

## بررسی تأثیر رفتار غیرخطی بتن روی نمایش لرزه‌ای سد بتنی قوسی با استفاده از مدل اجزای محدود

مجید پاسبانی خیاوی<sup>۱\*</sup>

مرتضی علی قربانی<sup>۲</sup>

پریا احمدی<sup>۳</sup>

### چکیده

در این تحقیق به بررسی اثر رفتار غیرخطی بتن بدنه سد بر روی پاسخ لرزه‌ای سد بتنی دوقوسی پرداخته شده است. برای آنالیز از نرم‌افزار ANSYS استفاده شده که بر پایه روش اجزای محدود است. برای مطالعه موردی، آنالیز لرزه‌ای سد بتنی قوسی مارپوینت انتخاب شده و تأثیر اندرکنش سد، مخزن و فونداسیون در مدل لحاظ شده است. برای بررسی رفتار لرزه‌ای، مؤلفه‌های زلزله استنtro به مدل اعمال شده است. رفتار بتن بدنه سد برای دو حالت خطی و غیرخطی به صورت جداگانه با تحلیل دینامیکی بررسی شده و نتایج مربوط به تغییر مکان تاج سد و تنش‌های اصلی استخراج شده و با هم مقایسه شده‌اند. نتایج حاصل از تحلیل، گویای تأثیر رفتار غیرخطی بتن بدنه سد بر روی پاسخ‌ها بوده، بهنحوی که تغییرات مکانی در حالت رفتار غیرخطی بتن افزایش و تنش‌های اصلی کاهش یافته است. در واقع نتایج نشان می‌دهند که با اعمال رفتار غیرخطی بر بتن بدنه سد، می‌توان از بیشینه ظرفیت سازه استفاده کرد و این امر منجر به افزایش دقت در ملاحظات و ارزیابی‌ها در زمینه رفتارهای خطی و غیرخطی مصالح برای ارائه مدل‌های بهینه خواهد بود.

### واژه‌های کلیدی

سد قوسی، تحلیل دینامیکی، رفتار غیرخطی، بتن، اجزای محدود، زلزله.

\* دانشیار گروه عمران، دانشکده فنی، دانشگاه محقق اردبیلی [pasbani@uma.ac.ir](mailto:pasbani@uma.ac.ir)

۲. استادیار گروه عمران، دانشکده فنی، دانشگاه محقق اردبیلی.

۳. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران-سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه محقق اردبیلی.

## مقدمه

بارهای ایستا، تنش فشاری محاسبه شده بسیار کمتر از مقاومت فشاری بتن است. با این حال زلزله می‌تواند تنش‌های بزرگی، هم از نوع فشاری و هم از نوع کششی را به علت ترکیب تنش استاتیک و دینامیک و امکان تجاوز از محدوده پاسخ‌های خطی بتن فراهم آورد (پاسبانی خیاوی و همکاران (۲۰۰۹) و کلانی و همکاران (۲۰۱۳)).

از جمله سازه‌هایی که تأثیر رفتار مصالح بتن روی آن‌ها کمتر توسط محققین مورد بررسی قرار گرفته است (اطفی، ۱۹۹۶)، سدهای بتني دو قوسی هستند که در این تحقیق به این مهم، با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش پرداخته می‌شود. تمامی دامنه‌های مؤثر بر رفتار لرزاهاي سد در مدل‌سازی نیز در نظر گرفته می‌شود. برای جلوگیری از انعکاس امواج در مرزاها سنگ بی، مطابق معمول تحلیل دینامیکی سدهای بتني، از مدل بدون جرم برای سنگ پی استفاده شده است؛ به عبارت دیگر، صرفاً انعطاف‌پذیری پی مدنظر است. لازم به ذکر است که در مدل‌سازی مخزن، آب سد، تراکم‌پذیر فرض شده است (ERC FERC، ۱۹۹۹).

مطابق با پژوهش‌های برخی محققان که برای مطالعه رفتار غیرخطی مصالح بتن از نرم‌افزارهای اجزای محدود از جمله ANSYS بهره برده‌اند (پاسبانی خیاوی و همکاران (۲۰۰۹) و چنگ و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۱۶)) و نیز با توجه به کارایی‌های مفید ANSYS این نرم‌افزار، در این مطالعه از نرم‌افزار اجزای محدود برای مدل‌سازی عددی معادلات حاکم استفاده شده است. به کمک این نرم‌افزار سد بتني دو قوسی ماروبوینت به عنوان مدل نمونه، آنالیز گردیده و تأثیر رفتار غیرخطی مصالح بدن سد بر روی پاسخ سازه، مورد بررسی قرار گرفته است.

## مواد و روش‌ها معادلات حاکم

فرمول‌بندی مسئله با توجه به ملاحظات سازه‌ای و هیدرودینامیکی انجام می‌پذیرد. در این تحقیق سیال داخل مخزن سد، به صورت غیر لزج، تراکم‌نابذیر و با تغییر مکان‌های کوچک فرض می‌شود. فونداسیون به صورت جامد پلاستیک با رفتار خطی مصالح و بدنی سد نیز به صورت جامد پلاستیک با رفتار خطی و غیرخطی در نظر گرفته شده است.

