بدنه سد و مخزن

شماره مود	فرکانس طبیعی (Hertz)	
	بدنه سد	مخزن
۱	۳/۱۴۶۴	۳/۱۱۵۱
۲	۶/۴۷۵۱	۴/۷۴۹۱
۳	۸/۷۳۸۶	۷/۷۹۵۵
۴	۱۱/۲۴۸۷	۹/۳۰۰۴
۵	۱۶/۹۸۹۷	۹/۹۵۸۳

پاسخ جابجایی افقی و قائم تاج سد و پوش تنش‌های اصلی حداکثر و حداقل برای پنج ترکیب مود محاسبه شده است. نام این پنج ترکیب به همراه تعداد مودهای مربوط به هر یک از محیط‌های سازه و آب که با هم ترکیب شده‌اند در جدول ۸ آمده است.

جدول ۸- نام ترکیب مودهای مختلف و تعداد مودهای ترکیب شده از

سازه و آب

نام ترکیب	تعداد مودهای ترکیب شده	
	سازه	آب
D۵	۵	۱۵
D۱۵	۱۵	۴۵
D۲۵	۲۵	۷۵
D۳۵	۳۵	۱۰۵
D۵۰	۵۰	۱۵۰

جدول ۲- فرکانس‌های طبیعی ۵ مود اول سیستم وابسته

شماره مود	فرکانس طبیعی (Hertz)
۱	۲/۵۲۶۷
۲	۳/۲۶۸۱
۳	۶۶۶۵/۴
۴	۶/۲۱۲۶
۵	۷/۹۱۸۱

جدول ۳- نام ترکیب‌های مختلف و تعداد مودهای ترکیب شده

نام ترکیب	تعداد مودهای ترکیب شده
C۱	۱
C۳	۳
C۵	۵
C۱۰	۱۰
C۱۵	۱۵
C۳۰	۳۰

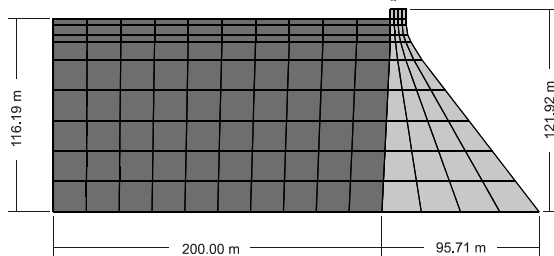
نتایج پاسخ جابجایی و تنش در جداول ۴ و ۵ درج شده است. در این جداول مقدار خطای هر پاسخ نسبت به نتایج روش مستقیم ارائه شده است. با بررسی نتایج و پاسخ‌ها مشخص است که دقت جواب‌ها با افزایش تعداد مودها به سرعت افزایش می‌یابد. تا جایی‌که تا ترکیب C۱۰ همگرایی به پاسخ‌های روش مستقیم با دقتی بسیار خوب اتفاق می‌افتد. برای نمونه، اشکال ۶ تا ۸، نتایج پاسخ جابجایی افقی و پوش حداکثر تنش‌های اصلی کششی و فشاری با استفاده از ترکیب C۱۰ را نشان می‌دهند.

جدول ۴- حداکثر پاسخ جابجایی بر حسب (mm) برای ترکیب مودهای مختلف و درصد خطا نسبت به روش مستقیم

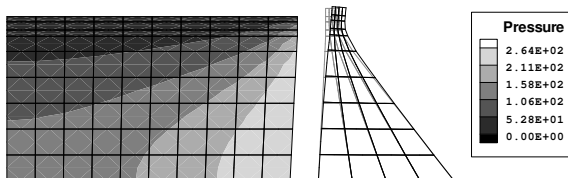
نام ترکیب	پارامتر مورد بررسی	مقدار پاسخ	خطا
C۱	حداکثر جابجایی افقی	۴۴/۳	۱/۹۹
	حداکثر جابجایی قائم	-۱۳/۶	۰/۱۵
C۳	حداکثر جابجایی افقی	۴۴/۲	۲/۲۱
	حداکثر جابجایی قائم	-۱۳/۶	۰/۱۴
C۵	حداکثر جابجایی افقی	۴۴/۹	۰/۶۶
	حداکثر جابجایی قائم	-۱۳/۴	۱/۴۶
C۱۰	حداکثر جابجایی افقی	۴۴/۹	۰/۶۵
	حداکثر جابجایی قائم	-۱۳/۵	۰/۷۴
C۱۵	حداکثر جابجایی افقی	۴۴/۹	۰/۶۳
	حداکثر جابجایی قائم	-۱۳/۵	۰/۶۶
C۳۰	حداکثر جابجایی افقی	۴۵	۰/۴۴
	حداکثر جابجایی قائم	-۱۳/۶	۰/۰۷



