

# تحلیل بدنه سد دوقوسی بتنی بختیاری توسط کدنویسی المان محدود سه بعدی

امید بختیاری نژاد<sup>۱</sup>، هوشنگ حسونی زاده<sup>۲</sup>، احسان دریکوند<sup>۳</sup>

۱- کارشناسی ارشد گروه مهندسی آب، واحد شوشتر، دانشگاه آزاد اسلامی، شوشتر، ایران

۲- استادیار گروه مهندسی آب، واحد شوشتر، دانشگاه آزاد اسلامی، شوشتر، ایران

۳- استادیار گروه مهندسی آب، واحد شوشتر، دانشگاه آزاد اسلامی، شوشتر، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۴/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۶/۱۲

## چکیده

تحلیل سدهای بتنی دوقوسی در شرایطی از دقت کافی برخوردار هستند که به درستی مدل شده و تحلیل المان محدود سه بعدی گردند. در این مقاله با استفاده از روش المان محدود سه بعدی، سد بتنی دوقوسی بختیاری تحلیل می شود. به این منظور، برنامه AD SHAPE که قادر به مدلسازی بدنه انواع سد بتنی می باشد تحت محیط برنامه نویسی MATLAB کدنویسی می گردد. سپس، اطلاعات خروجی آن به برنامه کدنویسی شده AD ANALYSIS داده می شود که قادر به تحلیل المان محدود سه بعدی بدنه سد می باشد. برای صحت سنجی و کالیبره کردن برنامه از مدل تیر طره با نتایج معلوم استفاده می شود. این روش تحت انواع حالت های المان بندی با نقاط گوسی متفاوت تحلیل و نتایج مقایسه می شود و اثر تغییر المان ها و نقاط گوسی در جوابها بررسی می گردد. سپس سد بختیاری با رعایت اصول صحیح مش بندی و مدلسازی دقیق، تحلیل شده و تنش ها و تغییرشکلهای بدنه بررسی می گردد. نتایج نشان دهنده دقت قابل قبول برنامه های کدنویسی شده در مدلسازی و تحلیل المان محدود سه بعدی سد بتنی بختیاری می باشد.

واژه های کلیدی: المان محدود سه بعدی، برنامه AD ANALYSIS، سد بختیاری، مدلسازی سد، نقاط گوسی

## مقدمه

المان محدود اولین بار به صورت عملی در سال ۱۹۴۳ میلادی توسط کورانت برای بررسی مسائل پیچش به کار گرفته شد [۲]. بوئین در دهه ی ۱۹۵۰ از المان مثلثی برای مدل سازی تنش دربال هواپیما استفاده کرد. در سال ۱۹۶۴ زینکویچ و چئونگ مقاله ای در زمینه ی تحلیل سد قوسی با المان محدود و مقایسه ی آن با روش تفاضل های محدود نوشتند [۳]. در سال ۱۹۶۸ زینکویچ و چئونگ اولین کتاب در زمینه روش المان محدود را نوشتند. در سال ۱۹۸۳ واسرمن برای مدل کردن یک سد دو قوسی از مش بندی ۸ گره ای ایزوپارامتریک استفاده کرد. در سال ۱۹۸۹ یاو و چپو با استفاده از روش واسرمن و با استفاده از مش بندی درجه بالاتر آنالیز سد را انجام دادند. در دهه های اخیر متناسب با پیشرفت رایانه ها

مطالعات گسترده و روشهای مختلفی از سالها پیش متناسب با پیشرفت علم سد سازی برای تحلیل بدنه سدهای بتنی ارائه شده است، از این میان روش المان محدود به عنوان یک روش بسیار پیشرفته و نو و روبه رشد با پیشرفت روزافزون تکنولوژی و کامپیوتر ها در حال پیشرفت می باشد، روش المان محدود یکی از روش های دقیق و بسیار نیرومند در تحلیل سازه ها می باشد. در این روش به دلیل تقسیم سازه به اجزای بسیار ریز و کوچک می توان هرگونه پیچیدگی در شکل و هرگونه تغییر خصوصیات را از یک نقطه تا نقطه ای دیگر در تجزیه و تحلیل مدنظر قرار داد و دقت بسیار بالایی را در پاسخ های به دست آمده ایجاد نمود [۱]. روش

مرزی از روش جریمه استفاده شد همچنین برای حل انتگرال ها از شیوه انتگرالگیری گوسی استفاده گردید. مراحل اصلی تحلیل به شرح ذیل می باشد:

۱- فراخوانی هندسه سد(یا سازه) مورد نظر شاملگره ها، مختصات آنها و المانها و گره های موجود در هر المان و تعریف نوع المان، درجات آزادی و خواص مواد و تعداد نقاط گوسی.

۲- فراخوانی شرایط مرزی مورد نظر سد شامل شرایط تکیه گاهی و نیز نیروهای وارده شامل نیروی هیدرواستاتیک و سایر نیروها و گره های مرزی.

۳- تعریف مقادیر اولیه برای ماتریس های نیرو تغییر مکان و سختی و نیز ماتریس رفتار مواد و کرنش و تنش.