سدهای بتني قوسی جزء سازه‌هایی هستند که ارزیابی مستمر اینمی آن‌ها اهمیت فراوانی دارد. با این حال به دلیل پیچیدگی ذاتی سدهای بتني، هنوز هم موارد مبهم زیادی وجود دارد که باید مورد توجه قرار گیرد. بتن دارای رابطه‌ای غیرخطی و پیچیده بین تنش و کرنش است که به میزان و تاریخچه بارگذاری وابسته است. عملکرد صحیح لرزاهاي یک سازه مستلزم آن است که مقاومت قابل دسترسی و ظرفیت‌های تغییر شکل اعضا بیش از نیازهای تحمل شده به سازه بر اثر زمین‌لرزه باشد. با توجه به رفتار سازه در زمان وقوع زمین‌لرزه، ارزیابی عملکرد دقیق آن باید توسط تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی منتخب صورت گیرد. با ورود سازه به حیطه رفتار غیرخطی تحت اثر زلزله، جابه‌جایی‌ها نسبت به نیروها توصیف بهتری از پاسخ سازه ارائه می‌دهند. اثرات مصالح در رفتار غیرخطی سدهای بتني قوسی یکی از مسائل مورد توجه پژوهشگران بوده و تحقیقاتی در این زمینه انجام شده است (میرزا بزرگ و همکاران (۲۰۰۵)، حریری و همکاران (۲۰۱۲)). اما در این پژوهش‌ها توجه چندانی به رفتار غیرخطی بتن بدن سد نشده است. دلیل اهمیت بررسی رفتار غیرخطی مصالح و سازه‌ها این است که در زلزله‌های شدید، اکثر سازه‌ها وارد ناحیه غیرخطی می‌شوند، به همین دلیل برای اقتصادی شدن طرح می‌توان از ظرفیت کل سازه استفاده کرد، استفاده از ظرفیت پلاستیک تنها برای اقتصادی شدن طرح نیست، بلکه دلایل مهم‌تری نیز دخیل‌اند که یکی از این موارد جذب بالای انرژی زلزله است. به عبارتی رفتار غیرخطی باعث می‌شود تا میرایی در سازه افزایش یابد. این امر خود باعث میرا شدن انرژی زلزله در طی زمین‌لرزه شد، از رفتار صلب سازه جلوگیری می‌کند و از بیشینه ظرفیت سازه استفاده می‌شود (تابش پور، ۱۳۹۰). لذا در مطالعاتی نیز رفتار غیرخطی مصالح مورد بررسی قرار گرفته است ( محمودی و همکاران، ۲۰۱۶).

از این‌رو، در این پژوهش سعی شده است تأثیر مصالح بدن سد در رفتار غیرخطی سدهای بتني قوسی مورد بررسی قرار گیرد. به دلیل این که سدهای بتني برای مقاومت در مقابل بارهای اولیه، نظیر گرانش و هیدروداستاتیک، طراحی شده‌اند، تنش‌های کششی ناشی از چنین بارهای استاتیک کمینه است و یا وجود ندارد. علاوه بر این در معیارهای طراحی موجود برای

<sup>2</sup> Cheng

<sup>۱</sup> Federal Energy Regulatory Commission

برای مخزن از شرط مرزی استهلاک سامرفلد استفاده می‌شود:

$$\frac{\partial P}{\partial x} = -\frac{1}{C} \frac{\partial P}{\partial t} \quad (6)$$

که  $C$ =سرعت انتشار امواج.

#### فرمول بندی اجزای محدود معادلات حاکم

معادلات حاکم بر سیستم سد-مخزن-فونداسیون با استفاده از روش اجزای محدود به صورت ماتریسی بسط داده می‌شود. به کمک فرمول بندی با استفاده از اجزای محدود معادله دینامیکی گستته‌سازی شده سیستم سد منتج می‌شود. ماتریس‌های عناصر مخزن نیز با گستته‌سازی معادله موج استخراج می‌شود. برای اعمال اثرات اندرکنش لازم است بار فشاری اعمال شده از طرف سیال بر روی سازه به فرمول بندی اضافه شود. بسط مشتقات مرتبه اول و دوم تغییر مکان به عنوان سرعت و شتاب برای استخراج ماتریس‌ها به کار می‌رود.

#### مدل اجزای محدود سیال

معادله (۲) شامل فشار سیال و مؤلفه‌های تغییر مکان سازه است که شامل پارامترهای مجھول برای تحلیل است. توابع شکل تقریب اجزای محدود برای متغیرهای فشار و تغییر مکان در زیر آورده شده است:

$$P = \{N_f\}^T \{P_e\} \quad (7)$$

$$u = \{N\}^T \{u_e\} \quad (8)$$

که  $\{N_f\}$ =تابع شکل عنصر برای فشار،  $\{N\}$ =تابع شکل عنصر برای تغییر مکان‌ها،  $\{P_e\}$ =بردار فشار گرهی و  $\{u_e\}$ =بردار تغییر مکان‌های گرهی. از روابط بالا مشتق دوم زمانی متغیرها و تغییرات فشار به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = \{N_f\}^T \{\ddot{P}_e\} \quad (9)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} \{u\} = \{N\}^T \{\ddot{u}_e\} \quad (10)$$

$$\delta P = \{N_f\}^T \{\delta P_e\} \quad (11)$$

با اعمال عملگر  $\{L\}$  روی توابع شکل عنصر داریم:

$$[B] = \{L\} \{N_f\}^T \quad (12)$$

#### مدل سازی دامنه سد

برای نوشتمن معادله حاکم بر رفتار سد، با در نظر گرفتن تعریف کامل اندرکنش سازه و سیال، بار ناشی از فشار هیدرودینامیکی سیال در محل تماس سازه و سیال، به معادلات سازه یا همان معادله حرکت افزوده می‌شود.

$$M \ddot{U} + C \dot{U} + K U = M \ddot{U}_g + F^{Pr} \quad (1)$$

در رابطه بالا،  $M$ ،  $C$  و  $K$  به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی سازه هستند.  $U$  و  $\dot{U}$  به ترتیب بردارهای تغییر مکان نسبی و شتاب زمین و  $F^{Pr}$  بار فشاری واردہ از سیال بر سد در محل تماس است.

#### مدل سازی دامنه مخزن

معادله مربوط به دینامیک سازه برای مسائلی که دارای اندرکنش سازه-سیال هستند، همراه با معادلات ناپیر-استوکس اندازه حرکت و پیوستگی سیال، استفاده می‌گردد. این معادلات با فرضیاتی شامل غیر لزج بودن و تراکم‌پذیری سیال داخل مخزن و تغییر مکان‌های کوچک به معادله موج منتهی می‌شوند. برای تشکیل ماتریس اندرکنش، فشار اعمالی از سیال بر سازه در محل تماس در نظر گرفته می‌شود (احمدی و همکاران (۱۳۷۲) و چوبرا (۱۹۶۸)).

$$\frac{1}{C^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} - \nabla^2 P = 0 \quad (2)$$

در رابطه بالا  $P$ =فشار هیدرودینامیکی،  $t$ =زمان و  $C$ =سرعت امواج صوتی در سیال که از رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

$$C = \sqrt{\frac{K}{\rho_0}} \quad (3)$$

که در آن  $K$  مدول سختی سیال و  $\rho_0$  جرم مخصوص سیال است.

