

## تحلیل پایداری سد های بتنی وزنی با استفاده از نرم افزار CADAM2000

تورج سبزواری<sup>۱\*</sup>

تاریخ دریافت: تاریخ پذیرش:

### چکیده

بررسی پایداری سدهای بتنی وزنی از لحاظ واژگونی، لغزش، تحلیل تنش ها و گسترش ترک ها در سد های بتنی وزنی بر اساس بارهای وارده بر سد، از جمله فشارهای آب ایستایی<sup>۲</sup> و زلزله حائز اهمیت است. در این تحقیق از برنامه ی CADAM2000 جهت تحلیل پایداری سد های بتنی استفاده شده است. برنامه ی مزبور قابلیت تحلیل زلزله را در حالت شبه پویا<sup>۳</sup> و شبه پویا<sup>۴</sup> داراست همچنین، با در نظر گرفتن شرایط اولیه ی ترک ها در تمام لایه های سد، قابلیت محاسبه ی گسترش میزان ترک را در طول هر لایه دارد. میزان ضریب پایداری در مقابل واژگونی، لغزش، فشار بالا برنده و میزان تنش های مجاز در کلیه ی لایه ها قابل محاسبه است. جهت تحلیل زلزله در حالت شبه پویایی از نظریه های Chopra استفاده شده است. جهت بررسی قابلیت های این نرم افزار، از اطلاعات سد بتنی وزنی معرف پایین فلت (Pine Flat Dam) مورد استفاده قرار گرفته است.

واژه های کلیدی: سد های بتنی وزنی، زلزله، تحلیل پایداری، ترک

<sup>۱</sup> - عضو هیأت علمی دانشگاه آزاد، واحد استهبان.

<sup>۲</sup> - hydrostatic press ores

<sup>۳</sup> - pseudo-static

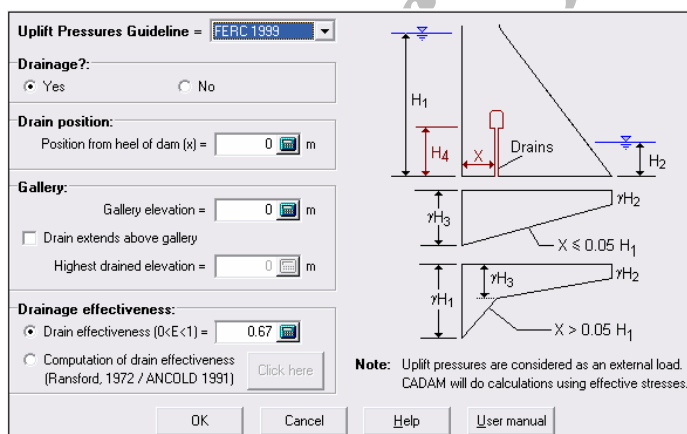
<sup>۴</sup> - pseudo-dynamic

\* نویسنده ی مسوول مقاله: [Tooraj419@yahoo.com](mailto:Tooraj419@yahoo.com)

## مقدمه

تحلیل زلزله در حالت پایایی و پویایی می باشد. رقوم سطح آب در بالادست و پایین دست در دو حالت بهره برداری (عادی) و سیلابی در تحلیل ها بکار می رود. یکی از مهمترین محاسن این برنامه، تعریف دالان زهکش و مشخصات آن در سدهای بتنی وزنی بر اساس معیارهای USBR 1987، CDSA 1995، USACE 1995 و FERC 1999 می باشد. ویژگی های دالان زهکش از جمله ارتفاع گالری از کف، تعداد زهکش ها، فاصله بین زهکش ها و فاصله گالری تا پاشنه ی سد، و ضریب مؤثری زهکش مورد توجه قرار گرفته اند. شکل (۱) نحوه ی در نظر رفتن دالان های زهکش را در برنامه ی مزبور با کاربرد روش FERC 1999 را نشان می دهد.

در سرتاسر دنیای خارج از چین، ۴۸۰۰ سد بتنی وزنی وجود دارد. ایمنی پایایی و لرزه خیزی سدهای بتنی وزنی یک نگرانی دایمی برای جامعه ی بین المللی ایجاد کرده است و این مهم به علت نحوه ی نادرست پیش بینی های مربوط به بیشترین بار حاصله از سیلاب های شدید یا زمین لرزه هاست، بنابراین، نیاز است که برآورد جدیدی از پایداری سازه ای لرزه ای و پایایی تحت بارها و فشارهای بیش از حد برای آن دسته از سدهایی که هنوز طراحی و ساخته نشده اند صورت گیرد. CADAM2000 یک نرم افزار جدید با قابلیت های بالا با در نظر گرفتن نیروهایی از جمله نیروی آب، ضربه ی یخ، ته نشست های کف رودخانه و پدیده ی لبریز شدن آب از روی بدنه ی سد، فشارهای آب پویایی و



شکل (۱) - مشخصات دالان زهکش و تأثیر آن بر فشار بالا بر کف (روش FERC 1999).

