نشریه روش‌های عددی در مهندسی، سال ۴۰، شماره ۲، زمستان ۱۴۰۰، ص. ۷۹-۵۷

پایداری و روانگرایی دینامیکی سد باطله اسفوردی تحت مدل رفتاری الاستو پلاستیک غیرخطی با استفاده از روش عددی تفاضل محدود

رامین سلامت ممکانی و امین ازهری*

دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

(دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۲۸ - دریافت نسخه نهایی: ۱۴۰۰/۳/۵)

چکیده- پایداری دینامیکی و روانگرایی سدهای باطله یکی از معضلات ژئوتکنیکی است که از دیرباز محققان این حوزه را به چالش کشیده است. در این مطالعه پاسخ لرزه‌ای سد باطله معدن فسفات اسفوردی واقع در منطقه لرزه‌خیز بافق استان یزد مورد بررسی قرارگرفته است. به این منظور از کد تفاضل محدود فلک (Flac۲D) و به‌کارگیری دو مدل رفتاری موهر- کلمب و فین- بایرن برای مدل‌سازی بهره گرفته شده است. به‌منظور محاسبه و تعیین مناطق مستعد روانگرایی و یا روانگرا شده کدنویسی به‌صورت تابع فیش در نرم‌افزار انجام می‌شود. جابه‌جایی‌های افقی و قائم (نشست) در بدنه سد، فشار منفذی اضافی، نواحی شکست و روانگرایی ناشی از بار لرزه‌ای با استفاده از دو مدل رفتاری انتخاب‌شده، تحت زلزله ۶/۴ ریشتری که در سال ۱۳۸۳ در یزد اتفاق افتاد، تعیین شده‌اند. بیشینه جابه‌جایی افقی در پایین‌دست بدنه سد با توجه به مدل رفتاری موهر- کلمب و فین- بایرن به‌ترتیب ۵ و ۳۵ سانتی‌متر مشاهده شده است. همچنین نشست حاصل از این بار لرزه‌ای در بالادست تاج سد، با استفاده از دو مدل رفتاری تعیین‌شده، به‌ترتیب ۴ و ۲۳ سانتی‌متر مشاهده شده است. نسبت فشار آب منفذی اضافی (r_u)، در دو مدل رفتاری استفاده شده، کمتر از حد روانگرایی (۰/۸) به‌دست‌آمده که حداکثر مقدار آن ۰/۷ برای مدل رفتاری فین- بایرن و ۰/۲ برای مدل رفتاری موهر- کلمب به‌دست‌آمده است. به‌طور کلی نتایج نشان می‌دهند که با توجه به در نظر گرفتن تأثیر تجمعی توالی بار لرزه‌ای در مدل رفتاری فین- بایرن، این مدل رفتاری درک بهتری از پدیده روانگرایی را ارائه می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: سدهای باطله معدنی، روانگرایی، موهر- کلمب، فین- بایرن، روش عددی تفاضل محدود، تحلیل دینامیکی.

Finite Difference Dynamic Stability and Liquefaction Analysis of Esphordi Mine Tailings Dam Implementing Non-linear Elasto-plastic Constitutive Model

R. Salamat Mamakani and A. Azhari*

Department of Mining Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

Abstract: ***Dynamic stability and liquefaction of tailings dams are great concerns for geotechnical engineers. In this study, the***

* : مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: aazhari@iut.ac.ir

seismic response of the Esphordi mine tailing dam located in Bafgh seismic region of Yazd province is investigated. A finite-difference code (FLAC2D) is used to model the seismic liquefaction applying two constitutive criteria, namely Mohr-Coulomb and Finn-Byrne. For this purpose, a fish function is implemented into the code to simulate the non-linear elasto-plastic Finn-Byrne constitutive model. Horizontal and vertical displacements (subsidence) in the dam body, additional pore pressure, failure zones, and liquefaction due to seismic load were determined using the two selected criteria under the seismic load of the 6.4 magnitude earthquake occurred in 2005. Considering the type of behavioral model, Mohr-Coulomb and Finn-Byrne, the maximum horizontal displacement of 5 and 35 cm in the dam body and downstream, and subsidence of 4 and 23 cm at the dam crest and upstream are observed, respectively. Also, the calculated ratio of excess pore pressure (R_u), for both criteria, was less than the liquefaction limit (0.9), the maximum value of which was 0.7 for the Finn-Byrne criterion and 0.2 for the Mohr-Coulomb criterion. In general, the results show that considering the cumulative effect of the seismic load cycles in the Finn-Byrne model, this criterion provides a better understanding of the liquefaction phenomenon.