#### شرایط مرزی

برای سطح آزاد مخزن، از اثرات امواج سطحی صرف نظر می‌شود، بنابراین:

$$P = 0 \quad (4)$$

شرط مرزی اندرکنش اعمالی در محل تماس مخزن با سد و فونداسیون به شکل زیر است:

$$\rho \vec{a}_{ns} = -\frac{\partial P}{\partial n} \quad (5)$$

که در آن  $n$  بردار واحد عمود بر سطح سد یا فونداسیون و به سمت داخل سیال است و  $\vec{a}_{ns}$  بردار شتاب سد یا فونداسیون در مرز مشترک با مخزن است.

که  $\{F_e^{\text{Pr}}\}$  بردار بار فشاری از طرف سیال است و با انتگرال‌گیری در محل تماس به دست می‌آید:

$$\{F_e^{\text{Pr}}\} = \int_S \{N\} P \{n\} dS \quad (20)$$

که  $\{N\}$  و  $\{n\}$  به ترتیب توابع درون‌یابی برای گسسته-سازی مؤلفه‌های تغییر مکان و بردار نرمال در محل تماس هستند.

$$\{F_e^{\text{Pr}}\} = \int_S \{N\} \{N_f\}^T \{n\} dS \{P_e\} \quad (21)$$

$$\{F_e^{\text{Pr}}\} = [\text{Re}] \{P_e\} \quad (22)$$

که در آن:

$$[R_e]^T = \int_S \{N\} \{N_f\}^T \{n\} dS \quad (23)$$

حال می‌توان معادله اجزای محدود سازه را با جایگزینی معادله (۲۰) در معادله (۱۹) به دست آورد:

$$\begin{aligned} [M_e] \{\ddot{u}_e\} + [C_e] \{\dot{u}_e\} + \\ [K_e] \{u_e\} - [\text{Re}] \{P_e\} = \{F_e\} \end{aligned} \quad (24)$$

با حل هم‌زمان یا با استفاده از روش تکراری سعی و خطا برای دو معادله (۱۵) و (۲۴) می‌توان نتایج موردنظر را برای سیستم استخراج نمود.

### مدل غیرخطی مصالح

آنالیز غیرخطی مادی به حالت اطلاق می‌شود که با رسیدن به یک سطح معلوم تنش، کرنش برگشت‌ناپذیر می‌شود. در صورت فراتر رفتن تنش معادل محاسبه شده در حل الاستیک از تنش تسلیم، کرنش پلاستیک ظاهر خواهد شد. در این حالت، کرنش پلاستیک مقدار تنش را طوری کاهش می‌دهد که معیار تسلیم همواره ارضاء شود. کرنش پلاستیک در این حالت به طور مستقل از زمان متتحول می‌شود و به مقدار تنش و تاریخچه تنش بستگی دارد. تحلیل پلاستیک دارای سه رکن است: منحنی تنش-کرنش و معیار تسلیم، قانون جریان و

پس از آن با استفاده از روابط (۱) و (۷) تا (۱۲) و اعمال شرایط مرزی، معادله موج در فرم اجزای محدود، به شکل زیر استخراج می‌شود:

$$\begin{aligned} & \int_V \frac{1}{C^2} \{\delta P_e\}^T \{N_f\} \{N_f\}^T dV \{\ddot{P}_e\} + \\ & \int_V \{\delta P_e\}^T \{B\}^T [B] dV \{P_e\} + \\ & \int_S \rho_0 \{\delta P_e\}^T \{N_f\} \{n\}^T [N] dS \{\ddot{u}_g\} = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

که  $\{n\}$  عمود بر مرزهای سیال است.  $\{\delta P_e\}$  پارامتری اختیاری است که نشان‌دهنده تغییرات فشار گرهی است و می‌توان از آن صرف‌نظر کرد. همچنین جملاتی که روی عنصر تغییر نمی‌کنند را می‌توان بیرون انتگرال قرار داد، پس می‌توان نوشت:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{C^2} \int_V \{N_f\} \{N_f\}^T dV \{\ddot{P}_e\} + \\ & \int_V \{B\}^T [B] dV \{P_e\} + \\ & \rho_0 \int_S \{N_f\} \{n\}^T [N] dS \{\ddot{u}_e\} = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

با بازنویسی رابطه قبل به شکل ماتریسی، می‌توان معادله موج را در حالت گسسته به شکل زیر نوشت:

$$\begin{aligned} & [M_e^P] \{\ddot{P}_e\} + [K_e^P] \{P_e\} + \\ & \rho_0 [R_e]^T \{\ddot{u}_g\} = 0 \end{aligned} \quad (15)$$

که در آن  $[R_e]^T$ ،  $[M_e^P]$  و  $[K_e^P]$  به ترتیب ماتریس‌های جرم سیال، سختی سیال و جرم مربوط به اندرکنش سازه و سیال است که از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$[M_e^P] = \frac{1}{C^2} \int_V \{N_f\} \{N_f\}^T dV \quad (16)$$

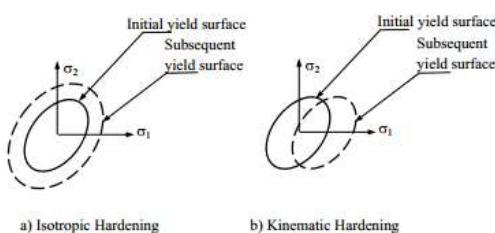
$$[K_e^P] = \int_V \{B\}^T [B] dV \quad (17)$$

$$\rho_0 [R_e]^T = \rho_0 \int_S \{N_f\} \{n\}^T [N] dS \quad (18)$$

### مدل اجزای محدود سد

برای دامنه سد، معادله اجزای محدود به شکل زیر است:

$$\begin{aligned} & [M_e] \{\ddot{u}_e\} + [C_e] \{\dot{u}_e\} + \\ & [K_e] \{u_e\} = \{F_e\} + \{F_e^{\text{Pr}}\} \end{aligned} \quad (19)$$



