

آنالیز دینامیکی سدهای بتنی وزنی با استفاده از ترکیب روشهای المان مرزی و المان محدود

وحید لطفی

فرامرز خشنودیان

استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر فوق لیسانس سازه‌های هیدرولیکی دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده:

موضوع این مقاله ارائه یک برنامه کامپیوتری برای تحلیل دینامیکی سدهای وزنی بتنی با استفاده از ترکیب روش‌های المان‌های محدود و مرزی می‌باشد. بدنه سد با استفاده از المان‌های هم پارامتر چهارگره‌ای مدل شده و محیط آب به دو قسمت تقسیم شده است، محدوده نامنظم نزدیک بدنه سد که با المان‌های مرزی، و محدوده منظم با عمق ثابت که تا بی‌نهایت ادامه دارد و براساس روش المان‌های محدود مدل شده است. آب مخزن بصورت سیال غیر چرخشی و بدون لزج فرض شده است. در انتها به عنوان یک مثال کاربردی، رفتار سد pine flat در نظر گرفته شده و نتایج جابجائی و تنش‌های اصلی بدست آمده توسط برنامه کامپیوتری ارائه شده است.

Earthquake Response of Concrete Gravity Dams by Boundary Element Method

V. Lotfi

F. Khoshnoudian

Assist. prof. Civil Eng. Dept. Amirkabir Univ.

Civil Eng. Dept. Amirkabir Univ.

Abstract

The purpose of this paper is to discuss the development of a computer program for dynamic analysis of concrete gravity dams based on the combinations of finite Element and Boundary Element Methods.

Dam body is modeled by 4 noded isoparametric elements. Water is divided into two regions, the irregular part near the dam is discretized by boundary element method and the regular constant depth region which extend to infinity, modeled based on finite element method. In both of these regions water is assumed to be an irrotational and inviscid fluid.

Finally, the response of pine flat Dam is chosen as a practical example and the results of displacement and principal stresses obtained by the developed computer program are presented as an application.

سختی و مودهای ارتعاش می باشد. از طریق حل رابطه (۱-۲) با استفاده از روش تکراری معکوس می توان مودهای ارتعاش و مجذور فرکانس های طبیعی ارتعاش (w^2) را تعیین نمود. ضرایب شرکت پذیری مودها را با توجه به معادله تعادل دینامیکی و با فرض هارمونیک بودن تغییر مکان های سازه و ($c = \frac{2\beta k}{w}$) که c ماتریس استهلاك و β ضریب استهلاك می باشد و با توجه به اینکه در حالت سد خالی $F=0$ می باشد و با انجام عملیات ریاضی می توان به دست آورد. در رابطه زیر $y_i(w)$ ضرایب شرکت پذیری مودها و $r_i(w)$ تغییر شکل نسبی سد خالی در محدوده فرکانس می باشد.

$$y_i(w) = \frac{F_{xi}}{[-w^2 + w_i^2(1 + 2\beta i)]} \quad r_i(w) = \underline{X} \cdot \underline{Y}_i(w) \quad (2-2)$$

در رابطه فوق w فرکانس تحریک و w_i فرکانس طبیعی ارتعاش سازه و $\underline{X}^T \underline{M} \underline{J}^x = \underline{F}_x$ می باشد.

۳- تحلیل دینامیکی سد پر

شکل (۱) مدل انتخابی برای سیستم سد و مخزن را نشان می دهد. قانون حاکم بر حرکت آب در مخزن از معادلات ناویه استوکس تبعیت می کند. با فرض هارمونیک بودن حرکت فونداسیون می توان فشار هیدرودینامیک را به صورت $(P = P(x, y, w)e^{i\omega t})$ بیان نمود. \bar{P} فشار هیدرودینامیک و w فرکانس ارتعاش می باشد در نتیجه معادله ناویه استوکس به صورت زیر تبدیل خواهد شد:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + K^2 P = 0 \quad (1-3)$$