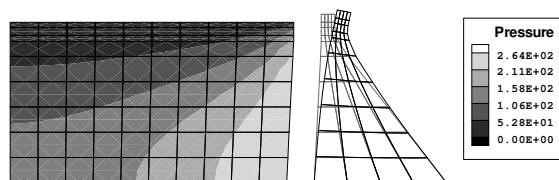
به عنوان نمونه، نتایج پاسخ جابجایی افقی و پوش حداکثر تنش اصلی فشاری و کششی با استفاده از ترکیب D50 در اشکال ۱۲ تا ۱۴ نمایش داده شده‌اند.



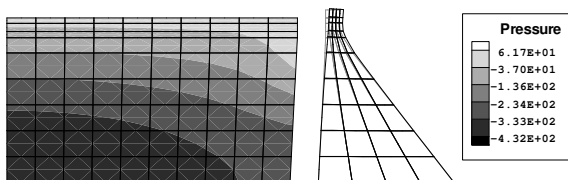
شکل ۱- جزئیات هندسی سیستم سد و مخزن مورد مطالعه



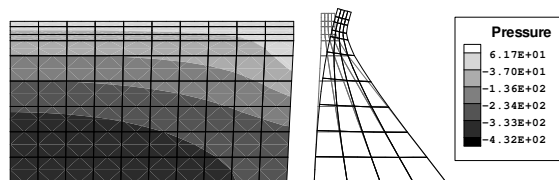
شکل ۲- مود اول راست سیستم سد و مخزن وابسته (ضریب بزرگنمایی برای شکل سد معادل  $10^5$  در نظر گرفته شده است.)



شکل ۳- مود اول سمت چپ سیستم سد و مخزن وابسته (ضریب بزرگنمایی برای شکل سد معادل  $10^3$  در نظر گرفته شده است.)



شکل ۴- مود دوم راست سیستم سد و مخزن وابسته (ضریب بزرگنمایی برای شکل سد معادل  $10^5$  در نظر گرفته شده است.)



شکل ۵- مود دوم سمت چپ سیستم سد و مخزن وابسته (ضریب بزرگنمایی برای شکل سد معادل  $10^3$  در نظر گرفته شده است.)

دلیل انتخاب تعداد مودهای گفته شده در جدول ۸ برای محیط سیال و سازه، این است که به طور مثال فرکانس طبیعی ۲۵م سازه نزدیک به فرکانس ۷۵م مخزن است. به این ترتیب فرکانسی که می‌تواند یکی از این دو محدوده را تحریک کند، دیگری را نیز تحریک می‌کند و مود زائدی در تحلیل وارد نمی‌شود. همگرایی پاسخ‌ها در این روش به سمت نتایج روش مستقیم کند اتفاق می‌افتد. البته به علت تفاوتی که در میرایی این روش با روش مستقیم وجود دارد نباید انتظار داشت نتایج آنها مشابه یکدیگر شوند. نتایج پاسخ جابجایی و مقدار خطای مربوط به ۵ ترکیب یاد شده، در جدول ۹ درج شده‌اند. نتایج مربوط به پاسخ تنش نیز در جدول ۱۰ آمده‌اند. حداکثر خطای پاسخ تنش، نسبت به روش مستقیم با استفاده از ترکیب D25، معادل ۸٪ است. برای ترکیب D50، مقدار حداکثر خطای تنش ۲٪ است. اگرچه با در نظر گرفتن تمام مودها نیز نتایج تنش انحرافی معادل ۱/۵٪ نسبت به نتایج روش مستقیم دارند که ناشی از اختلاف میرایی در دو روش است.