شکل (۲): تحول سطح تسلیم برای حالات سخت‌شوندگی ایزوتropیک و جنبشی

قانون سخت‌شوندگی تعیین می‌کند که معیار تسلیم بر اساس سخت‌شوندگی همسانگرد و یا جنبشی متحول شود:

$$F[\{\sigma\}, k, \{\alpha\}] = 0 \quad (27)$$

= کار الاستیک و  $\{\alpha\}$  = انتقال سطح تسلیم. کار پلاستیک مجموع کار پلاستیک انجام شده در کل پروسه بارگذاری است و  $C$  پارامتر مادی است. با استفاده از روابط فوق می‌توان نوشت (راهنمای ANSYS<sup>۱</sup>، نسخه ۱۲):

$$k = \int \{\sigma\}^T [M] \{d\varepsilon^{pl}\} \quad (28)$$

$$\{\alpha\} = \int C \{d\varepsilon^{pl}\} \quad (29)$$

$$dF = \left\{ \frac{\partial F}{\partial \sigma} \right\}^T [M] \{d\sigma\} + \frac{\partial F}{\partial \alpha} dk + \left\{ \frac{\partial F}{\partial \alpha} \right\}^T [M] \{d\alpha\} = 0 \quad (30)$$

با جاگذاری روابط (۲۸) و (۲۹) در رابطه (۳۰) داریم:

$$\left\{ \frac{\partial F}{\partial \sigma} \right\}^T [M] \{d\sigma\} + \frac{\partial F}{\partial \alpha} \{\sigma\}^T [M] \{d\varepsilon^{pl}\} + C \left\{ \frac{\partial F}{\partial \alpha} \right\}^T [M] \{d\varepsilon^{pl}\} = 0 \quad (31)$$

$$\{d\sigma\} = [D] \{d\varepsilon^{pl}\} \quad (32)$$

$$dk = \{\sigma\}^T [M] \{d\varepsilon^{pl}\} \quad (33)$$

$$\{d\varepsilon^{el}\} = \{d\varepsilon\} - \{d\varepsilon^{pl}\} \quad (34)$$

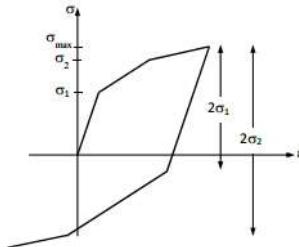
$$\{d\alpha\} = C \{d\varepsilon^{pl}\} \quad (35)$$

$$M_{ij} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (36)$$

قانون سخت‌شوندگی (چن<sup>۱</sup>، ۱۹۸۲). معیار تسلیم در بارگذاری چند محوره تنش، بیان گر تابعی از تنش‌های اصلی است که معرف سطح تسلیم است:

$$\sigma_e = f[\{\sigma\}] \quad (25)$$

به این مفهوم که هرگاه تنش معادل  $\sigma_e$  به تنش تسلیم برسد، ماده جاری خواهد شد.



شکل (۱): رفتار تنش-کرنش

قانون جریان معرف مقدار و جهت تغییرات کرنش پلاستیک بوده و به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$\{d\varepsilon^{pl}\} = \lambda \left\{ \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \right\} \quad (26)$$

= ضریب پلاستیک و  $Q$  = تابع پتانسیل پلاستیک معرف جهت کرنش پلاستیک. در صورتی که تابع پتانسیل پلاستیک، سطح تسلیم انتخاب شود، قانون جریان از نوع مرتبط بوده که در این حالت جهت کرنش پلاستیک همواره در جهت عمود به سطح تسلیم است. قانون سخت‌شوندگی نیز در حقیقت معرف تحول سطح تسلیم با افزایش کرنش پلاستیک است. در این حالت با افزایش کرنش پلاستیک معادله تسلیم باید ارضاء شود. دو قانون برای سخت‌شوندگی موجود است: سخت‌شوندگی همسانگرد و جنبشی. در قانون سخت‌شوندگی جنبشی سطح تسلیم با افزایش کرنش پلاستیک بدون تغییر حجم در فضای تنش‌های اصلی جایه‌جا می‌شود. در حالی که در سخت‌شوندگی همسانگرد سطح تسلیم بدون جایه‌جا تغییر حجم می‌دهد. شکل (۲) نمونه‌ای از تغییرات سطح تسلیم را بر اساس این دو قانون نشان می‌دهد.

<sup>1</sup> Chen

<sup>2</sup> Ansys 11 Help Manual

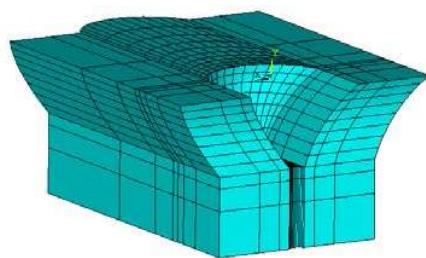
هر قسمت محاسبه خواهد شد. روش محاسبه بر اساس فرمول زیر است:

$$\{\Delta \varepsilon^{pl}\} = \sum_{i=1}^{N_{sv}} W_i \{\Delta \varepsilon_i^{pl}\} \quad (40)$$

در این تحقیق از مدل رفتاری غیرخطی سخت‌شوندگی جنبشی چندخطی در حالت سه‌بعدی بهره گرفته شده است.

### نتایج

آنالیز لرزه‌ای سد بتونی قوسی با استفاده از نرم‌افزار ANSYS که بر پایه روش اجزای محدود است، صورت گرفته است. نرم‌افزار موردنظر قابلیت آنالیز لرزه‌ای با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش مخزن و پی و هندسه نامنظم دامنه‌ها را دارد. برای انتگرال‌گیری عددی روش نیومارک با پارامترهای  $\beta = 0.25$  و  $\gamma = 0.5$  و گام زمانی  $\Delta t = 0.02 \text{ Sec}$  استفاده شده است. برای مدل نمونه به منظور آنالیز دینامیکی سد ماروبوینت با ارتفاع ۱۴۳ متر در نظر گرفته شده است. از عناصر Solid45 و Fluid30 برای گسسته‌سازی مدل عناصر جامد و سیال استفاده شده است که به ترتیب عنصری سه‌بعدی مناسب برای هندسه‌های خمیده قسمت جامد و نمایش خاصیت تراکم-پذیری سیال در مدل مخزن هستند. گسسته‌سازی اجزای محدود مدل در شکل (۴) و مشخصات مصالح در جدول (۱) آورده شده است.