عدد موج (K) برابر نسبت w/c می باشد. با توجه به شکل (۱) مخزن سد را می توان به دو قسمت المان سیال و المان بی نهایت تقسیم نمود. در المان سیال جهت حل معادله حاکم از روش المان مرزی استفاده شده است که در این روش با استفاده از تابع وزنی P^* که در معادله حاکم صادق است، خواهیم داشت:

$$\iint_A \left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + K^2 P \right) P^* dx dy = 0 \quad (2-3)$$

$$\rightarrow -C_i P_i = \int_s P q_i^* ds - \int_s P^* q_i ds$$

روش های المان محدود و المان مرزی، روش هایی کلی هستند. در روش المان محدود حوزه مورد نظر را به یک سری المان تقسیم می کنند و سپس معادلات حاکم بر مسأله به نحوی روی حوزه به وسیله توابعی تقریب زده می شوند که بتوانند کاملاً نسبتاً شرایط مرزی را ارضاء کنند. در روش المان مرزی تنها مرزهای حوزه مورد نظر را به تعدادی المان تقسیم می کنند و از توابعی استفاده می شود که معادلات حاکم را در داخل حوزه ارضاء کند، ولی شرایط مرزی را ارضاء نمی نماید. از محاسن روش المان مرزی، دقت بیشتر، اطلاعات ورودی کمتر و سرعت عمل بیشتر می باشد. همچنین می توان دقت جواب را در بعضی از نقاط مورد نظر بیشتر کرد، در مقابل ماتریس نهایی روش المان مرزی کاملاً پرمی باشد و این امر سبب کاهش راندمان روش مزبور می گردد.

موضوع این مقاله در رابطه با آنالیز دینامیکی سدهای بتنی وزنی با استفاده از ترکیب روش المان مرزی و المان محدود می باشد. سازه سد به صورت المان های هم پارامتر جامد و مخزن نیز توسط المان بی نهایت و المان سیال مدل شده است. سازه سد و المان بی نهایت از طریق روش اجزاء محدود و المان سیال با استفاده از روش المان مرزی، مورد بررسی قرار گرفته اند. جهت آنالیز مصالح جسم سد ایزوتوپ و الاستیک خطی و پی سد صلب و موج های آب مخزن غیر پیچشی و با دامنه کم و آب مخزن غیر چسبنده و مؤلفه افقی حرکت زمین در امتداد مسیر رودخانه و عمود بر محور سد در نظر گرفته شده است. علاوه بر این، مخزن از سمت بالا دست تا بی نهایت امتداد یافته و وجه بالا دست سد، هر شبی را می تواند دارا باشد.

۲- تحلیل دینامیکی سد با مخزن خالی

این تحلیل با استفاده از روش انطباق مودهای ارتعاش که دارای سرعت عمل بیشتری نسبت به روش مستقیم می باشد، انجام گردیده است. ابتدا در حالت ارتعاش آزاد با فرض هارمونیک بودن تغییر مکان های سازه معادله تعادل دینامیکی سازه بدون استهلاك به صورت زیر تبدیل خواهد شد:

$$\underline{K} \underline{X} = w^2 \underline{M} \underline{X} \quad (1-2)$$

در رابطه فوق \underline{M} و \underline{K} و \underline{X} به ترتیب ماتریس جرم،

$$P_i = X_f \cdot \Gamma$$

$$P_{total} = P_i + P_{part} \quad q_{total} = \frac{\partial P_{total}}{\partial n} = X_f \cdot K \cdot \Gamma \quad (6-3)$$