۴- تعریف ماتریس مختصات و وزن نقاط گوسی و نیز ماتریس رفتار ماده و تشکیل حلقه برای هر المان و سپس هر نقطه انتگرالگیری (گوسی).

۵- تعیین توابع شکل و تعیین ماتریس ژاکوبین و محاسبه معکوس و دترمینان ماتریس ژاکوبین و نیز مشتقات توابع شکل با استفاده از زیربرنامه های مربوطه.

۶- تشکیل ماتریس کرنش بر اساس مشتقات توابع شکل و تشکیل ماتریس سختی المان بر اساس جمع مقادیر ماتریس کرنش، وزن، ماتریس خواص مواد و سایر اجزاء برای هر نقطه انتگرالگیری.

۷- استفاده از ماتریس سختی و نیروی المانهای برای تشکیل ماتریس سختی و بردار نیرو کل سیستم و اعمال شرایط مرزی با استفاده از روش جریمه.

۸- حل معادله سیستم و تعیین تغییر مکانها و تعیین کرنشها با استفاده از تغییر مکانهای بدست آمده و تعیین تنشها با کمک کرنشها و ماتریس رفتار ماده (الاستیسیته).

و ریز پردازنده ها استفاده از این روش رو به گسترش و ارتقا روز افزون می باشد. یک سد بتنی به عنوان سازه ی هیدرولیکی همواره تحت تاثیر نیروهای خارجی یا عوامل دیگری نظیر تغییرات درجه ی حرارت قرار داشته که باعث ایجاد تغییر شکل در هندسه سد می گردد. این تغییر شکل همراه باتنش های داخلی و واکنش های تکیه گاهی خواهد بود [۴]. هدف اصلی از تحلیل یک سد بتنی به کمک المان محدود، تعیین تقریبی اما هرچه دقیقتر تنش ها و تغییر مکان ها در نقاط مختلف سد می باشد [۵]. با توجه به کارهای انجام شده در صنعت سد سازی در داخل کشور و جوان بودن این شیوه تحلیل عمده برنامه هایی که قادر به تحلیل سازه ها به شیوه المان محدود می باشند اختصاصی برای سد ها نیستند و کلیت دارند و دارای حجم بسیار بالا، زمان بر و غیر اختصاصی می باشند برنامه هایی نیز که اختصاصی برای تحلیل سد ها ساخته شده اند نیز عمدتا قادر به تحلیل تا دو بعدی می باشند و به ندرت قادر به تحلیل سه بعدی المان محدود هستند. لذا ساخت یک برنامه بومی با حجم مناسب و اختصاصی برای تحلیل سدها به شیوه مدرن و بروز تحلیل سه بعدی المان محدود با حجم مناسب و قابلیت ارتقا و تکمیل علاوه بر اینکه کاری نو می باشد، ضروری بوده و از اهمیت بالایی برخوردار است. باید به این نکته نیز توجه نمود در سدهای قوسی زمانی دقت روش المان محدود کافی می باشد که حتما تحلیل سه بعدی صورت بگیرد [۶].

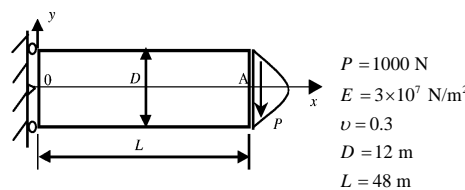
### روند تحلیل المان محدود سه بعدی برنامه کدنویسی شده

برای تحلیل سه بعدی المان محدود سازه برنامه ای کدنویسی شد که به صورت گام به گام روند تحلیل المان محدود سه بعدی را انجام می دهد در این تحقیق از روش حداقل انرژی با معادله اساسی مقابل استفاده شده و برای در نظر گرفتن شرایط

صحت سنجی برنامه کدنویسی شده و بررسی نقاط گوسی و اندازه المان‌ها

برای اینکه بتوانیم از یک روش عددی و به تبع آن کدهای آن برای حل مسائل مکانیک جامدات استفاده کنیم نیاز است که ابتدا توسط مسائلی که دارای جوابهای تحلیلی مشخص می باشند این روشها صحت‌سنجی گردند برای این کار به بررسی یک مدل تیر طره که توسط برنامه آنالیز شده است پرداخته می شود تا صحت عملکرد تحلیل بررسی

گردد همچنین در این بخش به بررسی نقاط مورد نیاز جهت تحلیل و اثر آنها در پاسخ ها پرداخته می شود. از جمله عوامل مهم و تاثیرگذار در تحلیل، تعداد نقاط گرهی، شبکه انتگرال گیری پس زمینه و تعداد نقاط گوسی است. همانطور که از شکل مشخص است تیر طره مورد نظر توسط نیروی انتهایی سهموی تحت تأثیر قرار گرفته است.



شکل ۱- تیر کنسول تحت بار گسترده سهموی

ممان اینرسی مقطع مستطیلی با عرض واحد نیز  $I = D^3/12$  است و نحوه توزیع نیروی P در انتهای تیر بصورت رابطه  $\frac{P}{2I} \left[ \frac{D^2}{4} - y^2 \right]$  می باشد.