Keywords: ***Mine Tailings Dams, Liquefaction, Mohr-Coulomb, Finn-Byrne, Finite-Difference Numerical Method, Dynamic Analysis.***

فهرست علائم

a_{max}	بیشینه شتاب زلزله	N	تعداد معادل چرخه یکنواخت برای یک زلزله خاص
C_1، C_2، C_3 و C_4	ثابت‌هایی برای ماسه تحت تراکم مورد نظر	N'	تعداد چرخه‌های بارگذاری
C'_1 و C'_2	ثابت	$(N_1)_{60}$	مقدار نرمال شده آزمایش نفوذ استاندارد
C_p	سرعت موج فشاری	$(N_1)_{60cs}$	مقدار نرمال تعدیل شده آزمایش نفوذ استاندارد
$CRR_{M=7.5,\sigma'_v=1atm}$	نسبت مقاومت چرخه‌ای برای باطله مورد نظر تحت زلزله‌ای با بزرگی ۷/۵ در مقیاس ریشتر و تنش عمودی مؤثر یک اتمسفر	N_L	تعداد چرخه‌هایی است که تحت یک مجموعه‌ای خاص از شرایط تنش، باعث روانگرایی یک خاک خاص می‌شود.
CRR_{M,σ'_v}	نسبت مقاومت چرخه‌ای برای زلزله و عمق دلخواه	N'_L	تعداد چرخه‌های روانگرا شده
CSR_{M,σ'_v}	نسبت تنش چرخه‌ای	P_a	فشار اتمسفر در عمق مورد نظر
C_s	سرعت موج برشی	PP	فشار منفذی به وجود آمده در مدل
C_σ	ضریبی وابسته به مقدار نرمال شده آزمایش نفوذ استاندارد	PP_{excess}	فشار منفذی اضافی به وجود آمده در مدل
D_r	چگالی نسبی	PP_{in}	فشار منفذی اولیه
E	مدول الاستیک	$PP_{ratio.Excess}$	نسبت فشار منفذی اضافی یا همان r_u است که روانگرایی را نشان می‌دهد.
FA	دامنه فوریه	P_w	فشار منفذی ایجاد شده بعد از اعمال بار لرزه‌ای
FC	درصد ریزدانه موجود در باطله موردنظر	$(P_w)_{in}$	فشار منفذی اولیه
f_{max}	بیشینه بسامدی که موج در آن دارای توان است.	PSA	دامنه طیف توان
FSL	ضریب ایمنی در برابر روانگرایی	$RMSA$	جذر میانگین مربع شتاب
G	مدول برشی	r_d	ضریب کاهشی تنش برشی
G	شتاب گرانش زمین	r_u	نسبت فشار منفذی اضافی (روانگرایی)
K_σ	ضریب تصحیح مربوط به عمق	S_{xx}، S_{yy} و S_{zz}	تنش در جهات مختلف
MSF	ضریب تصحیح مربوط به زلزله	T	مدت‌زمان ثبت موج
MSF_{max}	بیشینه مقدار ضریب تصحیح مربوط به زلزله	u_e	فشار آب منفذی اضافی
M_w	بزرگی زلزله	u_g	فشار آب منفذی اضافی (در روش عددی)

V_s	سرعت موج s شکل ورودی به مدل	σ_S	تنش برشی وارده ناشی از موج s شکل
z	عمق نقطه مورد نظر به‌منظور محاسبه روانگرایی	σ'	تنش محصور کننده مؤثر
α	ثابت تجربی	σ_v	تنش عمودی در عمق موردنظر
β و α'	ضرایبی وابسته به مقدار سیلت در هر خاک	σ'_v	تنش عمودی مؤثر ایجادشده ناشی از اعمال بار لرزه‌ای
β' و α''	ضرایب وابسته به عمق	$(\sigma'_v)_{in}$	تنش عمودی مؤثر قبل از اعمال بار لرزه‌ای
γ	دامنه کرنش برشی برای چرخه مورد نظر	σ'_{v1}	تنش عمودی مؤثر
ε_{vd}	کرنش حجمی ذخیره شده تا چرخه قبلی	Δl_{max}	بیشترین فاصله مش بندی
ϵ_v	کرنش حجمی ذخیره شده در چرخه‌های قبلی	$\Delta(N_1)_{60}$	ضریب تصحیح
ν	نسبت پوآسون	$(\Delta\varepsilon_v)_{\frac{1}{2}cycle}$	افزایش کرنش حجمی در هر یک از نیم - چرخه-ها (بارگذاری-باربرداری)
ρ	چگالی	$\Delta\epsilon_v$	افزایش کرنش حجمی در هر یک از چرخه‌ها (مراحل)