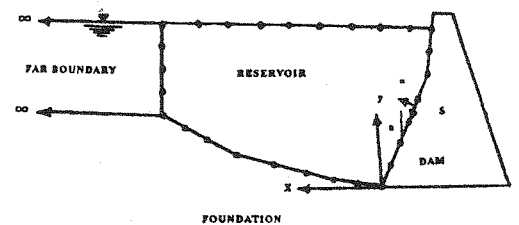
در رابطه فوق Γ ضرایب شرکت پذیری و X_f ماتریس متشکل فشار گره‌های المان بی نهایت و K ماتریس قطری متشکل از عناصر قطری $-ik$ می باشد. در مرحله بعد باید بین المان بی نهایت و المان سیال شرط سازگاری را برقرار نمود (فشار در گره‌های المان بی نهایت با گره‌های المان سیال که متصل به المان بی نهایت می باشد برابر است و مشتق فشار این دو با هم برابر، ولی یک علامت منفی با یکدیگر اختلاف دارند). در صورتی که در المان سیال از المان‌های نوع ثابت که فشار و مشتق فشار در روی هر المان ثابت و برابر مقدار آن در وسط المان می باشد، استفاده کنیم احتیاج به ماتریس انتقال T_p جهت انتقال فشار و مشتق فشار از گره‌های المان بی نهایت به المان سیال می باشد، ولی در صورتی که در المان سیال از المان‌های نوع خطی که فشار و مشتق فشار روی هر المان متغیر خطی است و تابع فشار و مشتق فشار در ابتدا و انتهای هر المان می باشد، استفاده کنیم احتیاج به ماتریس T_p نمی باشد. برای به دست آوردن تغییر شکل سد در محدوده فرکانس فشار محاسبه شده از طریق المان سیال را در حالت المان ثابت توسط ماتریس انتقال T به فشار وارد بر گره‌های سد تبدیل می کنیم (در حالتی که از المان‌های نوع خطی استفاده کنیم ماتریس T لازم نمی باشد) و سپس با استفاده از ماتریس Q^T می توان فشار وارد بر گره‌های سد را به نیرو تبدیل نمود. با استفاده از معادله تعادل دینامیکی و با توجه به توضیحات مندرج و با انجام عملیات ریاضی در حالت زمین لرزه افقی برای المان نوع ثابت و خطی و در حالت زمین لرزه قائم برای المان نوع ثابت و خطی خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} [-w^2 \underline{I} + (1+2\beta i) \underline{\Lambda} + w^2 \underline{X}^T \underline{Q}^T \cdot \underline{T} \cdot \underline{PREL}] \underline{y} &= -\underline{X}^T \\ \underline{M} \underline{J}^x + \underline{X}^T \underline{Q}^T \cdot \underline{T} \cdot \underline{PRG} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \\ [-w^2 \underline{I} + (1+2\beta i) \underline{\Lambda} + w^2 \underline{X}^T \underline{Q}^T \cdot \underline{PREL}] \underline{y} &= -\underline{X}^T \\ \underline{M} \underline{J}^x + \underline{X}^T \underline{Q}^T \cdot \underline{PRG} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (7-3)$$

$$\begin{aligned} [-w^2 \underline{I} + (1+2\beta i) \underline{\Lambda} + w^2 \underline{X}^T \underline{Q}^T \cdot \underline{T} \cdot \underline{PREL}] \underline{y} &= -\underline{X}^T \\ \underline{M} \underline{J}^y + \underline{X}^T \cdot \underline{Q}^T \cdot \underline{T} \cdot \underline{PRG} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \\ [-w^2 \underline{I} + (1+2\beta i) \underline{\Lambda} + w^2 \underline{X}^T \underline{Q}^T \cdot \underline{PREL}] \underline{y} &= -\underline{X}^T \\ \underline{M} \underline{J}^y + \underline{X}^T \cdot \underline{Q}^T \cdot \underline{T} \cdot \underline{PRG} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

در رابطه (۲-۳) $(q = \frac{\partial p}{\partial n})$ می باشد و معادله مربوطه تنها برای گره i می باشد در صورتی که برای کلیه گره‌ها نوشته شود خواهیم داشت:

$$H_p = G q \quad (3-3)$$



شکل (۱) سیستم مخزن و سد وزنی

که H و G ماتریسهای N در N شامل H_{ij} و G_{ij} می باشد. در المان بی نهایت نوارهایی که تا بی نهایت ادامه داشته باشد را انتخاب می نمایم و با در نظر گرفتن توزیع فشار به صورت $(p(x, y, w) = \hat{p}(k, y, w) e^{-ikx})$ و با استفاده از روش تغییرات جزئی و انجام عملیات ریاضی بر روی رابطه (۱-۳) به رابطه زیر خواهیم رسید:

$$\lambda^2 \underline{A} \hat{p} + \underline{G} \hat{p} = \underline{R} \quad (4-3)$$

