

بررسی رفتار غیر خطی و مطالعه ی گسترش ترک در سد ژاوه

امیدرضا طوافی^۱، مهدیار خانپور^۲، فرهنگ فرحبد^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه مهندسی عمران دانشگاه آزاد تهران غرب

۲- عضو هیات علمی دانشگاه آزاد تهران غرب

۳- عضو هیات علمی دانشگاه آزاد تهران غرب

omid_ta90@yahoo.com

چکیده

سدهای بتنی وزنی جز سازه های عظیمی هستند که از اهمیت بسیار بالایی برخوردار می باشند. به دلیل نوع خاص هندسه و سازه های به کار رفته در سد، بررسی رفتار آن بسیار مهم می باشد. این سدها همواره در تماس با مخزن آب و زمین زیرین می باشند که رفتار لرزه ای آنها یکی از مهم ترین مباحث در مهندسی سد می باشد. در این نوشتار به بررسی رفتار غیر خطی سد بتنی وزنی با مشخصات طراحی شده تحت تاثیر نیروهای وارده پرداخته شده است. به منظور بررسی بیشتر، نحوه پدید آمدن ترک و گسترش ترک در این سازه تحت تاثیر نیروهای وارده را نیز مورد مطالعه قرار گرفته است. به همین منظور از نرم افزار المان محدود ANSYS جهت بررسی و پاسخ به سوالات این نوشتار استفاده شده است. برای کاربردی کردن این مطالعه از مشخصات سازه آبی، هندسی و مکانی سد ژاوه در این پژوهش مورد مطالعه قرار گرفته است. یکی دیگر از نتایج حاصل از این مطالعه بررسی رفتار سازه ای و جابجایی سد بتنی تحت تاثیر نیروهای وارده می باشد که می توان با استفاده از نتایج حاصل از حل مساله در نرم افزار المان محدود ANSYS به آن دست پیدا کرد. با استفاده از نتایج حاصله از این نوشتار و بررسی رفتار خطی و غیر خطی سد بتنی می توان در طراحی و مقاوم سازی سدهای بتنی وزنی استفاده کرد.

کلمات کلیدی: سد بتنی، ترک، رفتار غیر خطی، رفتار سازه ای، سد ژاوه

۱. مقدمه

اهمیت سد ها به منظور بهره برداری از آب که مهمترین نیاز هر کشور به حساب می آید بسیار مهم می باشد. به همین منظور می توان با توجه به شرایط منطقه ای و سازه ای از انواع سد استفاده کرد. سدهای بتنی یکی از رایج ترین نوع سدهای استفاده شده در ایران می باشد که به دلیل شرایط سازه ای و منطقه ای بسیار پر کاربرد و مهم می باشند. این پژوهش به بررسی رفتار سازه ای سد بتنی وزنی در اثر نیروهای وارده پرداخته است. یکی از مهم ترین مسائل مورد بحث در سد های بتنی، بررسی رفتار غیر خطی بوجود آمده در سد بتنی در اثر افزایش نیروهای وارده و خارج شدن رفتار بتن از حالت خطی می باشد. خروجی های نرم افزار ANSYS می تواند ما را در حصول نتیجه یاری کند. همچنین می توان گسترش ترک را در سازه ی مورد نظر بررسی کرد. سد بتنی ژاوه در منطقه ی سنندج نمونه طرح مورد استفاده در این پژوهش می باشد پس از مدل سازی هندسی سد ژاوه و اعمال نیروهای زلزله ی سازه و زلزله ی ناشی از جریان، نیروی وزن، نیروی هیدرواستاتیک می باشد.