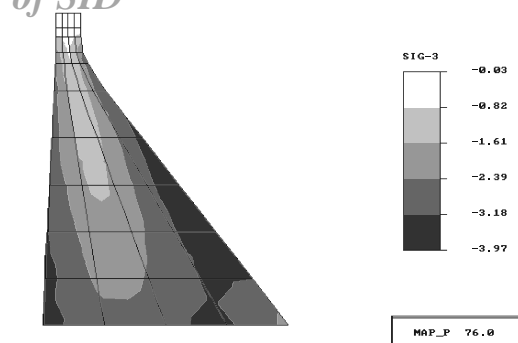
جدول ۹- حداکثر پاسخ جابجایی بر حسب (mm) برای ترکیب

مودهای مختلف و درصد خطا نسبت به روش مستقیم			
نام ترکیب	پارامتر مورد بررسی	مقدار پاسخ	خطا
D5	حداکثر جابجایی افقی	۳۳	۲۶/۹۹
	حداکثر جابجایی قائم	-۱۰/۲	۲۵
D15	حداکثر جابجایی افقی	۳۷	۱۸/۱۴
	حداکثر جابجایی قائم	-۱۱/۶	۱۴/۷
D25	حداکثر جابجایی افقی	۴۰	۱۱/۵۰
	حداکثر جابجایی قائم	-۱۲/۵	۸/۰۹
D35	حداکثر جابجایی افقی	۴۱/۵	۸/۱۹
	حداکثر جابجایی قائم	-۱۲/۶	۷/۲۵
D50	حداکثر جابجایی افقی	۴۳/۵	۵/۹۷
	حداکثر جابجایی قائم	-۱۳/۲	۲/۹۴

جدول ۱۰- تنش‌های اصلی حداکثر و حداقل بر حسب (MPa) در بدنه سد برای ترکیب مودهای مختلف و درصد خطای مربوطه

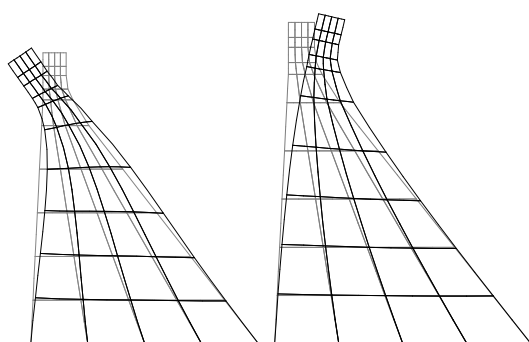
نام ترکیب	پارامتر مورد بررسی	مقدار پاسخ	خطا
D5	تنش اصلی حداکثر	۳/۰۵	۱۷/۳۴
	تنش اصلی حداقل	-۲/۴۵	۱۳/۳۲
D15	تنش اصلی حداکثر	۳/۲۸	۱۱/۱۱
	تنش اصلی حداقل	-۲/۵۸	۱۰/۰۵
D25	تنش اصلی حداکثر	۳/۴	۷/۸۶
	تنش اصلی حداقل	-۳/۷	۷/۰۴
D35	تنش اصلی حداکثر	۳/۵	۵/۱۵
	تنش اصلی حداقل	-۳/۸	۴/۵۲
D50	تنش اصلی حداکثر	۳/۶۱	۲/۱۷
	تنش اصلی حداقل	-۲/۹۱	۱/۷۶





(ب)

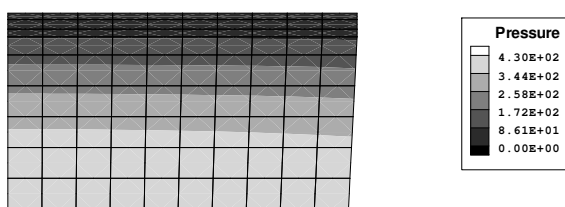
شکل ۸- پوش حداکثر تنش اصلی فشاری (MPa) حاصل از روش مستقیم (الف) و ترکیب C10 در روش مودال وابسته (ب)