برای این مسأله مدل کامپیوتری بشکل زیر ایجاد شد تا نتایج در حالات مختلف بررسی شوند. به هنگام انتخاب یک نوع المان باید مطمئن شد که نتایج حاصله از آن المان با افزایش ریز شدن شبکه المان‌ها، همگرایی خود را از دست نمی دهد روشی که برای این منظور در نظر گرفته می شود معمولاً این است که مسأله ای با جوابهای مشخص و معلوم کنترل می گردد و نتایج حل آن با روش المان محدود با افزایش و کاهش تعداد المان ها و گره ها و نقاط گوسی کنترل می گردد.

برای تیر مذکور پاسخ دقیق بصورت زیر بدست آمده است (تیموشنکو و گودیر ۱۹۷۷):

تغییر مکان در جهت X:

$$u_x = -\frac{P}{6EI} \left[ (6L - 3x)x + (2 + \nu) \left[ y^2 - \frac{D^2}{4} \right] \right]$$

تغییر مکان در جهت Y:

$$u_y = \frac{P}{6EI} \left[ 3\nu y^2 (L - x) + (4 + 5\nu) \frac{D^2 x}{4} + (3L - x)x^2 \right]$$

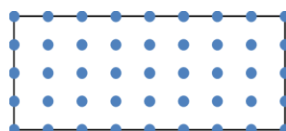
تنش در جهت X, Y:

$$\sigma_x = -\frac{P(L-x)}{I}$$

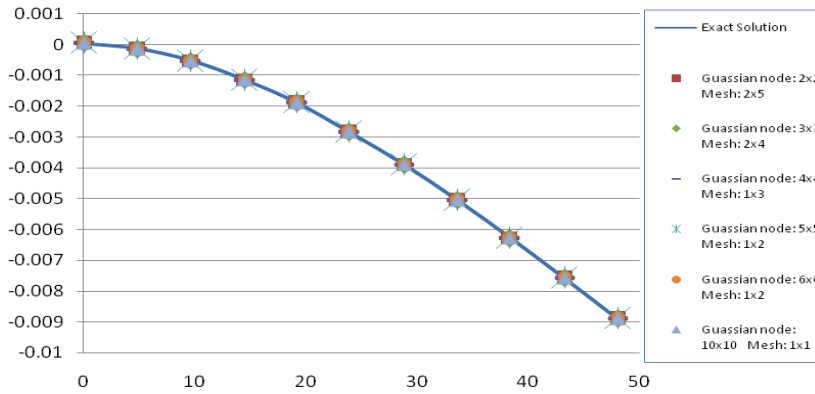
$$\sigma_y = 0$$

تنش برشی:

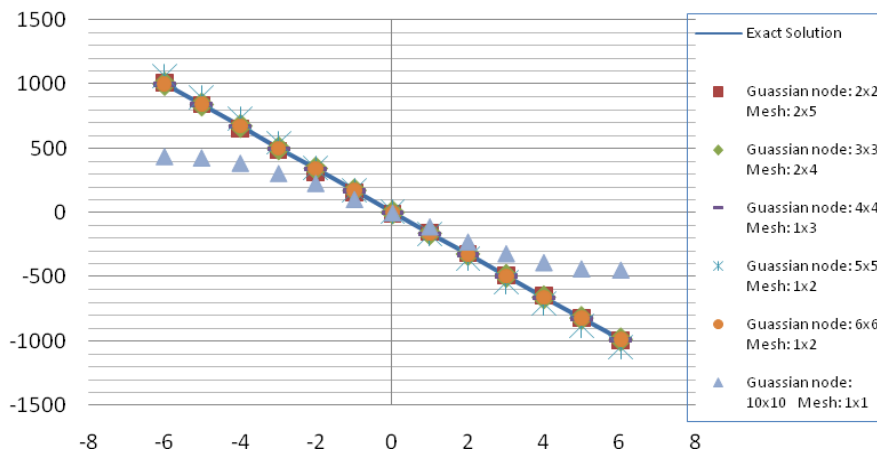
$$\tau_{xy} = \frac{P}{2I} \left[ \frac{D^2}{4} - y^2 \right]$$



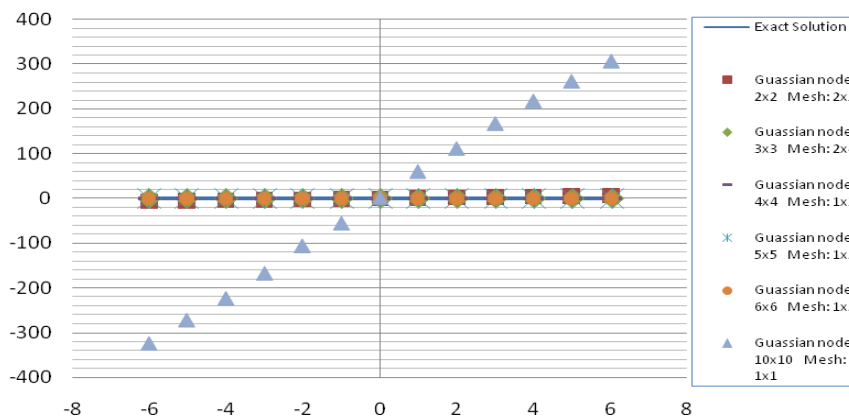
شکل ۲- مدل ساخته شده برای تحلیل المان محدود سه بعدی تیر طره