مقدار ضریب پایداری در مقابل لغزش در شرایط زلزله از معادله زیر محاسبه می گردد:

$$SSF = \frac{(\sum \bar{V} + U + Q_v) \tan \phi + c A_c}{\sum H + \sum H_d + Q_h} \quad (1)$$

که در آن  $\sum \bar{V}$  مجموع تمام نیروهای عمودی،  $Q_v$  نیروی عمودی لختی<sup>۱</sup>،  $U$  نیروی فشار بالا برنده ی کف،  $\sum H_d$  مجموع نیروهای افقی لختی،  $Q_h$  نیروهای

اگر بعد از ساختن سد بتنی وزنی نیرو یا جرمی به سد اضافه شده باشد، می توان جرم و نیروی مزبور را در شبیه سازی جدید در نظر گرفت. ساختن سازه ای بر روی سد می تواند نمونه ای از این جرم باشد.

میزان  $\phi$  زاویه اصطکاک داخلی،  $c$  میزبان

<sup>2</sup> - hydro dynamical

<sup>1</sup> - inertia

ضریب پایداری در مقابل واژگونی از معادله ی زیر محاسبه می شود:

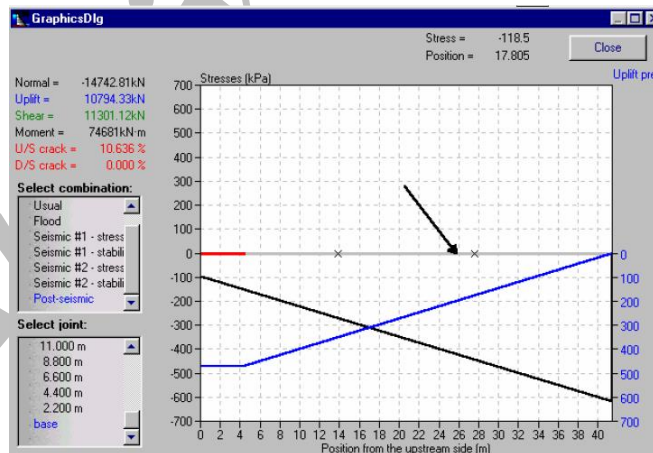
$$OSF = \frac{\sum M_s}{\sum M_o} \quad (2)$$

چسبندگی،  $A_c$  سطح تحت فشار و  $\sum H$  مجموع نیروهای افقی می باشد.

$\sum M_s$  مجموع گشتاورهای واژگون کننده، و  $\sum M_o$  مجموع گشتاورهای مقاوم هستند. از مهمترین امکانات برنامه ی CADAM2000 تحلیل تنش، گشتاور و درصد طول ترک در هر اتصال (JOINT) مطابق شکل (۲) می باشد.

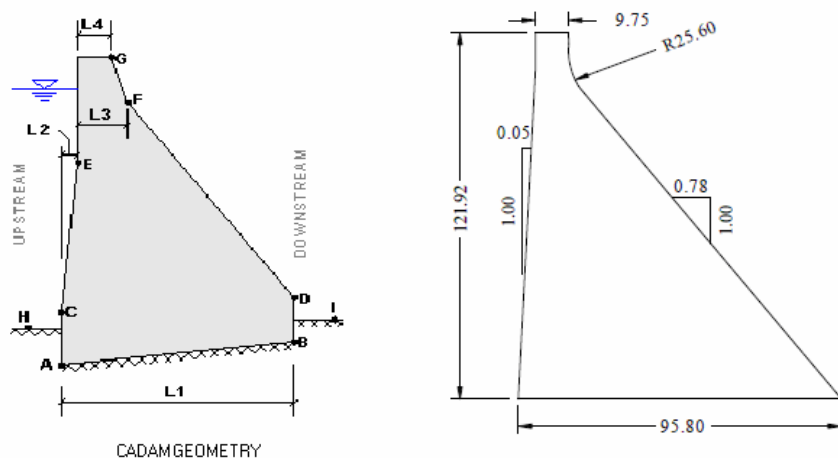
### تحلیل پایداری سد بتنی وزنی پایین فلت (Pine Flat Dam)

سد پایین فلت (Pine Flat Dam) به ارتفاع ۱۲۱/۹۲ متر، یک سد بتنی وزنی معرف، که در بیشتر پژوهش های علمی به عنوان طرح مطالعاتی استفاده می گردد، نیز در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است. شکل (۳) هندسه، شکل سد، و نحوه ی لایه بندی آن را نشان می دهد.