شکل (۴): هندسه مدل سد ماروبوینت و گسسته سازی اجزای محدود

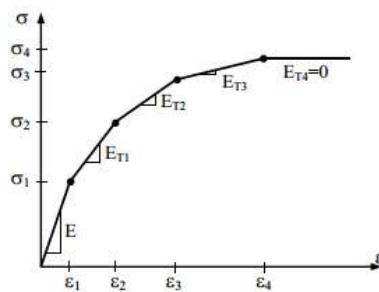
جدول (۱): مشخصات مصالح سیستم

فونداسیون	سد	دامنه
۲۶۴۳۰	۲۴۸۰۰	(N/m <sup>3</sup> ) وزن حجمی
۲۲	۲۷.۵	(GPa) مدول الاستیسیته
.۲	.۲	ضریب پواسون

$$\lambda = \frac{\left\{ \frac{\partial F}{\partial \sigma} \right\}^T [M][D]\{d\varepsilon\}}{-\left\{ \frac{\partial F}{\partial k} \right\} \{\sigma\}^T [M] \left\{ \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \right\} - C \left\{ \frac{\partial F}{\partial \alpha} \right\} [M] \left\{ \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \right\} + \left\{ \frac{\partial F}{\partial \sigma} \right\}^T [M][D] \left\{ \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \right\}} \quad (37)$$

که  $\lambda = \lambda$  ضریب پلاستیک و  $[D] =$  ماتریس تنش-کرنش.

یکی از متداویل ترین مدل‌ها برای منحنی تنش-کرنش، مدل سخت‌شوندگی جنبشی چندخطی است. این مدل اثر بوشینگر<sup>۱</sup> را در نظر می‌گیرد. رفتار مادی با فرض تشکیل شدن از قسمت‌های متفاوتی (پاره‌خط‌های بهم پیوسته ولی با شبیه متفاوت) در نظر گرفته می‌شود که همگی تحت یک کرنش کل مطابق شکل (۳) تعریف می‌شوند، اما هر قسمت مقاومت تسلیم و شبیه پس از تسلیم مربوط به خود را دارد. در این حالت موارد زیر صورت می‌گیرد:



شکل (۳): رفتار تنش-کرنش فشاری تکمحوره برای مدل سخت‌شوندگی جنبشی چندخطی

الف) مقاومت تسلیم هر قسمت محاسبه می‌شود.

ب) نمو کرنش پلاستیک برای هر قسمت محاسبه می‌شود.

ج) با محاسبه فاکتور وزنی محاسبه شده در مرحله اول، نمو کرنش پلاستیک هر قسمت محاسبه شده تا نمو کل کرنش پلاستیک محاسبه شود.

د) کرنش پلاستیک احیا شده و کرنش الاستیک محاسبه خواهد شد.

$$W_k = \frac{E - E_{TK}}{E - \frac{1-2\vartheta}{3} E_{TK}} - \sum_{i=1}^{k-1} W_i \quad (38)$$

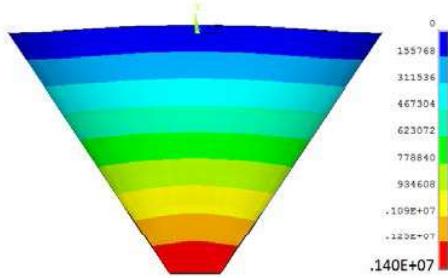
$k =$  فاکتور وزنی برای قسمت  $k$  ام،  $E_{TK} =$  شبیه قسمت ام منحنی تنش-کرنش،  $W_k = \sum_{i=1}^{k-1} W_i =$  مجموع فاکتورهای وزنی محاسبه شده قبلی.

$$\sigma_{yk} = \frac{1}{2(1+\vartheta)} (3E\varepsilon_k - (1-2\vartheta)\sigma_k) \quad (39)$$

که  $\sigma_k$  و  $\varepsilon_k$  نقاط شکست در منحنی تنش-کرنش است. بر طبق قانون جریان و معیار تسلیم مایز نمو کرنش پلاستیک

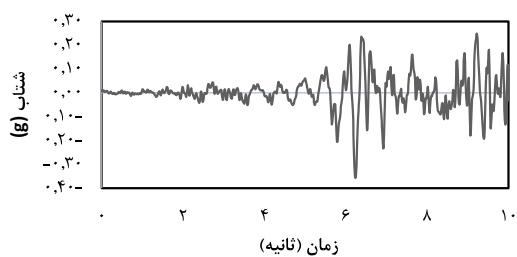
<sup>۱</sup>Bauschinger (Kinematic Hardening) Effect

بیان می‌گردد (صرف نظر کردن از فشار سطحی). در کف مخزن ( $S_2$ ) و در مرز بین سد و مخزن ( $S_4$ ) از شرط مرزی اندرکنش بین جامد و سیال استفاده می‌شود. در ابتدا راستی آزمایی دقت مدل با توجه به شبکه‌بندی و شرایط مرزی اعمالی به مدل، مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور مدل به صورت استاتیکی تحلیل شده و کانتور توزیع فشار در مخزن به صورت شکل (۸) استخراج شده است.



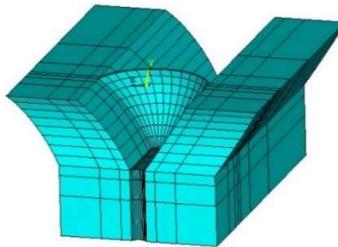
شکل (۸): توزیع فشار هیدرولاستاتیکی در بدنه سد قوسی

با توجه به شکل ۸ پیداست که توزیع فشار روندی خطی دارد. مقایسه‌ی رابطه  $pgh$  (ارتفاع مخزن معادل ۱۴۳ متر) و فشار به دست آمده از نرم افزار (معادل ۱۴۰۲۸۳۰ پاسکال)، نشان می‌دهد که مدل اجزای محدود از دقت خوبی برخوردار است. در ادامه برای انجام آنالیز لرزه‌ای و بررسی اثر رفتار غیرخطی مصالح، شتاب‌نگاشتهای زلزله‌سنترو که در سال ۱۹۴۰ رخ داد، انتخاب شده است. شکل‌های (۹) تا (۱۱) مؤلفه‌های شمال-جنوب، شرق-غرب، قائم زمین‌لرزه سنترو را نمایش می‌دهند.