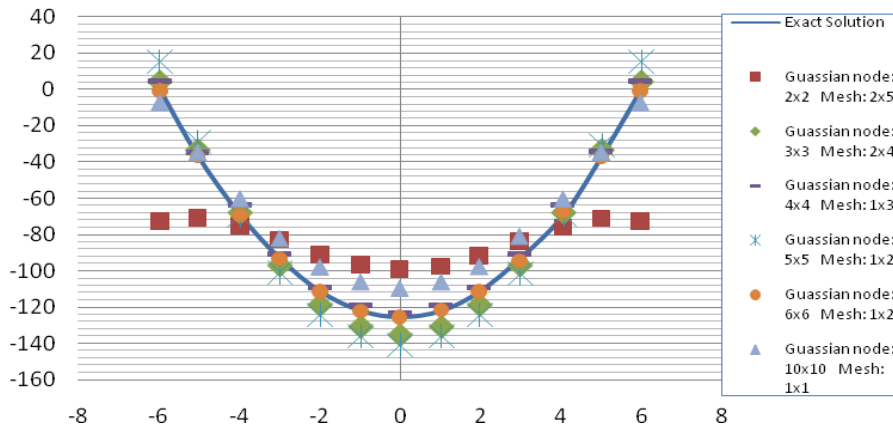
شکل ۳- تغییر مکان قائم تار میانی تیر



شکل ۴- توزیع تنش نرمال  $\sigma_{xx}$  در محل میانه تیر طره ( $x=L/2$ )



شکل ۵- توزیع تنش نرمال  $\sigma_{yy}$  در محل میانه تیر طره ( $x=L/2$ )



شکل ۶- توزیع تنش برشی  $\tau_{xy}$  در میانه تیر طره  $(x=L/2)$

زاگرس قرار دارد و در ۱۰۰ کیلومتری شهر درود در استان لرستان قرار دارد.

برخی از مشخصات این سد در جدول ۱ زیر نشان داده شده است. برای حل این مثال از المانهای ۸ گرهی برنامه ساخته شده استفاده شده است. با توجه به اینکه آنالیزهای مورد نظر استاتیکی می باشند تعداد سه لایه المانهای در پی نیز برای در نظر گرفتن خاصیت ارتجاعی پی کفایت می کرد.

در این مثال رفتار ارتجاعی خطی و خصوصیات مصالحی همگن ایزوتروپیک، برای بتن اتخاذ گردیده است. پارامترهای مزبور (جدول ۱) براساس تجربیات قبلی (سد دز و سد کارون ۳) و دامنه تغییرات محتمل مقاومت مورد نیاز بتن (۲۵-۴۰ مگاپاسکال) فرض گردیده است و مقاومت فشاری مستقیم  $f'_c = 33(Mpa)$  و مقاومت کششی مستقیم  $f_{cr} = 0.25 \text{ to } 0.42 \sqrt{f'_c}$  ( $f'_c$  in Mpa) می باشد.

نتایج بدست آمده نشان می دهند که باید میان تعداد المان ها و نقاط گوسی تعادل مناسبی برقرار باشد بدین معنی که باید برای رسیدن به پاسخ مناسب علاوه بر افزایش تعداد نقاط گوسی به میزان لازم، می بایست المان ها نیز به شکل متناسبی افزایش یابند و تعداد زیاد المان ها با توزیع کم نقاط گوسی و نیز تعداد نقاط گوسی زیاد با چگالی کم المان ها نتایج دقیقی ارائه نمی دهند. این مسأله در مورد تنش ها حساس تر است و برای نتایج بهتر الزاماً باید المان ها را ریزتر در نظر گرفت.

### معرفی سد بختیاری

سد ونیروگاه بختیاری روی رودخانه بختیاری که یکی از سرشاخه های عمده رودخانه دز محسوب می گردد، می باشد و پیش بینی می شود که سد بختیاری بلند ترین سد دو قوسی بتنی جهان با ارتفاع ۳۱۵ متر باشد. ساختگاه سد در رشته کوههای مرتفع

جدول ۱- مشخصات بتن مورد استفاده برای سد بختیاری

مدول الاستیسیته	ضریب پواسون	وزن مخصوص	ضریب انبساط حرارتی	هدایت حرارتی
(GPa)	(-)	(KN/m <sup>3</sup> )	(I/°C)	(kJ/m.day.°C)
$E$	$\nu$	$\gamma$	$\alpha$	$k$
۲۴/۰	۰/۱۸	۲۴/۰	۱/۰×۱۰-۵	۲۲۰/۰

\* مدول الاستیسیته ۱۸۰ روزه مد نظر می باشد

شده در جدول ۲ می‌باشند. همچنین ظرفیت باربری مجاز در بارگذاری عادی برای توده سنگ مذکور ۷ تا ۹ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است.