در رابطه فوق $\lambda^2 = k^2 - w^2/c^2$ و \hat{p} ماتریس متشکل فشار در گره‌ها و \underline{A} و \underline{G} ماتریس‌های سه قطری می باشد. با توجه به شرایط مرزی در زمین لرزه افقی، \underline{R} برابر صفر خواهد شد و با استفاده از روش ژاکوبی می توان N مقدار ویژه λ_p و N بردار ویژه \hat{p}_p را به دست آورد، ولی در زمین لرزه قائم رابطه (۴-۳) به صورت زیر تبدیل خواهد شد:

$$(-w^2/c^2 \underline{A} + \underline{G}) \underline{P}_{part} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ \hat{p} \end{bmatrix} \quad (5-3)$$

در رابطه فوق \underline{P}_{part} ماتریس متشکل از فشارهای گره‌ای المان بی نهایت و \hat{p} دانسیته آب می باشد. در صورتی که آب داخل مخزن سد، تراکم ناپذیر فرض شود $\underline{w} = 0$ خواهد شد. فشار و مشتق فشار در گره‌های المان بی نهایت به صورت زیر محاسبه می شود:

زمان t در راستای X و Y می باشد و T_g زمان کل طیف زلزله می باشد.
برای تعیین کرنش و تنش می توان از روابط زیر کمک گرفت.

$$\begin{aligned} \varepsilon(t) &= B \underline{\Gamma}(t) \\ \sigma(t) &= D \varepsilon(t) \end{aligned} \quad (9-3)$$

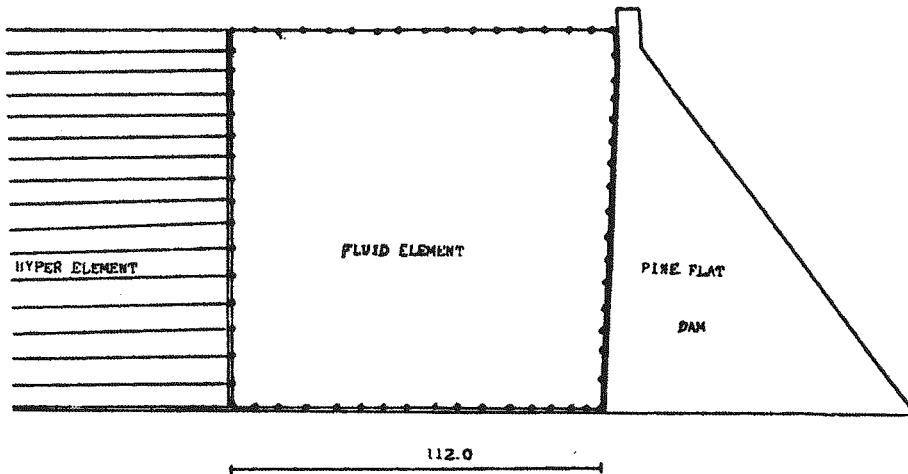
با توجه به روابط فوق برنامه ای تهیه گردید و برای کنترل آن با نتایج مدل زنگار و سد مثلثی و سد Pine Flat که توسط Chopra و همکارانش انجام شده است مقایسه گردید که جواب ها دارای دقت خوبی می باشد. در این مقاله بعضی از نتایج آنالیز دینامیکی سد Pine Flat با روش های ارائه شده در این مقاله تحت طیف زلزله Taft آورده شده است.