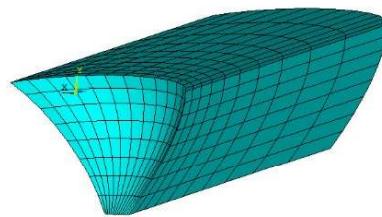


شکل (۹): مؤلفه شرق-غرب زمین‌لرزه السنترو

مدل اجزای محدود سد، مخزن و فونداسیون، در شکل‌های (۵) و (۶) نشان داده شده است.

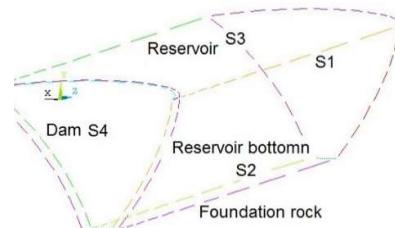


شکل (۵): مدل اجزای محدود سد- فونداسیون



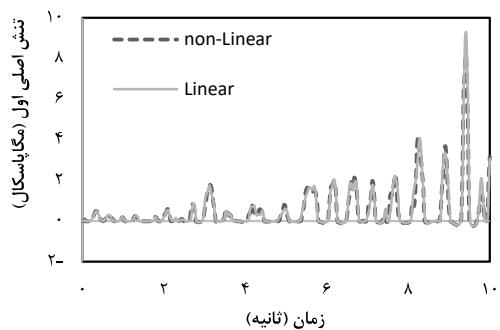
شکل (۶): مدل اجزای محدود مخزن

برای مشبندی بدنه سد و هم‌چنین فونداسیون آن از المان Solid45 که ۸ گرهی است و در هر گره سه درجه آزادی انتقالی دارد، استفاده شده است. برای مدل‌سازی مخزن از المان‌های مکعبی Fluid30 استفاده می‌شود که ۸ گرهی بوده و دارای سه درجه آزادی انتقال و یک درجه آزادی فشار در هر گره هستند. تعداد المان‌های هشت گرهی در بدنه سد ۱۳۴ در فونداسیون ۷۳۴ و در مخزن تعداد المان سیال ۸۷۵ است.

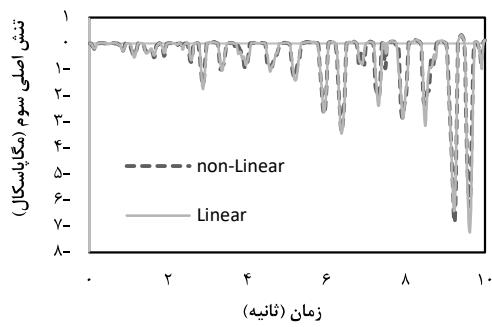


شکل (۷): سد بتونی با مخزن و شرایط مرزی چهارگانه

مطابق با شکل (۷) از شرایط حاکم در مرزهای  $S_1$  تا  $S_4$  در مدل استفاده شده است. برای شرط مرزی  $S_1$  در مرز قطع شده مخزن از شرط مرزی سامرفلد استفاده می‌شود (این شرط برای جذب کامل موج هیدرودینامیک لحاظ شده است). هم‌چنین شرط مرزی سطح آزاد مخزن ( $S_3$ ) به شکل  $P = 0$



شکل (۱۳): مقایسه تاریخچه زمانی تنش اصلی کششی برای دو حالت رفتار بتن بدنه سد



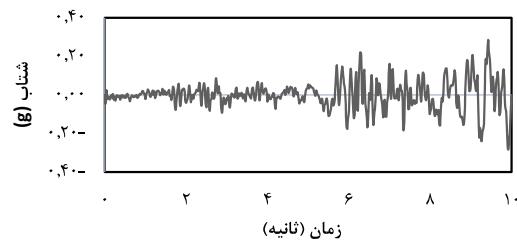
شکل (۱۴): مقایسه تاریخچه زمانی تنش اصلی فشاری برای دو حالت رفتار بتن بدنه سد

مقادیر عددی پاسخ‌ها به صورت عددی، برای بررسی دقیق تر تفاوت رفتار خطی و غیرخطی بتن بدنه سد دو قوسی، ارائه شده است.

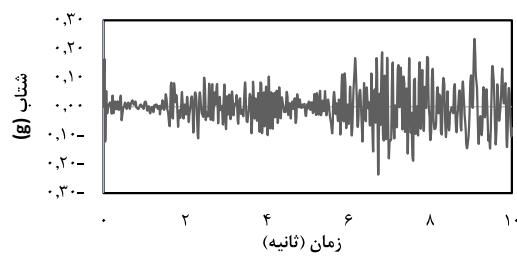
جدول (۲): مقادیر عددی و درصد افزایش پاسخ‌های بیشینه برای هر دو حالت رفتار بتن بدنه سد

رنگ فشاری اصلی (MPa)	رنگ کششی اصلی (MPa)	بیشینه تغییر مکان سد (cm)	رفتار بتن بدنه سد
-۷/۲۳	۹/۳۱	۳/۸۵	خطی
-۶/۸۳	۸/۱۵	۴/۰۱	غیرخطی
۵/۵۳ (کاهش)	۱۲/۴۵ (کاهش)	۴/۱۶ (افزایش)	درصد تغییر پاسخها

با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان گفت که اعمال رفتار غیرخطی بتن بدنه سد به همراه زلزله اعمالی السنترو بر روی سیستم سد، مخزن و فونداسیون، پاسخ لرزه‌ای تنش‌های اصلی را کاهش می‌دهد که این میزان چشمگیر است. با توجه به این که میزان تنش‌های به وجود آمده در بدنه سدهای قوسی یکی