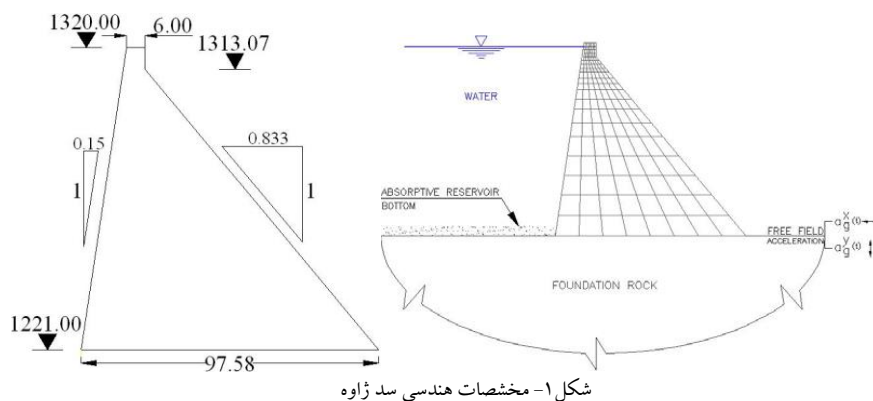
۲. روش تحقیق

با توجه به تمامی مطالب گفته شده و پرسش های مد نظر نرم افزار Ansys که یک نرم افزار المان محدود می باشد، بهترین پاسخ را به ما می دهد.

جنبه نوآوری به کار رفته در این پژوهش بررسی رفتار غیر خطی بتن بعد از شروع ترک می باشد که به ندرت در مورد آن تحقیق و بررسی انجام شده. برای مثال نغمه صدقیانی در سال ۱۳۹۳ در پژوهش خود با عنوان بررسی عددی تغییرات نیروی بالا برنده در داخل ترک سد بتنی تحت اعمال نیروی زلزله با استفاده از نرم افزار ABAQUS به بررسی نیروی زلزله در سد بتنی پرداخته و در آن طی یک زلزله، نیروی بالا برنده درون درز تکیه گاه یک سد بتنی به شدت دستخوش تغییرات می شود، بیان نموده اند که می تواند پایداری سازه سد و پاسخ لرزه ای آن را تحت تاثیر قرار دهد و باعث گسترش طول ترک ها شود. لازم به توضیح است که در این پژوهش از نرم افزار ANSYS به منظور دستیابی به نتایج مورد نظر استفاده می شود.

۳. معرفی مواد و مشخصات سد

سد مخزنی ژاوه با ارتفاع ۸۶٫۵ متر و طول تاج ۳۰۰ متر می باشد. این سد به منظور تأمین آب برای کشاورزی و صنعت در دشت های موجود در ارتفاعات بالای ۲۰۰۰ متر از سطح دریا احداث شده است. به منظور انتقال آب از سد ژاوه از خط لوله و ۶ ایستگاه پمپاژ استفاده شده است. در این طرح سالانه به طور متوسط ۱۲۳ میلیون متر مکعب آب با ظرفیت حداکثری ۸ متر مکعب در ثانیه توسط خط لوله فولادی به قطر ۲۰۰۰ میلیمتر و طول ۳۲٫۲۸۸ کیلومتر که ۴٫۳۴ کیلومتر تونل نران را نیز در بر می گیرد به مقصد منتقل می گردد. این سد بزرگ ترین سد بتنی غلتکی ساخته شده در کشور بوده و رکورد بتن ریزی به میزان ۱۲۱۰۰۰ مترمکعب در ماه را داراست. سامانه انتقال با توجه به ظرفیت و هد پمپاژ دینامیک حدود ۹۰۰ متر، جزء بزرگ ترین سامانه های انتقال آب در سطح کشور می باشد. مکان احداث این سد شرق استان کردستان و در ۴۰ کیلومتری جنوب غربی شهر سنندج می باشد



به منظور مدل سازی سازه مورد مطالعه در این تحقیق لازم است در ابتدا مشخصات بتن مورد استفاده را طبق جدول زیر در نرم افزار وارد شده است:

مصالح	مشخصات
بتن	Posson's ratio=0.2 $f'_c = ۲۴۵ \text{ kg/cm}^۲$

لازم به توضیح است که مدل سازی این سد به روش PLANE STRESS انجام شده است. واحد های مورد استفاده در این پژوهش نیز مطابق جدول زیر می باشد:

واحد	آیتم
نیوتن	نیرو
متر	ابعاد هندسی
نیوتن بر مترمربع	مدول الاستیسیته
نیوتن بر مترمربع	فشار
ثانیه	زمان
کیلوگرم	جرم متمرکز
کیلوگرم بر متر مکعب	جرم حجمی
متر بر ثانیه به توان ۲	شتاب
متر	جابجایی

۴. معرفی نیروها

در این قسمت به معرفی نیروهای مورد استفاده در این تحقیق میرداخته می شود:

۴-۱. نیروی وزن

یکی از نیرو های اعمال شده روی سازه مورد نظر نیروی وزن سازه می باشد که با توجه به خصوصیات تعریف شده المان ها به صورت خودکار توسط خود برنامه مورد محاسبه قرار می گیرد. کافیت برای محاسبه ی نرم افزار، میزان شتاب گرانش زمین به همراه مشخصات فیزیکی مصالح در نرم افزار اعمال گردد. لازم به ذکر می باشد که ضریب گرانش در این پژوهش ۹,۸۱ متر بر مجذور ثانیه فرض شده است. [۶]

۴-۲. فشار هیدرواستاتیک

فشار هیدرواستاتیک عبارت است از فشار وارد شده توسط سیال در حال تعادل که به علت نیروی جاذبه اعمال میگردد. فشار هیدرواستاتیک را می توان بوسیله یک جزء مکعبی بینهایت کوچک از سیال تحلیل کرد همنطور که می دانیم نیروی هیدرواستاتیکی یک نیروی مثلثی می باشد که به ارتفاع اب و سیال بستگی داشته و از طریق رابطه زیر بدست می آید: [۹]

$$P = \gamma \times H \quad (1)$$

۴-۳. نیروی ناشی از آب

به منظور معادل سازی نیروی زلزله اعمال شده از اب به سازه از معادله ی وسترگاد استفاده می شود. این معادله به شکل زیر می باشد:

$$\sigma = -\frac{8\alpha\omega h}{\pi^2} \cos \frac{2\pi}{T} \sum_{1,3,5,\dots} \frac{1}{n^2 c_n} e^{-qn} \sin \frac{n\pi y}{2h}$$

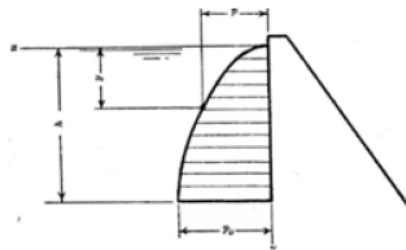
که در رابطه ی بالا q_n و c_n به شرح زیر می باشد:

$$q_n = \frac{n\pi c_n \chi}{2h}$$

$$c_n = \sqrt{1 - \frac{16\omega h^2}{n^2 g k T^2}}$$

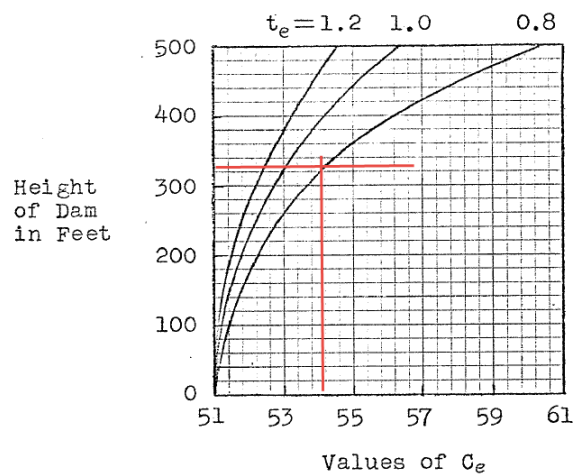
برای سهولت در محاسبات از فرمول تقریبی زیر استفاده می شود:

$$p = 0.875\alpha(hy)^{0.5} \omega$$



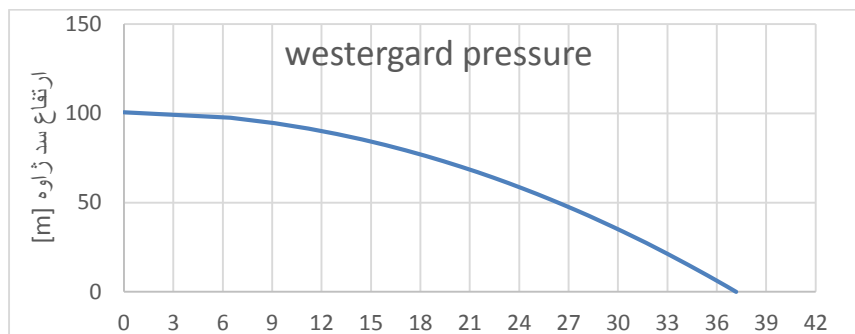
شکل ۲- شماتیک نیروی تقریبی وسترگارد

محاسبه فشار هیدرو دینامیکی سد ژاوه در هنگام زلزله با استفاده از رابطه تقریبی وسترگارد: با فرض زمان ارتعاش زلزله $t_e=0.8$ ثانیه، مقدار C_e را با استفاده از گراف زیر به دست می آوریم، و با فرض نسبت شتاب مبنا به شتاب گرانش زمین برابر $\alpha=0.3$ داریم:



شکل ۳- شماتیک نیروی تقریبی وسترگارد

فشار هیدرو دینامیکی در نظر گرفته شده برای سد ژاوه در هنگام زلزله بصورت شکل زیر در نظر گرفته شده است.



شکل ۴- نیروی هیدرو دینامیکی ناشی از زلزله با استفاده از رابطه تقریبی وسترگارد

۴-۴. نیروی زلزله وارد از طریق سازه

به منظور بررسی و دستیابی به نتایج مورد نیاز لازم است نیروی زلزله را نیز مدل سازی می شود. با توجه به اینکه برای دستیابی به خروجی های مربوط به ترک و گسترش آن لازم است از تحلیل استاتیکی در ANSYS استفاده می شود، لذا لازم است برای مدل سازی نیروی زلزله از روش معادل استاتیکی که در آیین نامه ۲۸۰۰ به صورت کامل شرح داده شده استفاده می شود که در این پژوهش این مقدار برابر ۳۰ درصد نیروی وزن می باشد. [۷]

با اعمال این نیروها مشاهده می شود که سد مد نظر دچار ترک و بحران خاصی نمی شود. به همین دلیل و همچنین مشاهده ی نیرویی که سازه تحت تاثیر آن دچار اولین ترک شود، نیروی زلزله را بصورت صعودی افزایشی به سازه اعمال می شود نتایج به دست آمده از افزایش نیروی زلزله، مشاهده رفتار پایه ی پل بعد از ترک و همچنین مسیر و گسترش ترک در سد بتنی مورد نظر می باشد. علاوه بر این رفتار غیر خطی بتن را نیز مورد مطالعه قرار گرفته ی شود. به همین منظور پارامتر نیروی زلزله را به زمان وابسته کرده تا نحوه شروع ترک و گسترش آن را مشاهده شود.

۵. روش تحلیل

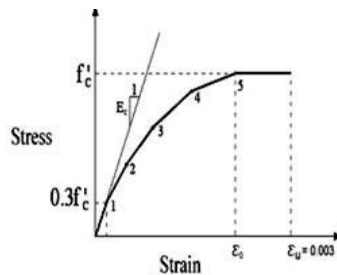
به منظور رسیدن به نتایج مطلوب لازم است علاوه بر انتخاب نوع تحلیل مناسب پژوهش که با توجه به نیاز ما به خروجی ترک در این مطالعه تحلیل استاتیکی می باشد، امان های مربوطه را طبق مشخصات سد مورد نظر در نرم افزار وارد کنیم. تمامی بارها به روش استاتیک و یا استاتیک معادل مورد بررسی قرار گرفته اند اما برای دستیابی به مدل ترک و گسترش آن می توان بار و نیروی زلزله ی سازه ای را در step و sub step و وابسته به زمان بر روی جسم وارد کرده تا بتوان رفتار آن را تحت تاثیر بار در گذر زمان مورد بررسی قرار داد. نحوه اعمال هر نیرو مشخصات آنها به طور کامل در قسمت های قبل مورد بررسی قرار گرفت. [۳]

در این نوع تحلیل هم مصالح، هم امان ها و هم تحلیل به صورت غیر خطی در نرم افزار ANSYS مفروض و مورد استفاده قرار می گیرد. برای مثال از solid 65 برای مدل سازی بتن استفاده می شود.