شکل (۲) - تعیین مشخصات تنش، گشتاور، محل نیروی برآیند و درصد طول ترک در اتصالات.

<sup>1</sup> - moment



شکل (۳) - هندسه ی سد بتنی وزنی پایین فلت

مختصات و مشخصات لایه های تشکیل دهنده ی سد مطابق شکل (۳) به صورت زیر می باشند:

جدول (۱) - مشخصات لایه بندی سد بتنی وزنی پایین فلت

شماره لایه	نام لایه	بالادست		پایین دست		طول (m)
		ارتفاع (m)	موقعیت X (m)	ارتفاع (m)	موقعیت X (m)	
1	joints	283.464	5.105	283.464	15.014	9.909
2	joints	271.272	4.538	271.272	19.840	15.302
3	joints	259.080	3.971	259.080	29.337	25.366
4	joints	246.888	3.404	246.888	38.833	35.429
5	joints	234.696	2.836	234.696	48.329	45.493
6	joints	222.504	2.269	222.504	57.826	55.557
7	joints	210.312	1.702	210.312	67.322	65.620
8	joints	198.120	1.135	198.120	76.818	75.684
9	joints	185.928	0.567	185.928	86.315	85.747
Base	Base joint	173.736	0.000	173.736	95.811	95.811

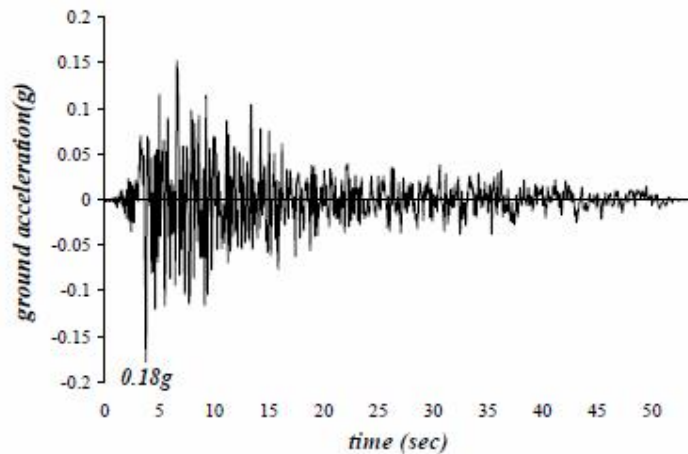
L1=	95.811	m	Elev. D=	173.736	m
L2=	5.105	m	Elev. E=	283.464	m
L3=	9.987	m	Elev. F=	277.368	m
L4=	9.754	m	Elev. G=	295.656	m
Elev. A=	173.736	m	Elev. H=	173.736	m
Elev. B=	173.736	m	Elev. I=	173.736	m
Elev. C=	173.736	m	Elev. D=	198.526	m

Mpa، مقاومت 28 روزه ی نمونه ی استوانه ای  
30000 کیلو پاسکال، میرایی سازه سد ( $\gamma_1$ ) برابر با

سنجه ی کشسانی<sup>۱</sup> بتن بدنه سد برابر با  $E_s = 22,407$

<sup>۱</sup> - elasticity

مورد استفاده در تحلیل ها، مؤلفه ی S69E زلزله کرن کانتی (Kern County) کالیفرنیا می باشد که در تاریخ 21 جولای 1952 در ایستگاه تونل مدرسه یتف (Taft Lincoln School) ثبت شده است. آمار زلزله ی مورد نظر در شکل (۴) نشان داده شده است. شتاب افقی زلزله 0.18g در نظر گرفته شده است.