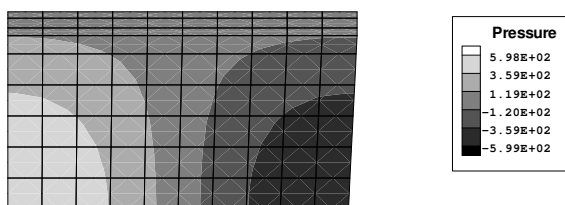
(ب)

(الف)

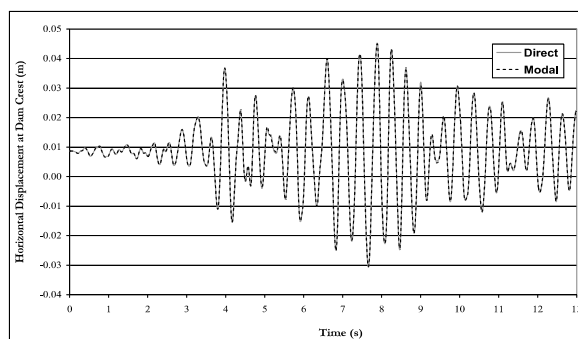
شکل ۹- (الف) مود اول سد با مخزن خالی. (ب) مود دوم سد با مخزن خالی (ضریب بزرگنمایی ۱۰<sup>۳</sup> است).



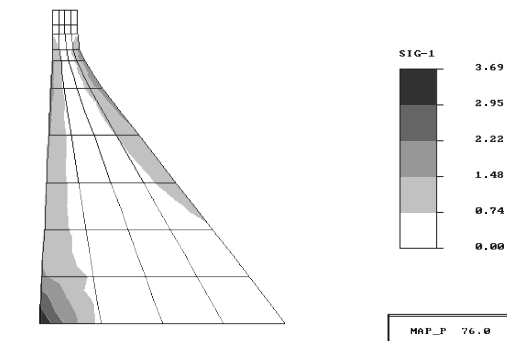
شکل ۱۰- شکل مود اول مخزن



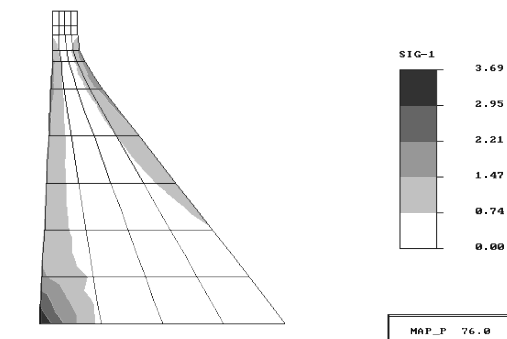
شکل ۱۱- شکل مود دوم مخزن



شکل ۶- مقایسه پاسخ جابجایی افقی در محل تاج سد به روش مستقیم و مودال وابسته- ترکیب C10

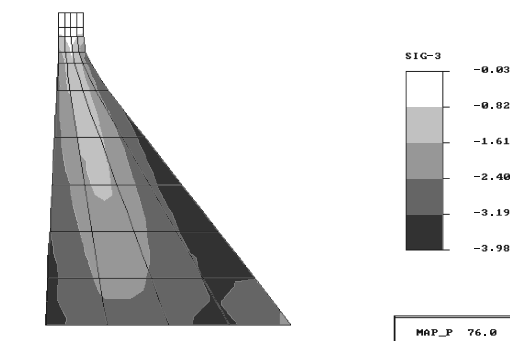


(الف)

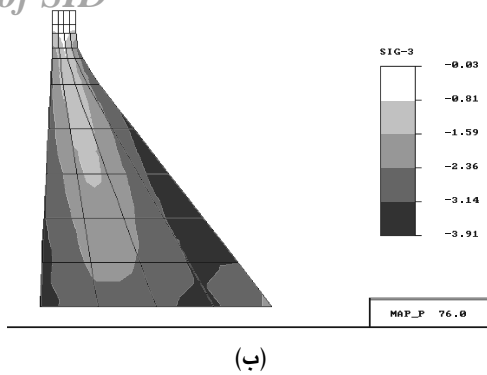


(ب)