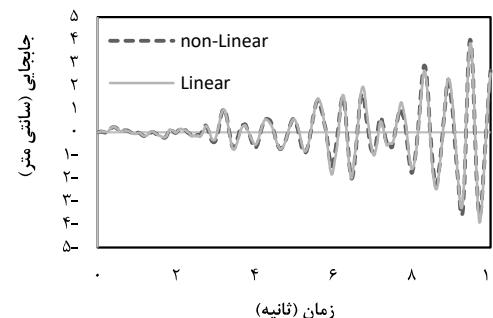


شکل (۱۰): مؤلفه شمال-جنوب زمین لرزه السنترو

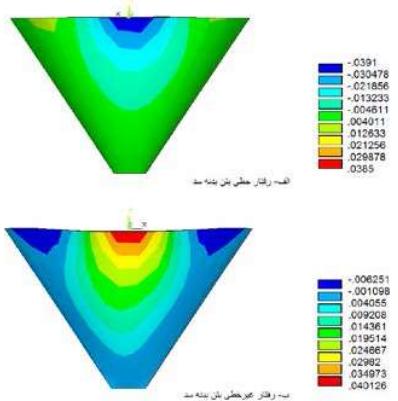


شکل (۱۱): مؤلفه قائم زمین لرزه السنترو

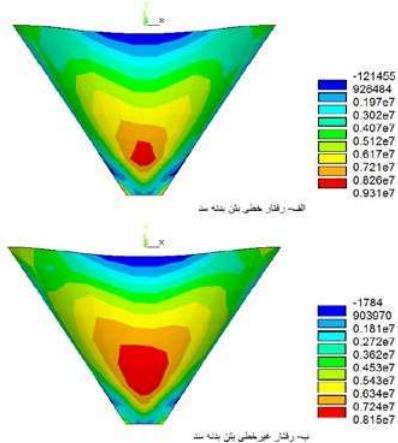
مدل موردنظر برای دو حالت رفتار خطی و غیرخطی بتن مورد تحلیل قرار گرفته و نتایج حاصل، برای دو حالت، به صورت تاریخچه زمانی ارائه شده است. برای این منظور مطابق روند تحلیل‌های تاریخچه زمانی از نقاط بحرانی جابه‌جایی و تنش‌های کششی و فشاری ماکریزم استفاده شده است (FERC<sup>۱</sup>). شکل‌های (۱۰) تا (۱۴) نتایج مربوط به تغییر مکان نقطه میانی تاج سد در امتداد مخزن و بیشینه مقدار تنش‌های اصلی در بدنه‌ی سد را برای دو حالت نشان می‌دهند.



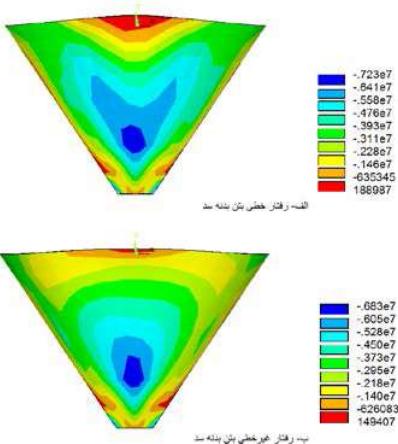
شکل (۱۲): مقایسه تاریخچه زمانی تغییر مکان تاج سد در امتداد مخزن برای دو حالت رفتار بتن بدنه سد



شکل (۱۵): کانتور تغییر مکان تاج سد در امتداد مخزن برای  
حالت رفتار خطی و غیرخطی مصالح بدن سد (پاسکال)



شکل (۱۶): کانتور توزیع تنش اصلی کششی برای حالت رفتار  
خطی و غیرخطی مصالح بدن سد (پاسکال)



شکل (۱۷): کانتور توزیع تنش اصلی فشاری برای حالت رفتار  
خطی و غیرخطی مصالح بدن سد (پاسکال)

از معیارهای مهم در طراحی است، برای طراحی این من و اقتصادی، لازم است به اثرات رفتار غیرخطی مواد توجه شود. با دقت در نمودار تاریچه زمانی شکل (۱۲) و جدول (۲)، پیداست که تغییر مکان تاج سد در امتداد مخزن، برای حالت غیرخطی بیشتر از حالت خطی است. این نتیجه کاملاً منطقی است. در بارگذاری حالت دینامیکی برای سازه، مقدار شتاب زلزله در لحظه‌های آغازین زلزله کم بوده، به طوری که سازه هنوز وارد رفتار غیرخطی نشده و رفتاری م شباه رفتار الاستیک دارد. بعد از رخداد بیشینه شتاب زلزله، سازه تسلیم و وارد مرحله غیرخطی می‌شود، یعنی برای المان مصالح، با افزایش بسیار اندرکی در تنش و کاهش سختی، طول پلاستیک زیاد شده و جاری می‌شود. از طرفی نیز باید به این نکته توجه کرد که بارگذاری زلزله به صورت پوش نبوده و سیکلی است، درنتیجه این عامل باعث می‌شود نیروهای زلزله تقلیل می‌باید و این عوامل خود دلیلی است بر این مهم که رفتار غیرخطی در طراحی و ارزیابی‌ها به مراقب بیشتر مورد توجه قرار گیرد.

با توجه به نمودارهای تاریچه زمانی در شکل‌های (۱۳) و (۱۴)، برای تنش‌های اصلی نیز، می‌توان گفت که پاسخ‌های حالت خطی از حالت غیرخطی بیشتر است. با تفکر در نمودار تنش و کرنش برای هر دو حالت خطی و غیرخطی مصالح بتن، پیداست که برای حالت خطی نمودار خطی بوده و در این ناحیه، با افزایش تنش، کرنش نیز افزایش می‌باید، اما با ورود به ناحیه غیرخطی، بعد از تسلیم، با افزایش نیرو تنش بیشتر نمی‌شود، بلکه این افزایش باعث جاری شدن می‌شود.

در ادامه برای درک بهتر اثرات رفتار غیرخطی بر تحلیل لرزه‌ای، کانتور توزیع تنش‌های اصلی و تغییر مکان به وجود آمده در بدن سد بر حسب پا سکال برای بحرانی ترین حالات، در شکل‌های (۱۵) تا (۱۷) ارائه شده است. با مقایسه کانتورهای توزیع تنش برای دو حالت، می‌توان به کاهش تنش‌های اصلی و محل وقوع بیشینه آن‌ها پی برد. کانتورهای توزیع تنش هر دو حالت، گویای کاهش ناحیه تمرکز تنش در حالت غیرخطی است و نکته قابل توجه محل تمرکز تنش بیشینه برای تنش‌های اصلی است که واقع در بدن سد است.