شکل(۴): ثبت مؤلفه ی S69E زلزله ی کرن کانتی در ایستگاه تونل مدرسه ی تفت لینکلن اسکول

(۳) تأثیر خاصیت تراکم پذیری آب مخزن بر اساس معادلات وسترگارد بر نیروهای زلزله  
(۴) تأثیر میزان انحنای وجه بالادست در محاسبات مربوط به زلزله  
(۵) تأثیر شتابهای عمودی زلزله بر روی فشارهای آب ایستایی  
شتاب افقی زلزله 0.18g و شتاب طیفی<sup>۱</sup> افقی 0.327g در شرایط حداکثر (peak) و شالوده در شرایط انعطاف پذیر  $E_f = 22,407 \text{ Mpa}$  بر اساس معادلات ارائه شده در مرجع (۱)، مقدار  $R_r = 1.23$ ،  $R_f = 1.187$  و مقدار دوره ی  $T_1 = 0.31 \text{ sec}$  و مقدار دوره ی اصلاحی بر اساس رابطه ی  $\tilde{T}_1 = R_r R_f T_1 = 0.452$  و مقدار میرایی لزجی (viscous damping ratios) سامانه ی سد (dam) دریاچه (reservoir) و شالوده (foundation) مطابق رابطه ی  $\tilde{\zeta}_1 = \left(\frac{1}{R_r}\right)\left(\frac{1}{R_f}\right)^3 \zeta_1 + \zeta_r \zeta_f = 0.126$

5%، سنجه ی کشسانی سنگ بستر  $E_f = 22,407 \text{ Mpa}$  در حالت انعطاف پذیر، و  $E_f = 125,829 \text{ Mpa}$  در حالت صلب، و ضریب ثابت میرایی چرخ های آن  $(\eta_f)$  ۰٫۱ در نظر گرفته شده است. ارتفاع آب دریاچه پشت سد 116.13 متر، و ضریب بازتاب امواج در ته نشست های کف دریاچه ۰٫۵ می باشد. بزرگترین شدت زلزله ی

سد مزبور از ۱۰ لایه بتنی (Joint) تشکیل شده است و بدین ترتیب، مشخصات لایه ها را تحت بارگذاری های مختلف مورد بررسی قرار می دهیم. بررسی مقادیر تنش های عادی و برشی در وجه بالا دست و پایین دست سد در چهار حالت مخزن پر و خالی در شرایط شالوده ی صلب و قابل انعطاف با استفاده از شبیه سازی CADAM2000 مورد بررسی قرار گرفت. یکی از امکانات برنامه مزبور این است که زلزله را در حالت پایایی، شبه پایایی و شبه پویایی مطابق شکل (۵) شبیه سازی می کند.

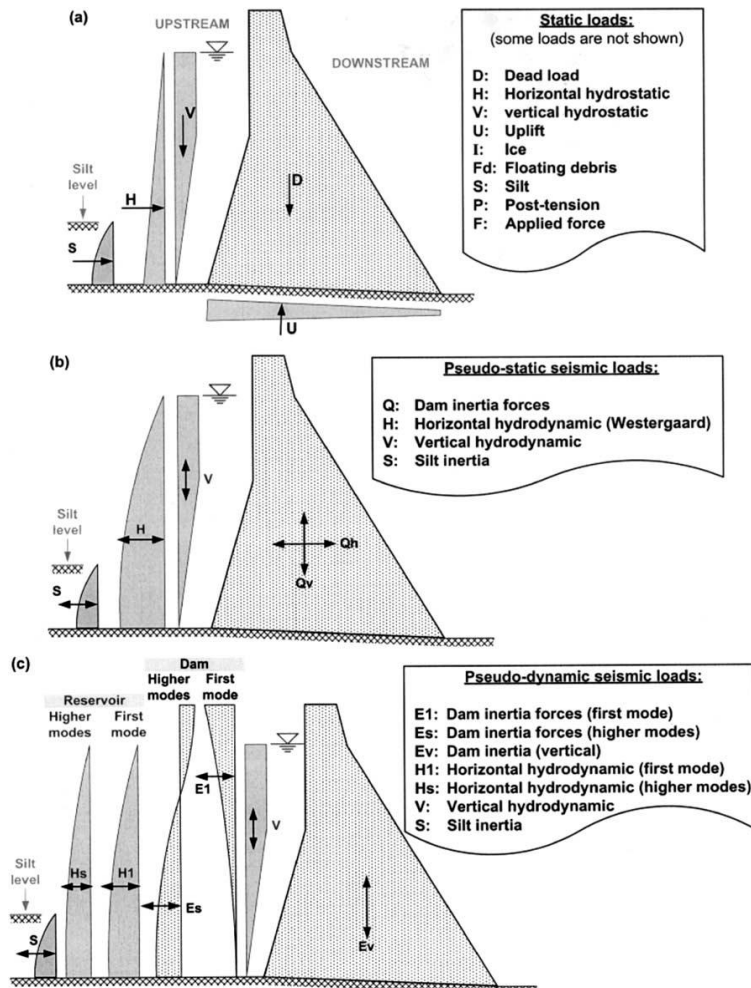
## ۲-۱- تحلیل سد در شرایط مخزن پر با شالوده ی انعطاف پذیر

از قابلیت های برنامه ی CADAM2000 در شبیه سازی زلزله در نظر گرفتن موارد زیر می باشد:

- (۱) شتاب افقی و قائم زلزله
- (۲) مشخصات پویایی زلزله بر اساس نظریه های چوپرا

<sup>1</sup> - spectral

محاسبه شده است. جدول (۲) نتایج و مشخصات زلزله را در حالت شبه پویایی نشان می دهد.