۱- مقدمه

سازه‌های ژئوتکنیکی که بر سنگ یا درون سنگ ساخته می‌شوند، همواره با مخاطراتی همراه هستند. سد باطله یکی از سازه‌هایی است که بر سنگ و به‌منظور نگهداری ایمن باطله‌های حاصل از کارخانه فرآوری معادن ساخته می‌شود. تقریباً در هر محدوده‌ای که معدن وجود داشته باشد می‌توان گفت در اکثر موارد، کارخانه فرآوری متناسب با آن و در نتیجه، سد باطله مورد نیاز آن نیاز وجود دارد. محتوی سدهای باطله عموماً مواد پر خطر و حتی سمی است که در صورت ناپایدار بودن این سازه و یا شکست آن، ممکن است عواقب سنگین و گاهی جبران‌ناپذیر جانی، مالی و محیط زیستی ایجاد کند. در ایران نیز تعداد سد باطله‌ها نسبتاً زیاد و همچنین اندازه بعضی از آنها بزرگ است. با توجه به سوابق زلزله، قابل ذکر است که ایران کشوری زلزله‌خیز است بنابراین اهمیت موضوع دوچندان می‌شود. به همین منظور، تحلیل و بررسی استاتیکی و دینامیکی این سازه ژئوتکنیکی بیش از پیش اهمیت پیدا می‌کند.

از تعداد سدهای باطله شکسته شده و دلایل شکست آن، آمار دقیقی برای همه کشورها در دسترس نیست اما سازمان‌های آژانس حفاظت از محیط‌زیست (EPA)، کمیته سدهای بزرگ ایالات‌متحده (USCOLD) و کمیته بین‌المللی سدهای بزرگ (ICOLD) تعدادی از سدهایی که دچار شکست شده‌اند و دلایل شکست آنها را به‌طور مجزا جمع‌آوری کرده‌اند. کمیته سدهای بزرگ ایالات‌متحده، مطالعه‌ای بر روی دلایل شکست ۱۸۴ سد باطله انجام دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که ناپایداری شیروانی از بزرگ‌ترین عوامل ناپایداری سد باطله است. پس‌ازآن، روانگرایی ناشی از بار لرزه‌ای دومین عامل شکست سدهای باطله است که ۲۰ درصد شکست‌ها را شامل می‌شود [۱]. لیوُ و همکاران (۲۰۱۹) تحقیقاتی را در راستای جمع‌آوری داده‌ها در ارتباط با شکست سدهای باطله انجام دادند که نحوه شکست سدهای باطله، میزان تأثیر زمین‌لرزه بر شکست آنها و میزان شکست‌ها را تحت عوامل مختلف از سال ۱۹۰۰ تا ۲۰۱۸ بررسی کردند. براساس این تحقیق می‌توان دریافت که اکثر شکست‌ها ناشی اثر بار لرزه‌ای براثر پدیده روانگرایی و در کشورهای آمریکا، شیلی، فیلیپین و پرو اتفاق

افتاده‌اند. همچنین نکته قابل‌توجه دیگر این است که در کشورهای چین، برزیل و مکزیک، روند شکست سدهای باطله، افزایشی است؛ یعنی شکست‌هایی که تقریباً در ۲۰ سال اخیر در این سه کشور اتفاق افتاده است، بیشتر یا حداقل مساوی شکست‌هایی است که در بازه زمانی ۱۹۱۰ تا ۱۹۹۹ رخ داده است [۲].