بار رسوب اشباع شده بر روی سطح سد به عنوان سیال معادل با دانسیته وزن مناسب اعمال می‌گردد. تراز و وزن شناور رسوب به ترتیب ۶۵۰ متر از سطح دریا و ۳/۶ کیلو نیوتن در متر مکعب فرض شده است.

ویژگی‌های ژئوتکنیکی و همچنین ژئومکانیکی توده سنگ‌های تشکیل دهنده محور سد، از نتایج مطالعات مهندسی زمین شناسی و مکانیک سنگ انجام شده، استفاده شده است که در آن بر مبنای روش‌های متداول و توصیه شده مانند RMR<sub>۱</sub>, PGC<sub>۱</sub> و معیار شکست هوک، براون، ارزیابی و طبقه بندی انجام شده است. توده سنگ‌های مذکور که از آهک‌های گروه بنگستان (سازند سروک) تشکیل شده اند دارای پارامترهای ژئوتکنیکی ارائه

جدول ۲- پارامترهای ژئوتکنیکی و خصوصیات الاستیک توده سنگ

مدول تغییر شکل Gpa	چسبندگی Mpa	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	ضریب پواسون	دانسیته $gr/cm^3$	
				اشباع	خشک
۱۵	۰/۴-۰/۷	۳۵-۴۵	۰/۲۶	۲/۶۶-۲/۶۸	۲/۶۵-۲/۶۶

جدول ۳- سطوح مختلف آب در مخزن

تراز حداکثر محتمل (PMF)	تراز عادی (FWL)	تراز حداقل (LWL)
متر از سطح دریا	متر از سطح دریا	متر از سطح دریا
۸۴۱/۵	۸۳۰	۷۹۳

### ساخت مدل سد بختیاری

در این تحقیق برای درونیابی نقاط میانی و یافتن کامل نقاط و ساخت هندسه سد ابتدا روش‌های مختلف درونیابی نقاط بررسی شد تا مشخص شود کدام روش بهترین دقت و بهترین درونیابی نقاط را در بدنه سد انجام می‌دهد به این منظور روش‌های درونیابی nearest-linear-spline-pchip-cubic- $v^o$  cubic بررسی شد این روشها در برنامه MATLAB وجود دارند و از معتبرترین و بهترین روشهای درونیابی پیشرفته می‌باشند برای بررسی کارکرد این روش‌ها دو مقطع از سد با مشخصات معلوم و نقاط معلوم حذف گردید و با توجه به سایر مقاطع معلوم در سد با این برنامه‌ها اقدام به یافتن نقاط این دو مقطع معلوم از سد شد نتایج نشان داد از

بین این روش‌ها، روش spline بهترین درونیابی را انجام میدهد و نقاط بدست آمده از این روش درونیابی بسیار نزدیک به واقعیت بوده و بالاترین دقت را دارا می‌باشد لذا این روش به عنوان روش منتخب جهت درونیابی نقاط میانی برای ساخت هندسه سد و مش بندی‌ها استفاده میگردد. نتایج حاصل از این بررسی به گونه ای تقریبی نشان میدهد روش spline به طور عمومی در مدل سازی بدنه سدها نسبت به سایر روشهای درونیابی جوابهای دقیق تری ارائه می‌دهد.

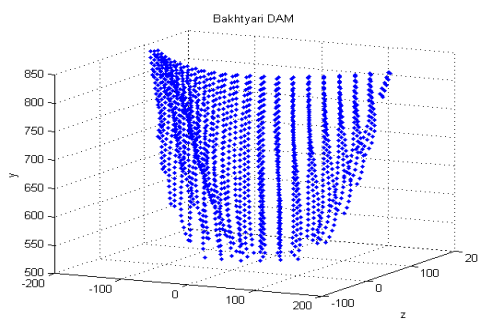
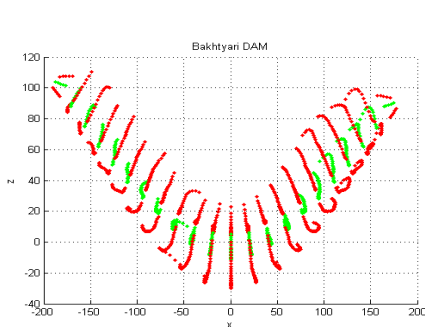
برای تعیین فواصل نقاط که محدوده المان هاست می‌بایست به اصول مش بندی سد توجه نمود، مش بندی ایجاد شده باید به درستی از نحوه بلوک بندی سد و شکل طره‌ها تبعیت کند. هرچه

نظرعملی، نسبت طول به عرض بلوک در حدود دو و یا کمتر مطلوب است، المان ها را نیز می بایست تقریباً با همین نسبت در نظر گرفت زیرا در صورت بزرگتر شدن یا خیلی کوچکتر شدن آنها و تشکیل ماتریسهای منفرد، امکان کاهش دقت جواب ها افزایش می یابد. برای تعیین تعداد لایه های المان در ضخامت سد، علاوه بر افزایش دقت مدل المان محدود برای در نظر گرفتن اثرات خمشی و رفتار پوسته ای بدنه سد، به ویژه در نواحی نازک، باید وجود درزهای انقباض طولی را نیز مدنظر قرار داد.