شکل (۶) شرایط بارگذاری CADAM برای تجزیه و تحلیل پایایی و لرزه ای: (a) شرایط تجزیه و تحلیل پایایی پایه ای؛ (b) تجزیه و تحلیل شبه پایایی زلزله؛ (c) تجزیه و تحلیل شبه پویایی زلزله

جدول (۲) - مشخصات شبه پویایی زلزله (مخرن پر با شالوده ی انعطاف پذیر)

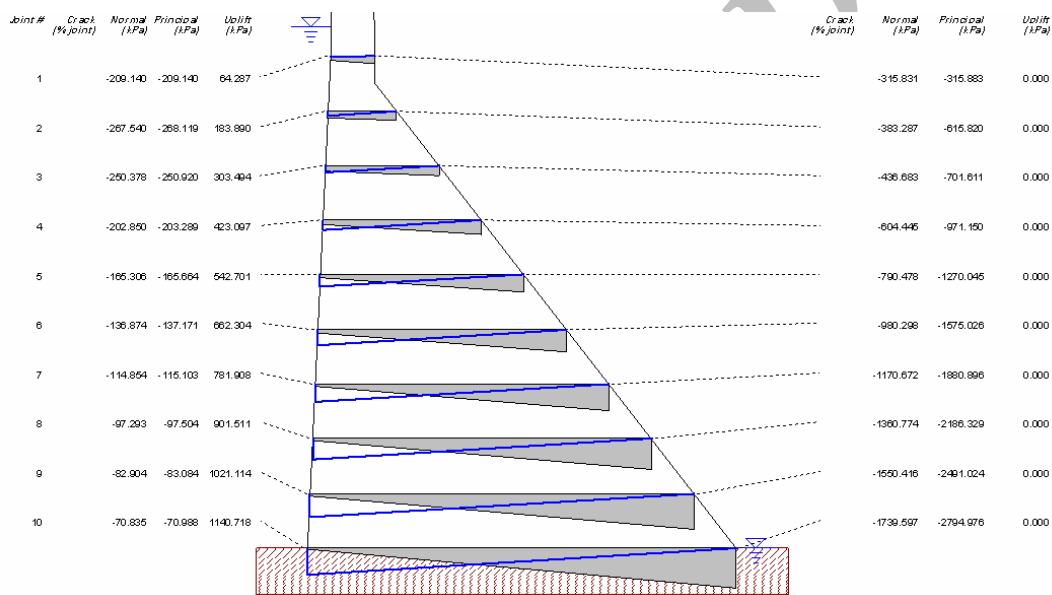
Pseudo-dynamic - constants results:			
Fundamental periods			
Dam	Reservoir	Dam / reservoir	Dam/reservoir/foundation
$T_1 = 0.3095$ sec	$T_1^r = 0.3233$ sec	$\tilde{T}_r = 0.3811$ sec	$\tilde{T}_1 = 0.4523$ sec
Period Lenthening ratios		Reservoir related data	
Reservoir	Foundation	$R_w = 0.8484$	$A_p = 0.2710$
$R_r = 1.2312$	$R_f = 1.1871$	$F_{st} = 66322.02$ kN	$B_1 = 1229.95$ ton
Viscous damping ratios			
Dam	Reservoir	Foundation	Dam/reservoir/foundation
$\xi_1 = 0.0500$	$\xi_r = 0.0336$	$\xi_f = 0.0677$	$\tilde{\xi}_1 = 0.1256$
Generalized masses		Earthquake force coefficients	
$M_1 = 744.993$ ton	$\tilde{M}_1 = 1129.371$ ton	$L_1 = 2052.533$ ton	$\tilde{L}_1 = 3718.880$ ton

فشار بالا برنده و در حالت زلزله (seismic#1) با در نظر گرفتن شتاب زلزله به سمت پایین دست، و کلیه ی نیروهای قبلی اجرا شده است. نتایج بارگذاری در دو حالت بالا به شرح زیر اند:

۱-۱-۲- تحلیل پایداری در شرایط معمولی

شکل (۷) نتایج مربوط به تجزیه و تحلیل تنش را در شرایط بارگذاری معمولی و تنش های اصلی و عادی روی وجه بالادست و پایین دست سد، و همچنین فشارهای بالا برنده را نشان می دهد.