۶. معیار گسیختگی مصالح

در این پژوهش رفتار بتن در محدوده کشسان و پیش از ترک خوردگی در کشش به صورت خطی و در فشار بر مبنای پیشنهاد آیین نامه ACI318 به صورت غیرخطی مانند شکل ۵ در نظر گرفته می شود. برای نقاط نظیر منحنی تنش -

کرنش نشان داده شده در شکل ۵، از رابطه های ۷ الی ۹ در این پژوهش استفاده می شود. الگوی پنج عاملی ویلیام و وارکنر که برای الگوسازی رفتار غیرخطی بتن مورد استفاده قرار میگیرد. [۱۰]



شکل ۵- رفتار الاستیک غیرخطی بتن در فشار

(۷)

$$f = \frac{E_c \epsilon}{1 + \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0}\right)^2}$$

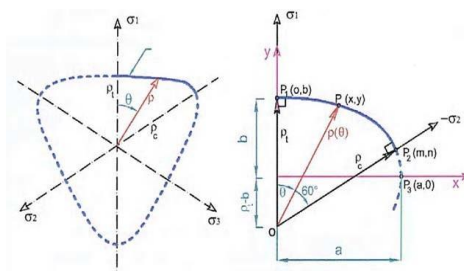
$$\epsilon_0 = \frac{2f'_c}{E_c}$$

(۸)

که در روابط فوق، ϵ و f ، کرنش و تنش بتن و E_c ضریب کشسانی بتن میباشد. مقدار f'_c نیز از رابطه ۹ و با داشتن ضریب کشسانی بتن به دست می آید.

$$E_c = 57000 \sqrt{f'_c}$$

(۹)



شکل ۶- منحنی شکست ویلیام-وارکنر

شکست بتن در این الگو مذکور در چهار حالت برای تنش های اصلی $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ روی می دهد که شامل ۴ حالت فشار-فشار-فشار، فشار-کشش-کشش، فشار-کشش-کشش، کشش-کشش-کشش می باشد.

افزون بر این، بنا به این الگو، سطح گسیختگی را با داشتن دست کم دو عامل f_t و f_c می توان تعیین کرد و سه عامل دیگر را میتوان به صورت رابطه های ۱۳ الی ۱۵ در نظر گرفت.

$$f_{cb} = 1.2 f_c$$

(۱۲)