### نتیجه‌گیری

در این تحقیق به تأثیر رفتار غیرخطی مصالح بدن سد بر پاسخ لرزه‌ای سد دو قوسی با در نظر گرفتن اثرات اندکنش پرداخته شد. برای بررسی این مهم، از مدلی که با استفاده از روش

of optimization in civil engineering. 2(4), 573-606.

8- Kalani Sarokolayi, L., Navayi Neya, Vaseghi Amiri, J. (2013), "Nonlinear dynamic analysis of concrete gravity dams considering rotational component of ground motion." *International journal of civil engineering*. 13(1), 16-29.

9- Lotfi, L. (1996). "Comparison of discrete crack and elastoplastic model in nonlinear dynamic analysis of arch dams." *Dam Engineering*, Vol. VII, Issue 1.

10- Mahmoudi, P. P., Mirzabozorg, H., Varmazyari, M. and Aghajanzadeh, S. M. (2016). "Effect of foundation nonlinearity on seismic response of an existing arch dam." *Civil engineering journal*. 2(5), 197-207.

11- Mirzabozorg H, Ghaemian M. (2005). "Nonlinear behavior of mass concrete in three dimensional problems using a smeared crack approach." *Earthquake engineering and structural dynamics*. 34, 247-269.

12- Moradloo, J. (2007). "Nonlinear dynamic analysis of arch concrete dam considering large displacements effects." PhD Thesis, Department of civil engineering, TMU.

13- Ghorbani, M. A., Khiavi, M. P. and Moghaddam, F. R. (2009). "Nonlinear analysis of shear wall using finite element model." *International journal of civil, environmental, structural, construction and architectural engineering*. 3(10), 375-379.

اجزای محدود تهیه شده، استفاده گردیده و نتایج پاسخ‌ها برای دو حالت رفتار خطی و غیرخطی مصالح بدن سد مقایسه شده است. مدل موردنظر با اعمال زلزله استندر مورد تحلیل قرار گرفته است. با توجه به کانتورهای تغییر مکان تاج سد در راستای مخزن، تغییر مکان محدود نقطه‌ی شاخص سد همچون تاج سد، نشان‌دهنده‌ی پایداری سازه است. نتایج بیان‌گر کاهش پاسخ تنش‌ها و افزایش تغییر مکان‌ها در حالت رفتار غیرخطی بتن است. در خاتمه می‌توان نتیجه گرفت که با اعمال رفتار غیرخطی مصالح بر مدل و یا طرح و همچنین اعمال زلزله مناسب بر مدل، می‌توان از بیشینه ظرفیت سازه استفاده کرد و مسائل طراحی اینم، نظریه میرا کردن انرژی زلزله را با استفاده از خواص رفتار غیرخطی برای طرح لحاظ نمود. نتایج حاصل، می‌تواند برای تحلیل‌های اولیه و نیز ارزیابی اینمی طرح‌ها و سدهای موجود مفید واقع شود.

## مراجع

- ۱- پاسبانی خیاوی، م..، قربانی، م. ع. و سیفی، ل. (۱۳۹۴). "بررسی تأثیر مؤلفه پیچشی زلزله روی رفتار لرزه‌ای سدهای بتنی دو قوسی با استفاده از مدل اجزای محدود"، نشریه علمی- پژوهشی سد و نیروگاه برق آبی ایران، ۲۳-۶۵، ۲(۵).
- ۲- تابش‌پور، م. (۱۳۹۰). "تحلیل غیرخطی سازه‌ها". دست نامه مهندسی زلزله، انتشارات فدک ایساتیس. ۲۵
- ۳- جاهد مطلق، ح. ر. ، نوبان، م. و اشراقی، م.ا. (۱۳۹۰) "جزا محدود ANSYS"، انتشارات دانشگاه تهران، چاپ پنجم.
- ۴- Chen, W. F. (1982). "Plasticity in Reinforced Concrete."
- ۵- Cheng, L., Liu, Y. R., Yang, Q., Pan, Y. W. and Lv, Z. (2016). "Mechanism and numerical simulation of reservoir slope deformation during impounding of high arch dams based on nonlinear FEM." *Computers and Geotechnics*. 81, 143-154.
- ۶- FERC. (1999). "Engineering guidelines for the evaluation of hydropower projects." Federal energy regulatory commission Division of dam safety and inspections, Washington, DC 20426.
- ۷- Hariri Ardebili, M. A., Mirzabozorg, M. and Kianoush, R. (2012). "A study on nonlinear behavior and seismic damage assessment of concrete arch dam, reservoir foundation system using endurance analysis." *International journal*

## **Investigation of the Effects of Nonlinear Behavior of Concrete on Seismic Performance of Arch Dams Using Finite Element Method**

Majid Pasbani Khiavi <sup>\*1</sup>

Mortaza Ali Ghorbani <sup>2</sup>

Paria Ahmadi <sup>3</sup>

### **Abstract**

In this research the effects of nonlinear behavior of concrete on seismic performance of double curvature arch dam have been investigated. ANSYS software was used for analysis of the model which is based on finite element method. The Morrow Point double curvature arch dam is selected as the seismic analysis case study model and the interaction effect of dam, reservoir and foundation has been considered in the model. To investigate the seismic behavior of dam the El Centro earthquake components has been applied to the model. Both linear and nonlinear behavior of concrete has been investigated by dynamic analysis separately. Results of the displacement of dam crest and principle stresses have been extracted and compared. The results of the analysis have shown the effects of nonlinearity behavior of the concrete on the responses which means that the nonlinearity behavior of concrete would increase the displacement of dam crest and decrease principle stresses. The results have shown that by applying the nonlinearity behavior of concrete, the maximum structural capacity can be used which leads to increasing the accuracy in the field of linearity and nonlinearity material behavior to offer optimal models.

### **Keywords**

Arch dam, dynamic analysis, nonlinear behavior, concrete, finite element, earthquake.

---

<sup>1\*</sup> Associate Professor, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, pasbani@uma.ac.ir.

<sup>2</sup> Assistant Professor, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili.

<sup>3</sup> M. Sc. Student, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili.

Received: 2016/01/01

Accepted: 2016/11/04