جهت تعیین میزان گسترش ترکها در کلیه ی اتصالات فرض بر آن شد که میزان مقاومت کششی برای شرایط اولیه ی ترک، و در حالت گسترش آن صفر در نظر گرفته شده است. فشار بالا برنده (uplift) در طول زلزله تغییر نکرده، و فشار بالا برنده در مقطع های ترک خورده در صورت وجود قابلیت اصلاح را دارند. در شبیه مزبور ترک های اولیه در منظور نگردیده، ولی میزان گسترش آنها محاسبه شده است. شتاب زلزله به سمت پایین دست در نظر گرفته شده و شبیه در دوحالت عادی (usual) با در نظر گرفتن نیروهای آب ایستایی بالادست، وزن سد و



شکل (۷) - تجزیه و تحلیل تنش موثر در شرایط بارگذاری معمولی

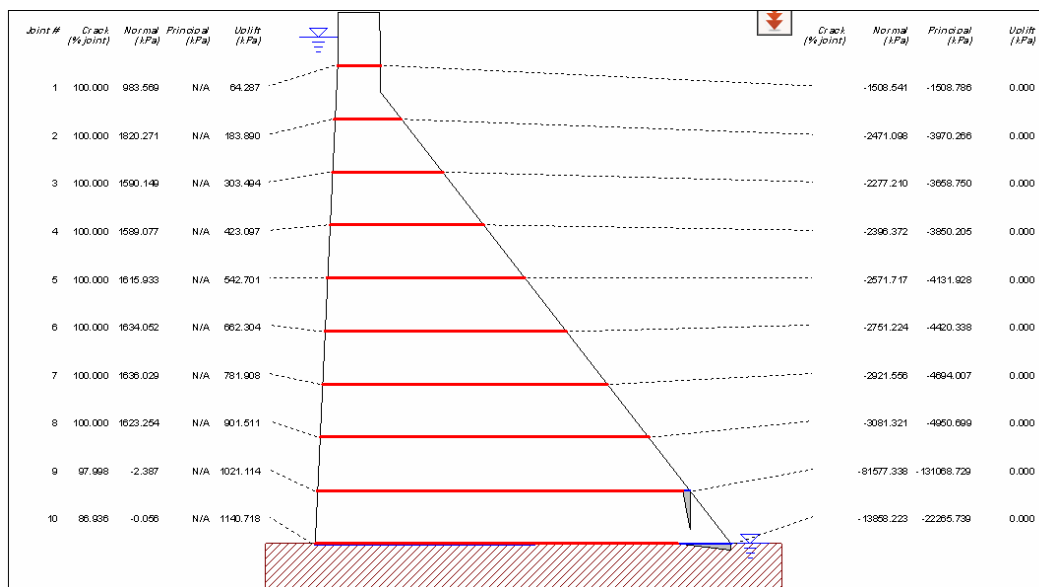
جدول (۳) نتایج مربوط به ضرایب پایداری را در مقابل لغزش و واژگونی و محل نیروهای برآیند را نشان می دهد.

جدول (۳) - ضرایب پایداری در مقابل لغزش و واژگونی و فشار بالا برنده در هر لایه

Joint		Safety factors				
ID	U/S elevation (m)	Sliding		Overturning		Uplifting
		Peak	Residual	toward U/S	toward D/S	
1	283.464	17.63460	12.34788	14.07893	5.68511	9.16609
2	271.272	4.12614	2.88915	6.62354	2.42663	4.53921
3	259.080	2.65086	1.85615	4.70269	1.88568	3.26384
4	246.888	2.23850	1.56741	4.33668	1.68569	2.90806
5	234.696	2.06835	1.44828	4.21772	1.59382	2.76116
6	222.504	1.98236	1.38806	4.16693	1.54461	2.68680
7	210.312	1.93308	1.35355	4.14129	1.51534	2.64409
8	198.120	1.90230	1.33201	4.12680	1.49658	2.61736
9	185.928	1.88185	1.31768	4.11790	1.48386	2.59955
10	Base joint	1.86759	1.30770	4.11210	1.47487	2.58710
<b>Required:</b>		3.000	1.500	1.200	1.200	1.200

شالوده ی انعطاف پذیر را نشان میدهد. درصد طول ترکها در قسمت شکاف (crack) محاسبه شده است.