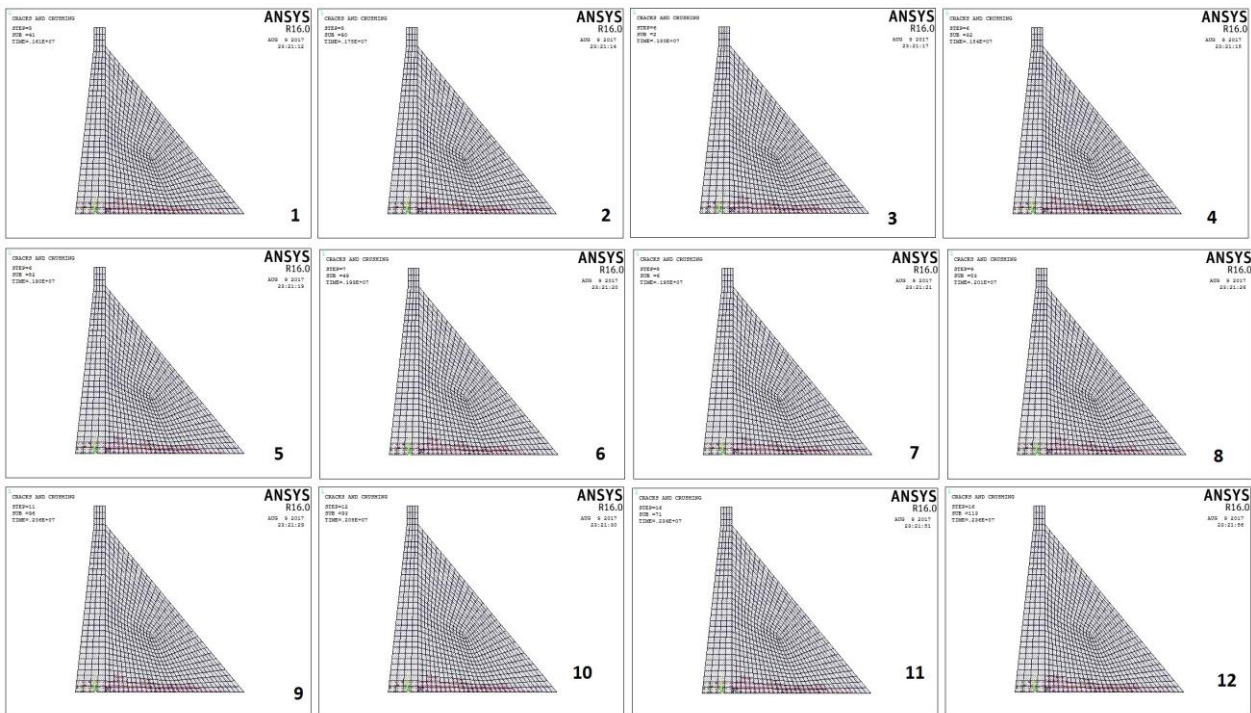
$$f_{cb} = 1.45f_c \quad (13)$$

$$f_{cb} = 1.725f_c \quad (14)$$

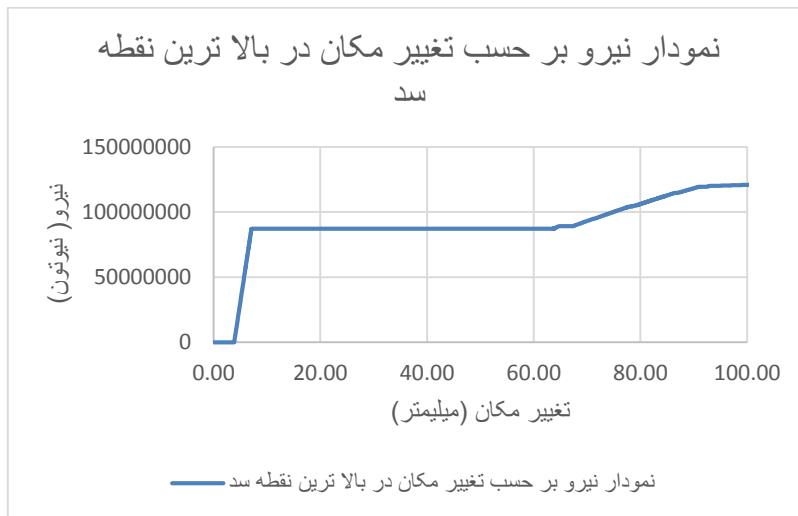
پارامترهای های مورد استفاده در معیار ترک ویلیام وارنک، G مدول برشی، U ضریب پواسون، β_c ضریب انتقال برش ترک بسته (در فشار)، β_t ضریب انتقال برش ترک باز (در کشش) و η ضریب تحمل کشش ترک باز است که در الگوی ویلیام وارنکر مقدارهای β_c ، β_t و η عددی ثابت و بین صفر و یک فرض میشوند. لازم به یادآوری است اگر جزء سالم باشد β_c ، 1 در نظر گرفته میشود.

۷. نتایج

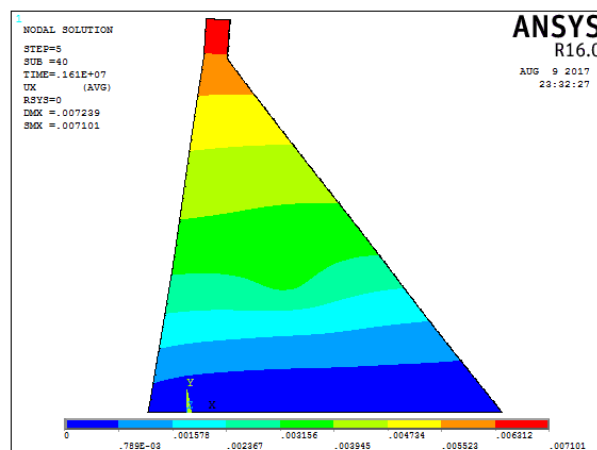
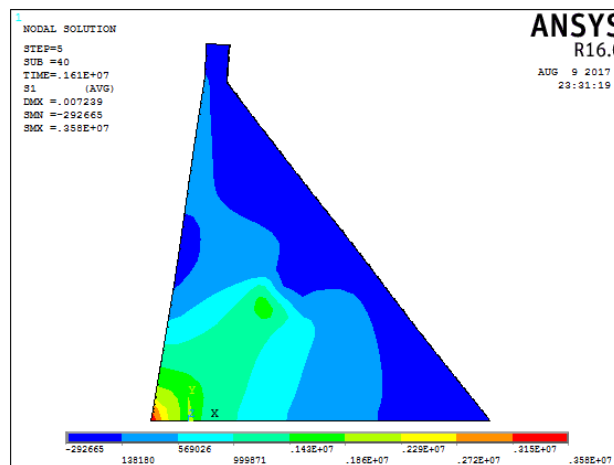
پس از مدل سازی و اعمال شرایط تحلیل، حال نوبت به حل مسئله و بررسی نتایج حاصل از آن می رسد. ابتدا خروجی های مربوط به ترک و گسترش آن را بررسی می کنیم:



شکل ۷- شروع و گسترش ترک در سد تحت نیروهای وارده



شکل ۸- نمودار نیرو-جابجایی سد تحت بارگذاری



با توجه به تصاویر بالا می توان روند گسترش ترک را در سد مطالعه نمود. مشخص است تحت نیروی های ذکر شده در پایین ترین سطح های ارتفاعی ترک ها در حال افزایش و رشد می باشد. همانطور که گفته شد ترک با افزایش نیروی زلزله اتفاق می افتد که شروع ترک در این سد در نیروی ۱۶۱۰۰۰۰ نیوتن اتفاق می افتد.

۸. نتیجه گیری

با توجه به تصاویر خروجی های بدست آمده مشخص است در لحظه ترک جابجایی به اندازه ۷ میلی متر می باشد که بیشینه ی آن در نقاط بالای تاج سد می باشد. تنش هم در بالا دست به صورت بیشینه می باشد. همچنین می توان نسبت جابجایی به نیرو در مدل و همچنین نحوه رفتار غیرخطی بتن بعد از وقوع ترک مشاهده کرد. می توان به این نتیجه رسید که تحت تاثیر نیروهای ذکر شده بیشرتیت رگ و آسیب در نقاط پایینی سد اتفاق می افتد و رفتار شکل پذیری بتن در این سد از نیروی حدود ۸۹۰۰۰۰۰ نیوتن آغاز می شود که این مرحله پس از اتمام مرحله ی رفتار خطی تا قبل از ترک و رفتار غیر خطی بعد از وقوع ترک می باشد.

۹. مراجع

- [۱] Guidelines on design criteria for concrete gravity dams. Australian National ۱۹۹۱ANCOLD, [1] Committee for Large Dams.
- [۲] صدقیانی، نغمه، ۱۳۹۳، بررسی عددی تغییرات نیروی بالا برنده در داخل ترک سد بتنی تحت اعمال نیروی زلزله با استفاده از نرم افزار ANSYS، دانشگاه تبریز، دانشکده عمران، پایان نامه کارشناسی ارشد.
- [۳] واثقی امیری، جواد، ۱۳۷۶، آنالیز دینامیکی غیرخطی شکست کششی - برشی سدهای وزنی بتنی تحت اثر زمین لرزه با احتساب اندرکنش مخزن، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی عمران، پایان نامه کارشناسی ارشد.
- [۴] پوراسماعیل، نوید، ۱۳۹۳، تعیین مسیر ترک در سد بتنی با استفاده از روش المان محدود ترک مجزا، دانشگاه شهید چمران اهواز، دانشکده فنی، پایان نامه کارشناسی ارشد.
- [۵] سعیدآبادی فراهانی، سعید، ۱۳۸۷، بررسی مسیر رشد ترک در مقطع عرضی یک سد وزنی به کمک تحلیل عددی، شانزدهمین کنفرانس مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید باهنر، دانشکده فنی مهندسی.
- [۶] Li YL. Selection and analysis on mechanical parameters of dam foundation rockmass of Three Gorges Project. J Yangtze River Sci Res Inst
- [۷] قادری، سعدی؛ فریبرز ناطقی الهی و فرید رضایی، ۱۳۸۶، سدهای ایران، اهداف ساخت و ضرورت توجه به جنبه های تفریحی و گردشگری داخلی در آنها، اولین کارگاه تخصصی سد و محیط زیست، تهران، مرکز مدیریت بهسازی و بهره وری تاسیسات و ابنیه آبی ایران.
- [۸] اسدی زیدآبادی، امین؛ اسماعیل امیری شمس و امید طیاری، ۱۳۹۲، بررسی مقایسه ای پایداری سدهای بتنی وزنی به روش صلب و انعطاف پذیر، چهارمین کنفرانس ملی زلزله و سازه، کرمان، جهاد دانشگاهی استان کرمان.