در روابط فوق PR_{EL} , PR_G به ترتیب فشارهای وارد برسد در حالت سد صلب و غیر صلب می باشد، در صورتی که از اثر اندرکنش بین سد و مخزن صرف نظر کنیم $PR_{EL} = 0$ خواهد بود. در کارهای عملی طیف زلزله در محدوده زمان موجود می باشد که ابتدائاً طیف زلزله را به محدوده فرکانس منتقل می شود و سپس تغییر مکان نسبی سد در محدوده فرکانس و زمان با استفاده از روابط زیر محاسبه می شود.

$$\begin{aligned} A_x^g(w) &= \int_0^{T_g} a_x^g(t) e^{-iwt} dt \\ A_y^g(w) &= \int_0^{T_g} a_y^g(t) e^{-iwt} dt \end{aligned} \quad (10-3)$$

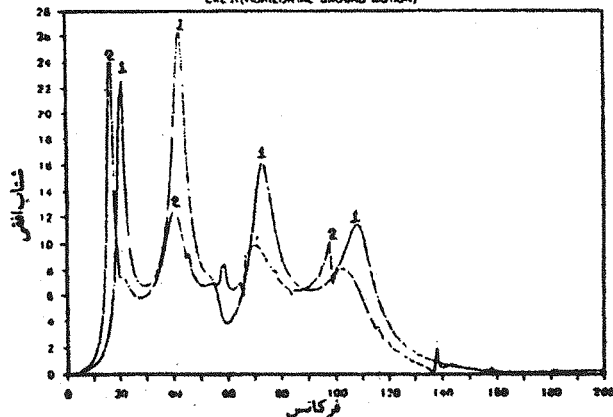
$$\begin{aligned} \underline{\Gamma}(w) &= \underline{\Gamma}_x(w) A_y^g(w) + \underline{\Gamma}_y(w) A_x^g(w) \\ \underline{\Gamma}(t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} [\underline{Y}_x(w) A_x^g(w) + \underline{Y}_y(w) A_y^g(w)] e^{iwt} dw \end{aligned}$$