شکل (۸) نتایج مربوط به مقادیر تنش های عادی و طول ترکها را در حالت زلزله کامل برای مخزن پر با



شکل (۸) مقادیر تنش را در حالت زلزله با در نظر گرفتن مقدار بیشترین شتاب زلزله و میزان طول ترک

جدول (۴) نتایج مربوط به ضرایب پایداری را در مقابل لغزش و واژگونی در شرایط زلزله ی کامل نشان می دهد.

جدول (۴) - ضرایب پایداری در مقابل لغزش و واژگونی در شرایط زلزله ی کامل

Joint		Safety factors				
ID	U/S elevation (m)	Sliding		Overturning		Uplifting
		Peak	Residual	toward U/S	toward D/S	
1	283.464	1.07342	0.75162	32.63187	0.66015	9.16609
2	271.272	0.80035	0.56041	17.97711	0.57187	4.53921
3	259.080	0.74130	0.51906	10.76716	0.68848	3.26384
4	246.888	0.77140	0.54014	8.57194	0.76056	2.90806
5	234.696	0.82701	0.57908	7.49990	0.82008	2.76116
6	222.504	0.89123	0.62405	6.84082	0.87311	2.68680
7	210.312	0.95611	0.66948	6.38054	0.92156	2.64409
8	198.120	1.01644	0.71172	6.03531	0.96596	2.61736
9	185.928	1.06900	0.74852	5.76661	1.00625	2.59955
10	Base joint	1.11287	0.77924	5.55396	1.04219	2.58710
Required:		1.300	1.000	1.100	1.100	1.100

## ۲-۱-۲- تحلیل سد در شرایط مخزن خالی با

### شالوده ی انعطاف پذیر

در یک تحلیل دیگر مخزن را در شرایط خالی با شالوده ی انعطاف پذیر مورد بررسی قرار دادیم. مقدار شتاب طیف  $0.281g$  می باشد. در شرایط مزبور میزان

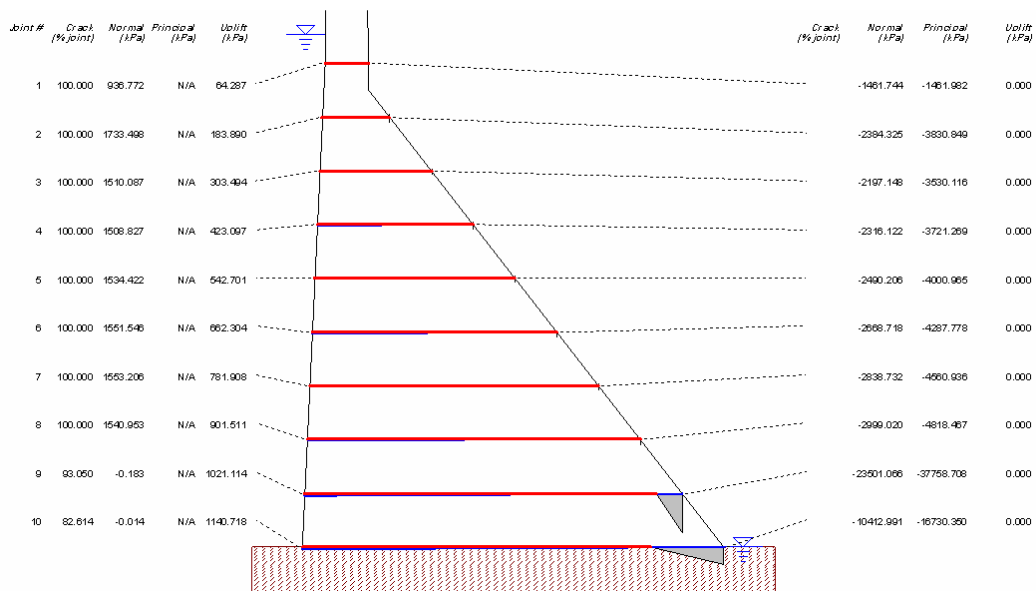
بر اساس نتایج بالا، تمام لایه ها در مقابل لغزش ناپایدارند، زیرا ضریب لغزش تمام لایه ها از  $3/1$  کمتر است. بر اساس شکل (۸) می توان گفت که در شرایط مزبور بیشتر اتصالات دچار ترک های طولی کاملی قرار گرفته اند.



### ۲-۱-۳- تحلیل سد در شرایط مخزن پر با شالوده ی صلب

تنش های عادی کاهش یافته، و میزان ترک در دو لایه ی بالای سد ۸۸٪ و ۶۷٪ مشاهده گردید.