شکل ۷- پوش حداکثر تنش اصلی کششی (MPa) حاصل از روش مستقیم (الف) و ترکیب C10 در روش مودال وابسته (ب)



(الف)



شکل ۱۴- پوش حداکثر تنش اصلی فشاری (MPa) حاصل از روش مستقیم (الف) و ترکیب D50 در روش مودال غیروابسته (ب)

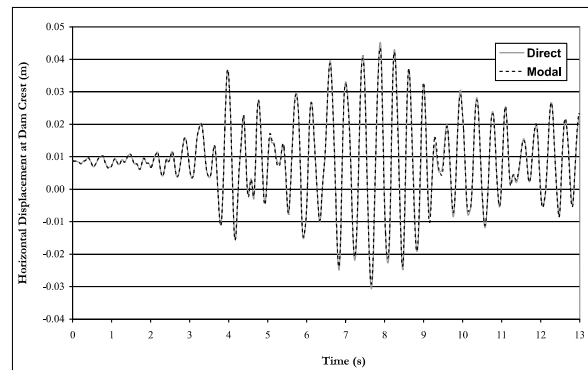
### ۶- نتیجه

دو روش برای تحلیل سدهای بتنی وزنی در دامنه زمان مورد مطالعه قرار گرفتند. یک روش بر مبنای استفاده از مودهای وابسته است و دیگری از مودهای مجزای مخزن و بدنه سد برای تحلیل سیستم استفاده می‌کند. نتایج بررسی‌ها عبارتند از:

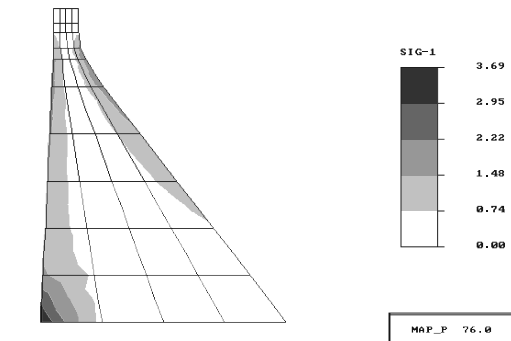
روش مودال وابسته با تعداد مودهای کم، جواب‌های بسیار دقیقی تولید می‌کند. با توجه به کارآمدی روش پیشنهادی برای محاسبه مودهای سیستم سد و مخزن وابسته، استفاده از مودهای وابسته در تحلیل برای کاربرد در برنامه‌های تخصصی تحلیل سد پیشنهاد می‌شود. در عین دقت بالا، سرعت این روش نیز بسیار بالاست.

روش مودال غیروابسته به علت عدم احتیاج به حل مسأله مقادیر ویژه نامتقارن بسیار قابل توجه است. گرچه دقت آن با افزایش مودها به آرامی افزایش می‌یابد. سرعت این روش در مقایسه با روش وابسته کمتر است و برای کاربرد در برنامه‌های عمومی تحلیل سازه‌ها پیشنهاد می‌شود.

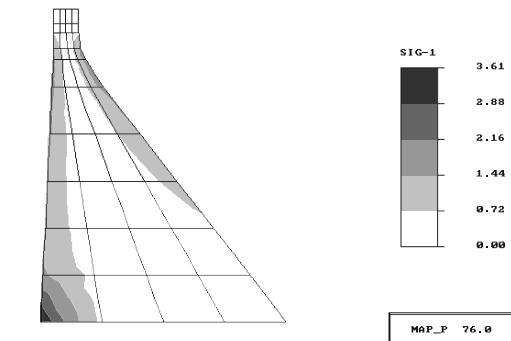
هر دو روش مورد مطالعه، به شرط ثابت ماندن هندسه و مصالح، در صورت تغییر شتابنگاشت، می‌توانند بسیار مؤثر واقع شوند. زیرا احتیاجی به محاسبه دوباره مودها وجود ندارد. درباره نمونه مورد مطالعه در این مقاله، روش وابسته با سرعتی نزدیک ۵ برابر، همان جواب‌های روش مستقیم را ارائه می‌کند. همین‌طور روش غیروابسته نیز با سرعتی نزدیک ۲/۵ برابر نتایجی با خطای کمتر از ۳٪ نسبت به روش مستقیم تولید می‌کند. برای کسب اطلاعات کاملتری از CPU time این دو روش، می‌توان به مرجع [۱] مراجعه کرد.