از دیرباز مطالعاتی در زمینه پایداری سدهای باطله انجام شده است، اما تحلیل دینامیکی با تأخیر پس از استاتیکی مورد توجه محققان این حوزه قرار گرفت. به‌طوری که در سال ۱۹۸۱ سید در دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه کالیفرنیا، برکلی، تحقیقاتی را به‌صورت گسترده در حوزه تأثیر زلزله بر روی سدهایی که دچار شکستگی شده بودند، شروع کرد. سید در این تحقیق از روش‌های شبه استاتیکی و نیومارک برای بررسی تأثیر زلزله بر روی سدها و پایداری آنها بهره گرفت [۳]. این تحقیقات اولیه و بنیادی، نقطه شروع خوبی برای پررنگ شدن نقش زلزله در ناپایداری سدهای باطله بود که به‌تدریج، پژوهش‌های گسترده‌تر و جزئی‌تری در این بخش انجام گرفت. لیوُ و همکاران در سال ۲۰۰۷ از روش آنالیز غیرخطی و همچنین مدل‌سازی عددی به‌منظور تحلیل پایداری سد باطله بایژیشان چین که با روش بالارو ساخته شده است، استفاده کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که روانگرایی در سدهایی که ارتفاع بیشتر از ۱۰۰ متر دارند، مهم‌ترین عامل مخرب است و همچنین سد باطله مورد نظر در برابر این عامل مخرب، پایدار است [۴]. روش‌های تفاضل محدود و اجزاء محدود دو روش بسیار کاربردی در مدل‌سازی عددی هستند که چاکرابورتی و چادوری برای بررسی پایداری دینامیکی سد باطله‌ای در هند در سال ۲۰۰۹ از این دو روش استفاده کردند. آنها دریافتند که به دلیل ارتفاع زیاد سد، تشدید موج رخ می‌دهد. به‌طوری که در تاج سد، تشدید سه برابر است و به حداکثر مقدار خود می‌رسد. درنهایت به این پی بردند که سد باطله مورد نظر در اثر بار لرزه‌ای وارده، ناپایدار است [۵]. چاکرابورتی و چادوری، سد باطله‌ای در هند که با روش پایین‌رو ساخته شده است را در سال ۲۰۱۰ به‌عنوان مطالعه موردی انتخاب کردند. پس از مدل‌سازی و اعمال بار لرزه‌ای با استفاده از نرم‌افزار TALREN۴ به سد باطله، به این پی بردند که سد مورد نظر در سطح لرزه اعمال شده از لحاظ دینامیکی پایدار است [۶]. شو و همکاران در سال ۲۰۱۴ با استفاده از روش شبه استاتیکی و مدل‌سازی عددی تفاضل محدود با کمک گرفتن از نرم‌افزار فلک، به تحلیل دینامیکی سد باطله یانقویا در چین پرداختند و به این نتیجه رسیدند که سد باطله مورد نظر ازلحاظ پایداری لرزه‌ای با استفاده از روش شبه استاتیکی پایدار است ولی درروش مدل‌سازی عددی احتمال لغزش در سطح مشترک بین رس سیلتی و سنگ بستر وجود دارد [۷]. ازهری و ازبی در سال ۲۰۱۷ با استفاده از روش المان محدود و بهره گرفتن از بانک اطلاعاتی داده شامل ۹۵ شیروانی طبیعی و ۳۷ شیروانی سد باطله، پایداری دینامیکی شیروانی‌های طبیعی، معادن روباز و همچنین سدهای باطله را مورد بحث و بررسی قراردادند. آنها دریافتند که در سدهای باطله، هندسه تپه‌ای شکل و لایه بالایی نامتراکم، بیشینه سرعت حرکت افقی زمین را به‌اندازه ۸ برابر بیشتر از شیروانی معادن روباز با هندسه دره‌ای شکل، تشدید می‌کنند [۸]. نائینی و اخترپور در سال ۲۰۱۸ تحقیقاتی را بر روی سد باطله معدن مس سونگون در شهر تبریز انجام دادند. آنها از دو نرم‌افزار عددی اجزاء محدود QUAKE/W و SIGMA/W به‌منظور تحلیل دینامیکی این سد، در سطوح مختلف لرزه‌ای استفاده نمودند. تنش افقی و مؤثر، فشار آب منفذی اضافی، پاسخ شتاب در تاج سد، روانگرایی و جابه‌جایی‌های افقی در بدنه و تاج سد از پارامترهایی بودند که مورد بررسی قراردادند. این مطالعه نشان داد که روانگرایی در سد باطله در همان سطوح پایین نیز اتفاق می‌افتد. این امر به‌تنهایی به معنی ناپایداری سد نیست چرا که در سطوح بسیار کم، جابه‌جایی‌های افقی در بدنه سد و در تاج آن به اندازه‌ای نیست (کمتر از یک متر) که سد دچار شکست شود. اما در سطوح بالاتر روانگرایی و جابه‌جایی زیادتر شده و می‌تواند تهدیدی جدی برای سد باشد. آنها همچنین ادعا کردند که

بیشینه تشدید در سد در بسامدهای پایین به‌دلیل انرژی زیاد اتفاق می‌افتد که این مهم در سد باطله سونگون به‌دلیل زیاد بودن ارتفاع سد و همچنین کم بودن سرعت موج برشی درون باطله‌ها حائز اهمیت است [۹]. فعالیت‌های معدن‌کاری و انفجار و به‌تبع آن ایجاد امواج لرزه‌ای، عامل مخربی در پایداری سدهای باطله است. در این راستا، کورزیچ و سویدژینسکی در سال ۲۰۱۹ با استفاده از روش المان محدود، پایداری سد باطله زلازنی که تحت تأثیر بار لرزه‌ای ناشی از فعالیت معدن‌کاری است را مورد تجزیه‌وتحلیل قراردادند. آنها درنهایت ادعا کردند که بیشینه جابه‌جایی افقی در تاج سد رخ می‌دهد که این مقدار از ۱۳ میلی‌متر تجاوز نمی‌کند؛ بنابراین سد مورد نظر در برابر این بار دینامیکی پایدار است [۱۰]. ژانگ و همکاران در سال ۲۰۲۰، تحلیل پایداری دینامیکی سد باطله لیخی در چین را با کمک گرفتن از شبیه‌سازی عددی و نرم‌افزار ADINA انجام دادند و یکی از نتایج قابل‌توجه آنها این بود که هر چه سطح آب در سد باطله، پایین و نسبت شیب بالادست سد، زیاد باشد، سد باطله پایدارتر است [۱۱]. تحقیقات در حوزه پایداری سدهای باطله محدود به این موارد نبوده و بررسی‌ها و مطالعات بیشتری در این حوزه با استفاده از روش‌های مختلف و نرم افزارهای مختلف انجام گرفته است [۱۷-۱۲].