در رابطه فوق $a_x^g(t)$ و $a_y^g(t)$ مؤلفه های طیف زلزله برای

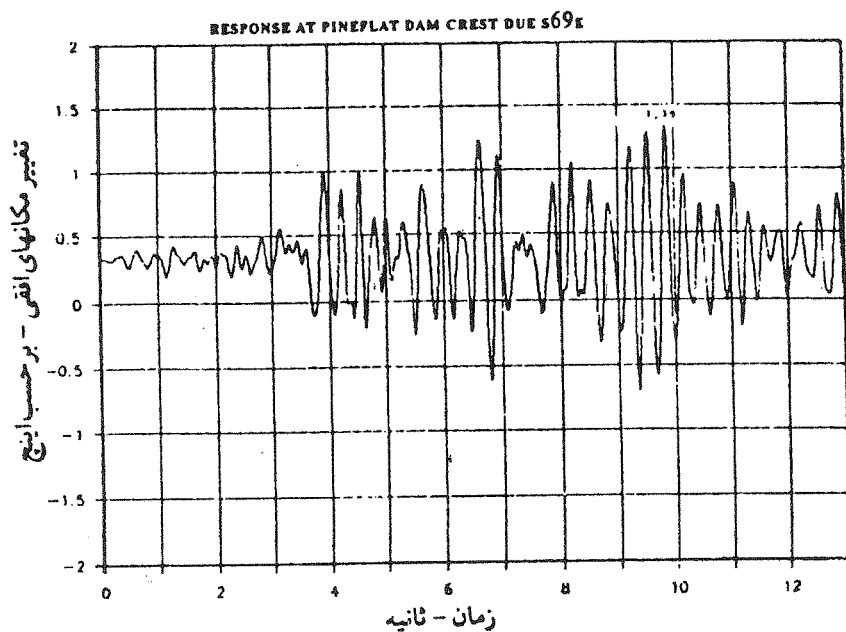


شکل (۲) مدل ریاضی سد و مخزن Pine flat

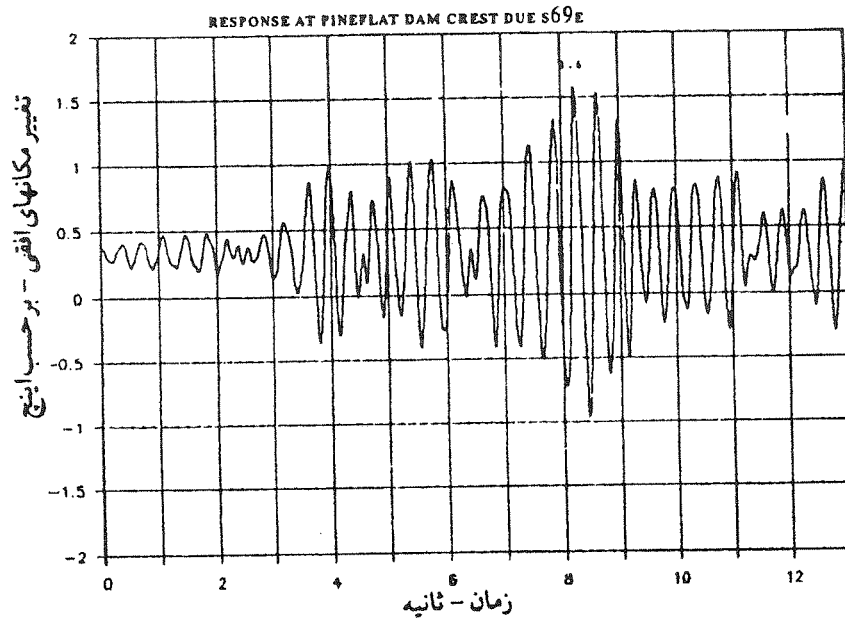
ABSOLUTE VALUE OF ACCELERATIONS AT DAM
CREST (HORIZONTAL GROUND MOTION)



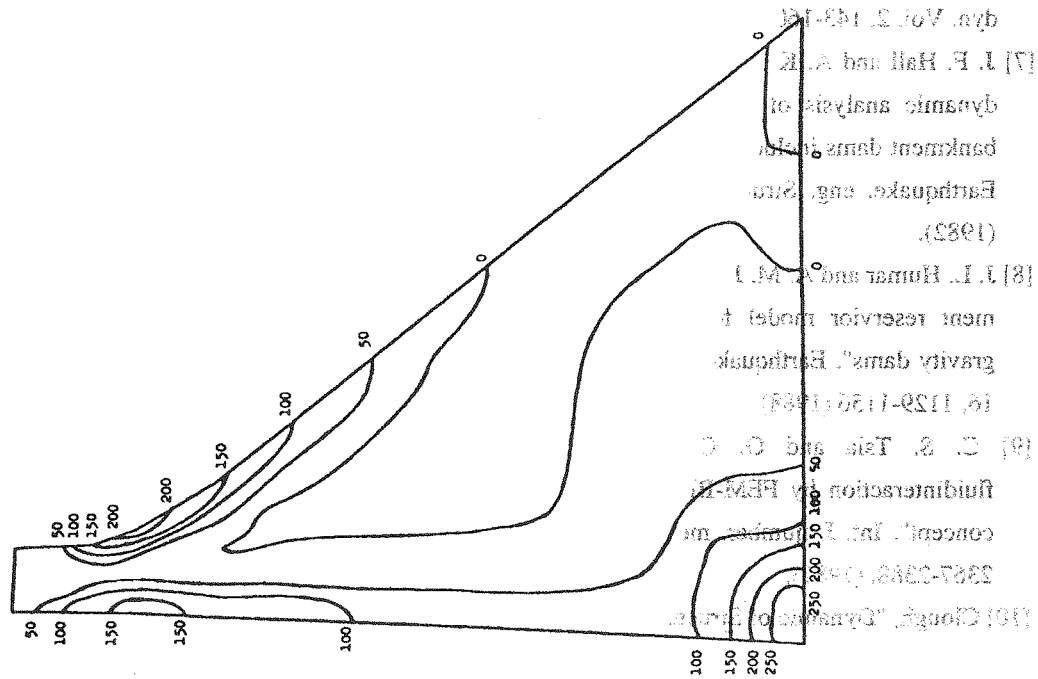
شکل (۳) مؤلفه افقی عکس العمل تاج سد برای شتاب واحد افقی زمین (۱ = سد خالی، ۲ = سد پر، آب قابل تراکم فرض شده و اثر اندرکنش در نظر گرفته شده است)