در این تحقیق پس از بررسی موارد و نکات فوق در مش بندی و ساخت مدل سد، سد در ارتفاع به المان هایی به ارتفاع حدود ۱۰ متر و در عرض حدود ۲۰ متر و در ضخامت سد از بالا سد به دو نیم تقسیم شد و نقاط گره ای مشخص شد. فاصله بین هر کدام از این نقاط گره ای همان محدوده المان هاست. در این تحلیل تعداد ۱۵۲۰ المان و ۲۴۵۷ گره در بدنه سد در نظر گرفته شد. برای در نظر گرفتن اثر پی سد به عنوان تکیه گاه سد در اطراف بدنه سد بختیاری المان هایی در پی اضافه گردید تا اثر ارتجاعی پی را به عنوان تکیه گاه مطابق خواص سنگ اشاره شده در جدول شماره ۲ در تحلیل لحاظ نماید.

مش بندی کوچکتر باشد تحلیل دقیقتر می باشد ولی حجم ورودی های مورد استفاده نیز افزایش می یابد. بنابراین تعداد المان ها می بایست در حد بهینه باشد. ترازهای ارتفاعی متناظر با لایه بندی المانها در ارتفاع بر مبنای عملیات اجرایی بتن ریزی بدنه سد که بصورت مرحله ای انجام می گیرد تعیین می شوند. هر تراز ارتفاعی در حقیقت اختلاف ارتفاع بین بلوک های تزریق شده و تزریق نشده را مشخص می کند و معمولاً معادل ارتفاع ۲ یا ۳ بلوک روی هم می باشد که همزمان تزریق می شوند.

توجه به این که باز شدن درزها تابعی از میزان تنش حرارتی بتن و تفاوت دمای اعمال شده می باشد، ترازهای ارتفاعی مذکور تحت تاثیر فواصل درزهای انقباض موجود در سد نیز قرار می گیرند. به طور معمول درزهای انقباض در فواصل ۱۵ متر یکدیگر احداث می شوند، اما ممکن است تحت تاثیر قسمت هایی از سد، نظیر تخلیه کننده یا پن استاک یا نا منظمی های پی دچار تغییر فاصله گردند. در صورتی که عرض بلوک از ۱۰ متر کمتر شود برای باز نمودن درز در هنگام تزریق، نیاز به کاهش بسیار زیاد دما خواهد بود و در هر حال این کاهش دما باید متناسب با حد مجاز کاهش دما برای طول بلوک باشد. بدین لحاظ می توان گفت که از



شکل ۲- مدل ساخته شده بدنه سد بختیاری

است که حالتی غیر عادی در بارگذاری می باشد و بار وزن و رسوب و سایر بارهای تحلیل استاتیکی سد نیز

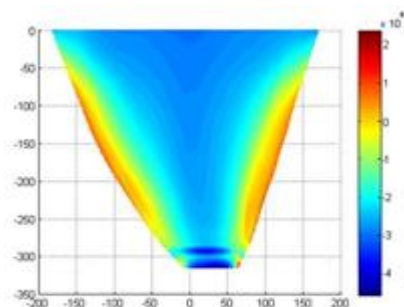
### بارگذاری مدل

در این مطالعه بارگذاری سد به صورت استاتیکی و در پر آب ترین حالت ممکن در نظر گرفته شده

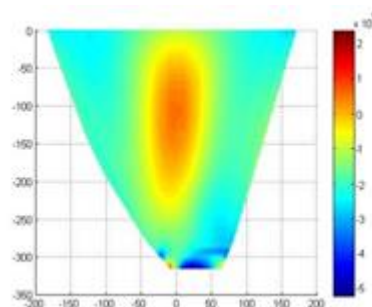
در این برنامه به صورت ورودی به برنامه کدنویسی شده AD ANALYSIS داده می شود این برنامه عملیات تحلیل سازه را انجام می دهد و کلیه تنش ها و کرنش ها نقاط گوسی و تغییر مکان های گره های المان ها را به صورت خروجی ارائه می دهد.

مطابق مشخصات سد که قبلا معرفی شد در تحلیل وارد شده است.