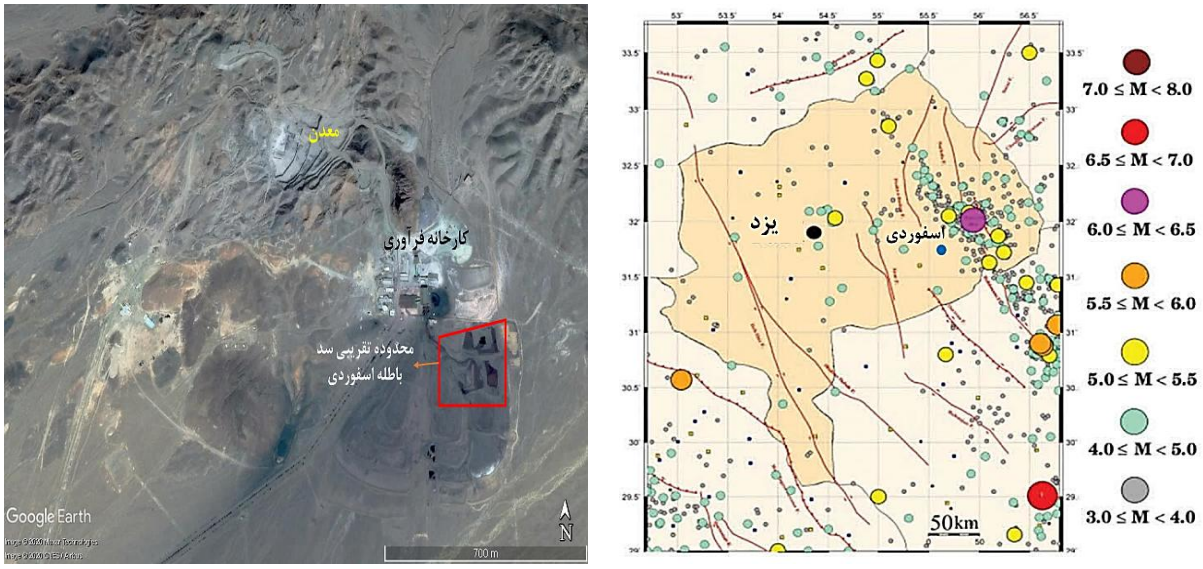
همان‌طور که گفته شد، به‌منظور تحلیل پایداری سازه‌های ژئوتکنیکی به‌طور معمول از مدل رفتاری موهر- کلمب که یک مدل رفتاری الاستو پلاستیک است، استفاده می‌شود. در این پژوهش با استفاده از مدل رفتاری فین- بایرن نیز که معیاری الاستو پلاستیک غیرخطی است و همچنین بهره‌گیری از روش عددی تفاضل محدود، تحلیل پایداری دینامیکی سد باطله اسفوردی بررسی‌شده است. درنهایت با بررسی نتایج حاصل از این دو مدل رفتاری مختلف، مدل نزدیک‌تر به واقعیت با مقایسه نتایج حاصل از روابط تجربی مورد بررسی قرار گرفت.

۲- محدوده موردمطالعه

معدن فسفات اسفوردی در ۳۵ کیلومتری شمال شرق شهرستان بافق در استان یزد واقع شده است. ذخیره معدن فسفات اسفوردی برابر ۱۶/۵ میلیون تن برآورد شده است و طبق طراحی انجام شده، عمر معدن حدود ۳۰ سال است. ناحیه معدنی توسط یک راه ۲/۵ کیلومتری به جاده کوهبنان وصل می‌شود. کارخانه اسفوردی در نزدیکی معدن قرار دارد و خوراک آن توسط معدن تأمین می‌شود. کارخانه فرآوری معدن اسفوردی به‌منظور بازیابی فسفات و آهن موجود در کانسنگ این معدن احداث شده است. با توجه به فرآیند تغلیظ اکسید آهن و فسفات در کارخانه اسفوردی، چند نوع باطله از بخش های مختلف کارخانه به سد باطله ارسال می‌شود. سد باطله نیز فاصله نزدیکی با کارخانه فرآوری دارد و به‌دلیل شیب منطقه و سهولت جابه‌جایی مواد از کارخانه به سد، مواد باطله با کمک گرفتن از شیب منطقه به‌صورت طبیعی و از طریق مسیرهای احداث شده، به سد باطله منتقل می‌شوند [۱۸ و ۱۹]. شکل (۱) موقعیت جغرافیایی و محدوده تقریبی سد باطله اسفوردی را نشان می‌دهد.