شکل ۱۲- مقایسه پاسخ جابجایی افقی در محل تاج سد به روش مستقیم و مودال غیروابسته- ترکیب D50

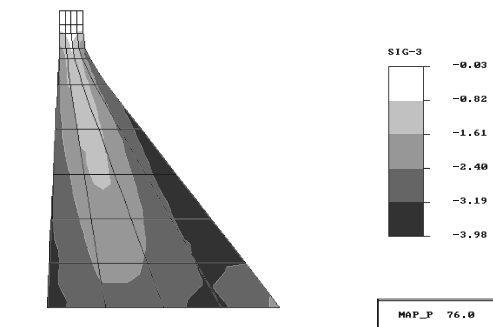


(الف)



(ب)

شکل ۱۳- پوش حداکثر تنش اصلی کششی (MPa) حاصل از روش مستقیم (الف) و ترکیب D50 در روش مودال غیروابسته (ب)



(الف)

- [۷] Mirzabozorg H.; Khaloo A. R.; Ghaemian M.; "Staggered solution scheme for three-dimensional analysis of dam reservoir interaction", Journal of Dam Eng., Vol. XIV, issue 2, pp 147-179, 2003
- [۸] Sharan S. K.; "Finite element modeling of infinite reservoirs", Proc. A.S.C.E., Vol. 111, pp 1457-1469, 1985
- [۹] Sharan S. K.; "Time domain analysis of infinite fluid vibration", International Journal for Numerical methods in Eng., Vol. 24, pp 945-958, 1987
- [۱۰] Tsai C. S.; Lee G. C.; Ketter R. L.; "A semi-analytical method for time-domain analyses of dam-reservoir interactions", International Journal for Numerical Methods in Eng., Vol. 29, pp 913-933, 1990
- [۱۱] Tsai C. S.; Lee G. C.; "Method for transient analysis of three-dimensional dam-reservoir interactions", Journal of Eng. Mechanics, Vol. 116, No.10, Oct. 1990
- [۱۲] Weber B.; "Rational transmitting boundaries for time-domain analysis of dam-reservoir interaction", Ph.D. Dissertation, Swiss Federal Institute of Tech., Zurich, Switzerland
- [۱۳] Zienkiewicz O. C.; Taylor R. L.; *The finite element method*, 5th Edition, Butterworth-Heinemann, Oxford, UK, 2000
- [۱۴] Bathe K.J.; *Finite element procedures*, 2nd Edition, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1995
- [۱] سمیعی، علی؛ آنالیز دینامیکی سدهای بتنی وزنی با استفاده از روش مودال غیروابسته در محدوده زمان، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۸۴.
- [۲] Chakrabarti P.; Chopra A. K.; "Earthquake analysis of gravity dams including hydro-dynamic interactions", Earthquake Eng. & Structural Dynamics, Vol. 2, pp 143-160, 1973
- [۳] Ghaemian M.; Ghobarah A.; "Non-linear seismic response of concrete gravity dams with dam reservoir interactions", Journal of Eng. Structures, Vol. 21, pp 306-315, 1999
- [۴] Hall J. F.; Chopra A. K.; "Two-dimensional dynamic analysis of concrete gravity and embankment dams including hydrodynamic effects", Earthquake Eng. & Structural Dynamics, Vol. 10, pp 305-332, 1982
- [۵] Lotfi V.; "Seismic analysis of concrete dams using the pseudo-symmetric technique", Journal of Dam Eng., Vol. XIII issue 2, pp 119-145, 2002
- [۶] Lotfi V.; "Seismic analysis of concrete gravity dams by a decoupled modal approach in time domain", Electronic Journal of Structural Eng., Vol. 3 (2003) pp 102-116, 2003