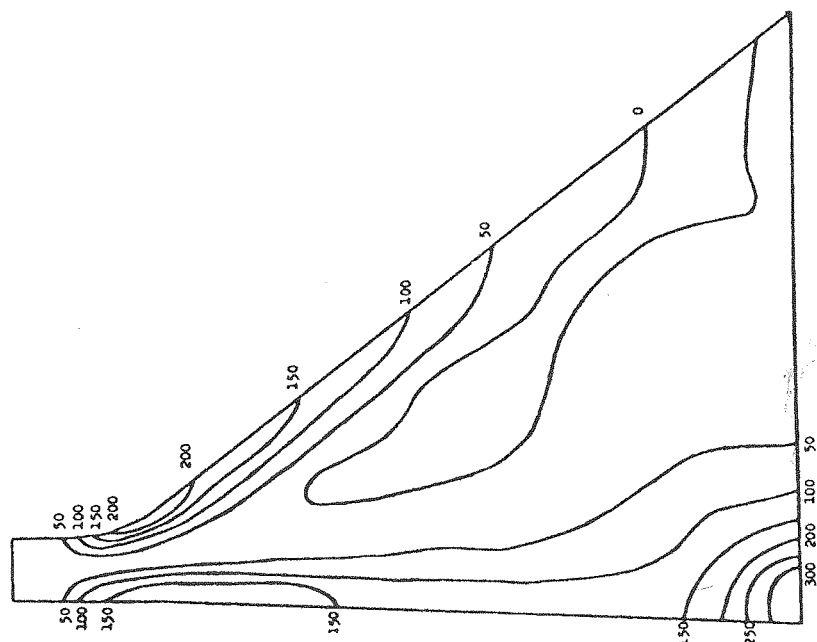
شکل (۴) مؤلفه افقی جابجایی تاج سد ناشی از طیف زلزله تفت در محدوده زمان (اثر فشارهای هیدرودینامیک صرف نظر شده است)



شکل (۵) مؤلفه افقی جابجایی تاج سد ناشی از طیف زلزله تفت در محدوده زمان (اثر فشارهای هیدرودینامیک در نظر گرفته شده است)



شکل (۶) خطوط هم تنش در سد Pine flat برای تنش های اصلی کششی ناشی از زلزله (تأثیر فشارهای هیدرودینامیک صرف نظر شده است)



شکل (۷) خطوط هم تنش در سد Pine flat برای تنش های اصلی کششی ناشی از زلزله (فشارهای هیدرودینامیک در نظر گرفته شده است)

منابع:

- dyn. Vol. 2, 143-160, (1973).
- [7] J. F. Hall and A. K. Chopra, "Two dimensional dynamic analysis of concrete gravity and embankment dams including hydrodynamic effect", Earthquake. eng. Struct. dyn. Vol 10. 305-332 (1982).
- [8] J. L. Humar and A. M. Jablonski, "Boundary element reservoir model for seismic analysis of gravity dams", Earthquake eng. Struct. dyn. Vol 16, 1129-1156 (1988).
- [9] C. S. Tsia and G. C. Lee. "Arch dam-fluid interaction by FEM-BEM and substructure concept", Int. J. number. methods. eng. Vol 24. 2367-2388. (1987).
- [10] Clough, "Dynamic of Structures".
- [1] تحلیل دینامیکی سدهای بتنی وزنی با استفاده از روش المان مرزی و المان محدود - فرامرز خشنودیان - بهمن ماه ۱۳۶۹ - دانشگاه صنعتی امیرکبیر
- [2] Y.G. Hanna and J. L. Humar, "Boundary element analysis of fluid domain", J. eng. mech. div. ASCE 108, 436-450 (1982).
- [3] C. A. Brebbia, "The boundary element method for engineers".
- [4] Brebbia and Ferrante, "Computational hydraulics".
- [5] Lotfi, "Analysis of response of dams for earthquakes", January 1986.
- [6] P. Chakrabarti and A. K. Chopra, "Earthquake analysis of gravity dams including hydrodynamic interaction", Earthquake eng. struct.