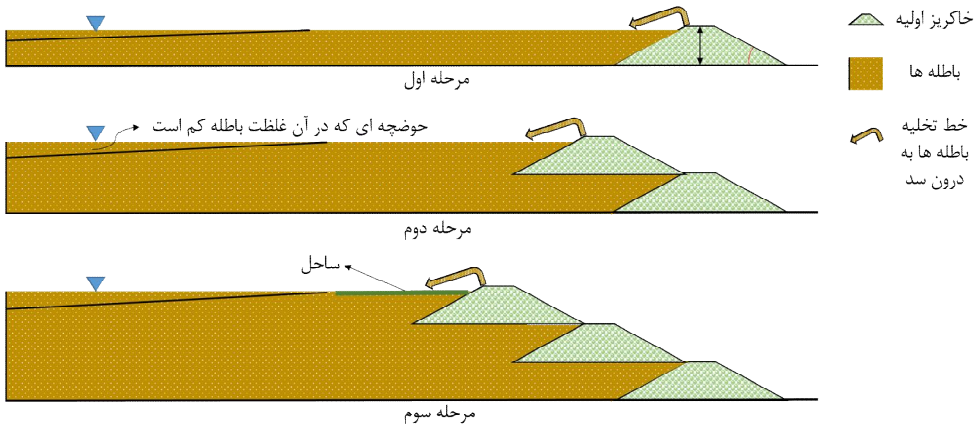
۳- مشخصات سد باطله

در این بخش به بررسی پارامترهای هندسی و ژئومکانیکی سد باطله مورد نظر به‌منظور ذخیره ایمن باطله‌های کارخانه فرآوری معدن فسفات اسفوردی پرداخته شده است. روش‌های مختلفی برای ساخت سدهای باطله وجود دارد که به‌طورکلی به سه روش اصلی بالارو[۱]، پایین‌رو[۲] و خط مرکزی[۳] تقسیم‌بندی می‌شوند [۲۱]. سد باطله اسفوردی با استفاده از روش بالارو ساخته شده است که در ادامه به جزئیات آن پرداخته می‌شود. روش بالارو ازنظر ساخت‌وساز ساده و از نظر اقتصادی مقرون به‌صرفه است؛ اما به‌دلیل افزایش سریع نرخ ورود باطله‌ها به درون سد و همچنین کاهش فرآیند تحکیم، به کنترل سطح فراتیک[۴]، ظرفیت ذخیره‌سازی و روانگرایی لرزه‌ای حساس است. نحوه ساخت سد با استفاده از این روش در شکل (۲) قابل مشاهده است. باطله‌ها روی لبه خاک‌ریز اولیه تخلیه می شوند تا ذخیره‌گاه به حالت ساحل[۵] ساخته شود. خاک‌ریز



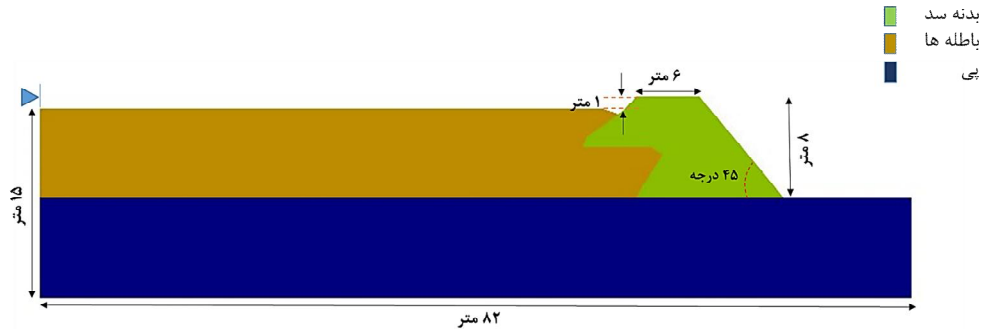
(ب) (الف)

شکل ۱- الف) نقشه استان یزد و بزرگی زلزله‌هایی که رخ داده است [۲۰] و ب) نقشه هوایی از محدوده تقریبی مجموعه اسفوردی



شکل ۲- مراحل و نحوه ساخت سد باطله بالارو

دیگری پیرامون محیط ساحل در مرحله قبلی ساخته می‌شود و این فرآیند برای سایر مراحل نیز به‌منظور افزایش ارتفاع سد، تکرار می‌شود. سدهای باطله بالارو با محدودیت نرخ افزایش ارتفاع سد در هنگام ساخت روبه‌رو هستند. با افزایش نرخ زیاد شدن ارتفاع بیش از ۴/۵-۹ متر در سال، فشار منفذی اضافی می‌تواند در باطله‌ها گسترش یابد [۲۲]. به‌طور کلی سد باطله اسفوردی از دو بخش بدنه سد و باطله‌ها تشکیل شده که در شکل (۳) نشان داده شده است. ارتفاع بدنه سد ۸ متر، تاج سد ۶ متر و همچنین در بالای تاج سد و بخش منتهی به باطله‌ها، یک متر به‌دلیل جلوگیری از سرریز شدن و عواقب آن، در نظر گرفته شده است. همان‌طور که پیش‌تر گفته شد سد باطله اسفوردی از دو بخش بدنه سد و باطله تشکیل شده است. در ساخت بدنه سدهای باطله معمولاً از باطله‌های معدن مربوطه استفاده می‌کنند که در ساخت این سد نیز از همین مکانیسم استفاده شده است. پی‌سنگی در نظر گرفته شده برای مدل‌سازی، با توجه به زمین‌شناسی منطقه و همچنین مواد موجود در محیط سد باطله، در نظر گرفته شده و خصوصیات آن تعیین شده است. خصوصیات ژئومکانیکی، فیزیکی و