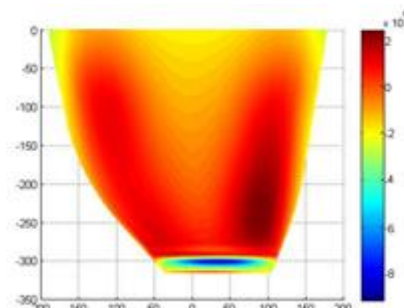
نتایج تحلیل سد بتنی دو قوسی بختیاری و بحث پس از فرا خوانی هندسه سد توسط برنامه کدنویسی شده AD SHAPE مدل سد ساخته شده



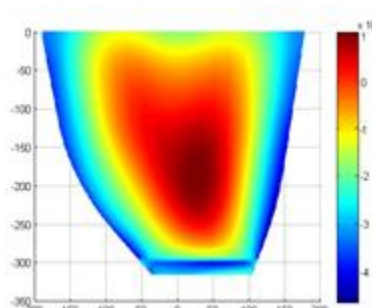
شکل ۱۲- تنش ها در جهت Z مقطع پایین دست



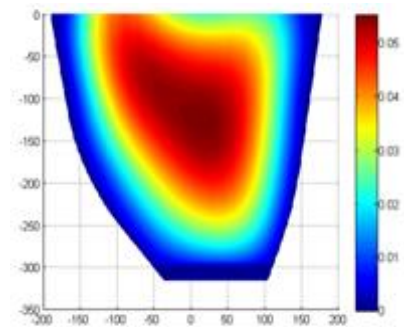
شکل ۸- تنش ها در جهت X مقطع پایین دست



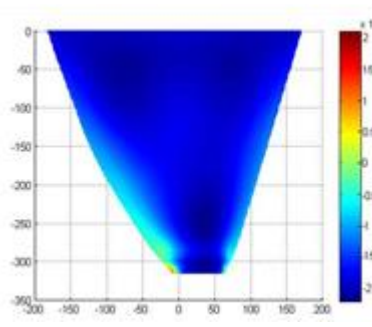
شکل ۱۳- تنش ها در جهت Z مقطع بالا دست



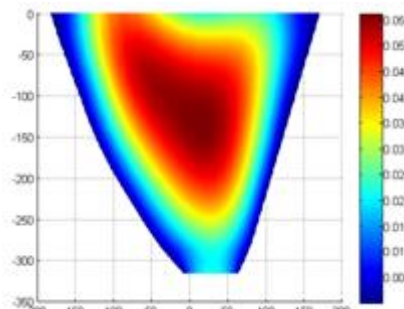
شکل ۹- تنش ها در جهت X مقطع بالا دست



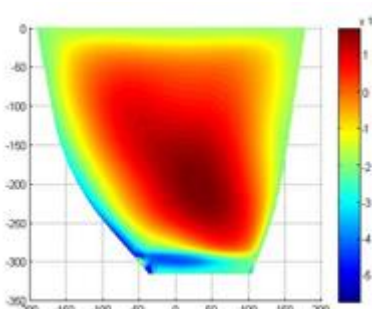
شکل ۱۴- تغییر مکان کل مقطع بالا دست



شکل ۱۰- تنش ها در جهت Y مقطع پایین دست



شکل ۱۵- تغییر مکان کل مقطع پایین دست



شکل ۱۱- تنش ها در جهت Y مقطع بالا دست



قسمت پایین بدنه به دلیل حداکثر بودن فشار ناشی از آب و لای می باشد. از آنجا که بررسی کارایی برنامه کدنویسی شده برای تحلیل سد بتنی دوقوسی از اهداف این مطالعه است نتایج حداکثر تنش ها ی بدست آمده با مقادیر مجاز تنش در جدول مقایسه شده است مقادیر تنش ها و تغییر مکان های سد در حدود معمول می باشند و با توجه به سوابق تحلیل سدهای قبلی و خروجی های عددی این سد و دامنه تغییرات تنش و تغییر مکان ، تغییرات ناگهانی بسیار زیاد مشاهده نمی شود و شکل و دامنه تغییرات تنش ها و تغییر مکان ها در حدود قابل پیش بینی برای یک سد دوقوسی با ضرایب اطمینان مورد نظر می باشد. همچنین دامنه جابجایی ها در حد پایین می باشد نتایج حاصل از این تحلیل سد به نوعی صحت کارکرد برنامه کد نویسی شده را در تحلیل این سد نشان می دهد.

همان گونه که در کونتورهای اشکال ۱۴ و ۱۵ دیده می شود بیشترین جابجایی های سد در مسیر آب بوده و بیشترین مقدار جابجایی در محور Z است که ۵/۴۲۲۲ سانتیمتر می باشد همچنین حداکثر جابجایی کل بدنه سد ۵/۵۵ سانتیمتر می باشد نتایج تحلیل تنش ها در اشکال ۸ الی ۱۳ نشان می دهد در جهت بالادست سد بیشترین تنش های فشاری را دارا می باشد همچنین حداکثر تنش های کششی در وجه پایین دست سد اتفاق افتاده است. تحت این بارگذاری تنش های بیشینه در وجه بالادست و تنش های کمینه در وجه پایین دست سد اتفاق افتاده است همچنین کنتورهای تنش در مقطع بالادست و پایین دست در جهت Z که جهت برخورد آب به بدنه سد است به خوبی انتقال تنش ها از بدنه سد به تکیه گاهها را نمایش می دهد و در مقطع بالادست که وجه مقابل آب است حداکثر تنش های فشاری در