در شرایط مخزن پر با شالوده ی صلب با شتاب طیف 0.312g مقادیر تنش ها نسبت به حالت قبل افزایش یافته و طول ترک در کل سد مطابق شکل زیر است.

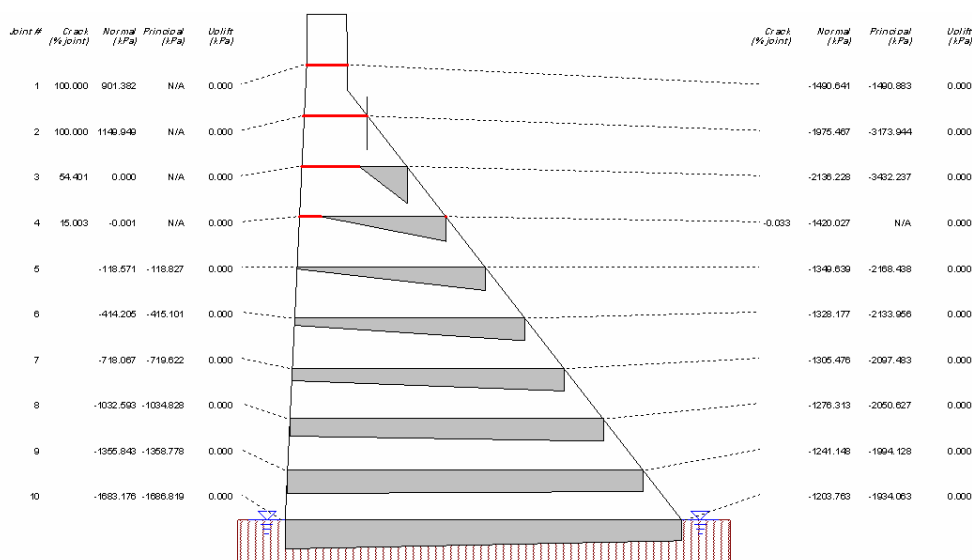


شکل (۹) نتایج مربوط به تنش های عادی و طول ترک ها در شرایط مخزن پر با شالوده ی صلب

### ۲-۱-۴- تحلیل سد در شرایط مخزن خالی با شالوده ی صلب

همانطور که مشاهده می شود، تقریباً تمام لایه ها دچار ترک های طولی شده اند.

اگر شرایط مخزن را به صورت خالی با شالوده ی صلب در نظر بگیریم، در لایه های بالایی ۱۰۰٪، ۱۰۰٪، ۵۴٪ و ۱۵٪ مشاهده شده است. شکل (۱۰) مشخصات تنش ها و طول ترک ها را نشان می دهد.



شکل (۱۰) - نتایج مربوط به تنش های عادی و طول ترک ها در شرایط شرایط مخزن را به صورت خالی با شالوده ی صلب

در نظر گرفتن اندرکنش سازه سد با دریاچه و بستر سنگی زیر آن باعث افزایش پاسخ سازه در زلزله می شود. برنامه ی CADAM2000 در شبیه سازی طول ترک در شرایط زلزله کامل، جوابهای مناسبی دارد.

## نتایج

الف) با بررسی های صورت گرفته، پاسخ سازه سد با مخزن پر و شالوده ی انعطاف پذیر بیشتر از پاسخ سد با مخزن خالی و شالوده ی صلب می باشد. به عبارت دیگر،

## منابع

- 1- Fenves, G., Chopra, A.K. 1986. Simplified analysis for earthquake resistant design of concrete gravity dams, Rep. No. UCB/EERC-85/10, Earthquake Engrg. Res. Ctr. , Univ. of California , Berkeley, Calif.
- 2- Fenves, G., Chopra, A.K. 1987. Simplified earthquake analysis of concrete gravity dams, Journal of Struct. Engrg. ASCE, 2001.113: 1688 –1708.
- 3- Leclerc, M. Le'ger P. Tinawi, R. CADAM User's Manual. Version 1.4.3 <http://www.struc.polymtl.ca/cadam/> Department of Civil Engineering, E 'cole Polytechnique de Montre'al, Que'., Canada.
- 4- Chopra, A.K. 1998 Earthquake response analysis of concrete dams. . p. 416–65. In: Jansen, R.B., editor, Advanced dam engineering for design, construction and rehabilitation. New York: Van Nostrand Reinhold.
- 5-CADAM user manual, <http://www.struc.polymtl.ca/cadam/>

Archive of SID