شکل ۳- نمایی از سد باطله فسفات اسفوردی به‌منظور مدل‌سازی در نرم‌افزار

جدول ۱- خصوصیات مواد به‌کار رفته در مدل‌سازی سد باطله اسفوردی (اقتباس شده از [۱۹])

خاصیت بخش	وزن مخصوص غیر اشباع (کیلوگرم بر مترمکعب)	چسبندگی (کیلو پاسکال)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	مدول الاستیک (مگاپاسکال)	چسبندگی باقی مانده (کیلو پاسکال)	زاویه اصطکاک داخلی باقی مانده (درجه)	زاویه اتساع (درجه)	نسبت پوآسون
بدنه سد	۲۹۰۰	۱۷/۷۲	۲۵/۳۶	۲۰	۱۷/۷۲	۲۵/۳۶	۰	۰/۲۵
باطله‌ها	۲۳۲۰	۶/۱۶	۲۶/۳	۵	۶/۱۶	۲۶/۳	۰	۰/۲۵
پی	۲۹۰۰	۱۰۰۰	۴۰	۵۰۰۰	۱۰۰۰	۴۰	۲۶/۴	۰/۲

همچنین خواص مواد به‌کار رفته در این مدل‌سازی در جدول (۱) نمایش داده شده است. با توجه به بالا بودن وزن مخصوص مواد موجود در بدنه سد می‌توان گفت که احتمالاً مقداری از آهن بازیابی نشده به‌صورت باطله وارد سد می‌شود. در مرحله اول رفتار غیرخطی تنش- کرنش مواد با استفاده از رابطه الاستو پلاستیک (موهر- کلمب) بررسی شده و پس از آن با معرفی مدل رفتاری فین- بایرن به تعیین پارامترهای مورد نیاز برای این مدل پرداخته شده است. مارتین و همکاران ۱۹۷۵ مدلی را جهت تعیین فشار منفذی و در نتیجه آن روانگرایی ناشی از عمل بارگذاری- باربرداری در آزمایش بارگذاری برشی ساده بر روی ماسه‌ها ارائه دادند؛ که به‌صورت زیر بیان می‌شود [۲۳]:

$$\Delta\epsilon_v = C_1\left(\gamma - C_2\epsilon_v\right) + \frac{C_3\,\epsilon_v^{2}}{\gamma + C_4\,\epsilon_v} \qquad (۱)$$

که در آن $\Delta\epsilon_v$ درصد افزایش کرنش حجمی در هر یک از چرخه‌ها (مراحل)، ϵ_v درصد کرنش حجمی ذخیره شده در چرخه‌های قبلی، γ دامنه کرنش برشی برای چرخه مورد نظر برحسب درصد و C_1، C_2، C_3 و C_4 ثابت‌هایی برای ماسه تحت تراکم مورد نظر هستند. با توجه به رابطه (۱) می‌توان دریافت که در این رابطه، مقداری از کرنش برشی در هر مرحله پس از باربرداری ذخیره می‌شود و پس از بارگذاری در مرحله بعدی با کرنش حجمی به‌دست آمده در آن مرحله، جمع می‌شود و انتظار می‌رود که این مفهوم، پدیده فشار منفذی اضافی و همچنین روانگرایی را نزدیک به واقعیت ارائه دهد.

رابطه ارائه شده توسط مارتین و همکاران توسط بایرن ۱۹۹۱ طبق مطالعات تکمیلی انجام گرفته، اصلاح و رابطه (۲) ارائه شده است که با استفاده از آن می‌توان افزایش کرنش را در هر مرحله از بارگذاری به دست آورد [۱۶ و ۲۴]:

$$(\Delta\varepsilon_v)_{\frac{1}{2}\text{cycle}} = \gamma_c C_1' e^{\left(-C_2'\frac{\varepsilon_{vd}}{\gamma_c}\right)} \qquad (۲)$$