جدول ۴- مقایسه تنش های حداکثر بدست آمده از تحلیل با تنش های مجاز

مقادیر مجاز USBR	$\sigma_z$	$\sigma_y$	$\sigma_x$	نوع تنش	وجه سد
۱۵	۴.۴۵۰۶۵۳۷	۸.۷۷۳۳۵۸۱	۸.۲۱۶۶۶۹۹	کشش	بالادست
۱۶۰	-۷۲.۹۵۷۶۴	-۳۹.۲۶۸۲۵	-۳۴.۴۶۲۳۳	فشار	
۱۵	۷.۸۵۶۴۵۵	۱۱.۷۵۴۵۳۲	۹.۵۶۷۴۴۴	کشش	پایین دست
۱۶۰	-۴۲.۰۲۲۵۱	-۱۸.۵۶۹۴۹۲	-۴۵.۳۵۰۸۶	فشار	

### نتیجه گیری و ارائه پیشنهادات

به طور خلاصه نتایج حاصل از این تحقیق بدین شرح می باشد:

۱- برنامه AD SHAPE در کارآمد جهت مدل کردن سازه سد است و کارکرد نقطه ای آن سبب شده به راحتی المان های مکعبی را با نقطه بندی و مش های متفاوت بسازد درحالی که انجام این کار در برنامه های تجاری مانند ANSYS مشکل است و در مواقعی که لایه های المان از بالا تا پایین امتداد داشته باشند امکان پذیر است.

۲- با توجه به نتایج تحلیل تیرطره صحت کدهای نوشته شده مشخص گردید و نتایج تحلیل سد بختیاری با برنامه کد نویسی شده AD ANALYSIS در حدود مجاز بوده و معتبر است.

۳- بیشترین تنش ها قسمت های وسط و پایین بدنه و در وجه بالادست و تنش های کمینه در وجه پایین دست سد اتفاق افتاده همچنین بیشترین مقدار فشار در وجه بالادست و بیشترین مقدار کشش در وجه پایین دست سد بتنی دو قوسی بختیاری حاصل شده است.

۷- کاربرد برنامه های حاصل از این تحقیق برای سدهای دیگر و سازه های دیگر آسان بوده و با ساخت مدل هر سد و سازه ای و تغییراتی قادر به تحلیل سه بعدی سدهای دیگر و سازه های دیگر می باشد و به عنوان پیشنهاد جهت ادامه تحقیق فوق می توان برنامه فوق را برای انجام تحلیل دینامیکی سدها و یا تحلیل های مختلف حرارتی سد و تحلیل سازه های دیگر گسترش داد. همچنین می توان با قراردادن سیکل بهینه سازی و ارتقا برنامه کدنویسی شده از برنامه به عنوان تحلیل گر جهت بهینه سازی بدنه سدها استفاده نمود.

۴- تعداد زیاد المان ها با توزیع کم نقاط قوسی و نیز تعداد نقاط قوسی زیاد با چگالی کم المان ها نتایج دقیقی در تحلیل ارائه نمی دهد.

۵- روش درونیابی SPLINE جهت درونیابی نقاط مختلف سد و ساخت هندسه سدهای قوسی نسبت به سایر روشهای درونیابی برنامه MATLAB در مورد درونیابی نقاط هندسه سد نتایج دقیق تری می دهد.

۶- برای تعیین تعداد لایه های المان در ضخامت سد، علاوه بر افزایش دقت مدل المان محدود برای در نظر گرفتن اثرات خمشی و رفتار پوسته ای بدنه سد، به ویژه در نواحی نازک، باید وجود درزهای انقباض طولی را نیز مدنظر قرار داد.

#### منابع

- ۱- ابریشمی، جلیل؛ گلستانه، محسن. ۱۳۷۵. تحلیل سدهای قوسی به روش ترکیبی بارآزمونی و اجزای محدود. چهارمین کنفرانس بین المللی عمران، تهران.
- ۲- ابریشمی، جلیل؛ وهاب رجایی، ناصر. ۱۳۸۶. طرح و اجرا سدهای بتنی. انتشارات آستان قدس رضوی.
- ۳- Courant, R. ۱۹۴۳. Variational Methods for Solution of Problems of Equilibrium and Vibration. Bull. Am., Math.Soc., ۴۹:۱-۲۳.
- ۴- Clough, R.W; Tocher, J.L. ۱۹۶۴. Analysis of Thin Arch Dams by The Finite Method, Int Symp.on the Theory of Arch Dams. Southampton, UK
- ۵- Zienkiewicz, O.C.; Cheung, Y.K. ۱۹۶۴. Buttress dams on complex Rock Foundations. Water Power, ۱۶: ۱۹۳-۲۰۰.
- ۶- Zienkiewicz, O.C.; Tylor, R. I. ۲۰۰۰. The finite element method, ۵<sup>th</sup> edition, butterworth-, Heinemann, Oxford, UK.