که در آن $(\Delta\varepsilon_v)_{\frac{1}{2}\text{cycle}}$ افزایش کرنش حجمی در هر یک از نیم- چرخه‌ها[6] (بارگذاری- باربرداری)، ε_{vd} کرنش حجمی ذخیره شده تا چرخه قبلی، γ_c دامنه کرنش برشی برای هر چرخه و C_1' و C_2' ثابت‌هایی هستند که در آن، C_1' از رابطه زیر به‌دست می‌آید [۲۴ و ۲۵]:

$$C_1' = 7600\left(D_r\right)^{-2/5} \quad (3)$$

که D_r چگالی نسبی[7] نمونه موردنظر است. ثابت C_1' را همچنین می‌توان با در دست داشتن مقدار نرمال شده آزمایش نفوذ استاندارد $\left(N_1\right)_{60}$، با کمک رابطه (۴) به‌دست آورد [۲۶]:

$$C_1' = 8/7\left(\left(N_1\right)_{60}\right)^{-1/25} \quad (4)$$

چگالی نسبی و مقدار نرمال شده آزمایش نفوذ استاندارد رابطه ای به‌صورت زیر باهم دارند که با در دست داشتن یکی، می‌توان دیگری را نیز محاسبه کرد [۲۵]:

$$D_r = 15\left(\left(N_1\right)_{60}\right)^{0.5} \quad (5)$$

و درنهایت ثابت دوم (C_2') را که نسبتی از ثابت اول (C_1') است، از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۴ و ۲۵]:

$$C_2' = \frac{0/4}{C_1'} \quad (6)$$

۴- روابط حاکم بر پدیده روانگرایی

بار لرزه‌ای وارده به مدل، علاوه بر جابه‌جایی‌های افقی و قائم، امکان ایجاد روانگرایی را در مدل نیز فراهم می‌کند. در تحقیق حاضر، پدیده روانگرایی با استفاده از دو روش عددی و تجربی محاسبه می‌شود که روابط آن به‌صورت زیر بررسی می‌شوند.

۴-۱- روابط حاکم بر روانگرایی مورداستفاده در روش عددی

برای به‌دست آوردن روانگرایی، روش‌ها و روابط مختلفی موجود است. روابطی که امکان استفاده از آنها در کد نویسی فلک وجود دارد و در تحقیق حاضر از مفاهیم آنها استفاده شده است، در ادامه به آن پرداخته می‌شود. یکی از روابط برای محاسبه روانگرایی به روش آزمایشگاهی در سال ۱۹۷۰ به‌صورت زیر ارائه شده است:

$$r_u = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi}\sin^{-1}\left[2\left(\frac{N}{N_L}\right)^{\frac{1}{\alpha}} - 1\right] \quad (7)$$

فشار منفذی ایجاد شده در هنگام زلزله، تابعی از تعداد معادل چرخه یکنواخت N برای یک زلزله خاص و تعداد چرخه N_L است که تحت مجموعه‌ای خاص از شرایط تنش، باعث روانگرایی یک خاک خاص می‌شود. روانگرایی زمانی اتفاق می‌افتد که r_u برابر یک شود و فشار منفذی اضافی با تنش مؤثر محصور کننده برابر باشد. در این رابطه α پارامتری تجربی است که پارامتر موردنظر برای خاک‌های متفاوت، مقادیر مختلفی دارد. این پارامتر تابعی از درصد ریزدانه در یک نوع خاک خاص، چگالی نسبی و نسبت مقاومت چرخه‌ای است. مقدار پارامتر α برای سیلت خالص بین ۰/۶ تا ۰/۸ و همچنین برای ماسه سیلتی برابر با ۰/۷ گزارش شده است [۹ و ۲۷]. در سال ۱۹۷۶، رابطه (۷) به‌صورت زیر اصلاح شده است:

$$r_u = \frac{2}{\pi}\sin^{-1}\left[\left(\frac{N}{N_L}\right)^{\frac{1}{2\alpha}}\right] \quad (8)$$

که در این رابطه نیز پارامترهای آن همانند رابطه (۷) هستند. پارامترهای این دو رابطه را می‌توان با استفاده از آزمایش سه محوره چرخه‌ای که توسط کنترل تنش همانند سایر آزمایش‌های چرخه‌ای غیر خشک دیگر به‌دست آورد [۲۸]. مدل دیگری به‌صورت رابطه (۹) در سال ۲۰۱۰ برای روانگرایی سیلت رسی پیشنهاد شده است[۲۹]:

$$r_u = \left(\frac{u_g}{\sigma'}\right) = \frac{2}{\pi}\sin^{-1}\left[\left(\frac{N'}{N_L'}\right)^{\frac{1}{2\alpha'}}\right] + \beta\sqrt{1-\left(\frac{2N'}{N_L'}-1\right)^2} \quad (9)$$

که در آن u_g فشار آب منفذی اضافی، σ' تنش محصور کننده مؤثر، N' تعداد چرخه‌های بارگذاری، N_L' تعداد چرخه‌های روانگرا شده و α' و β ضرایبی هستند که مقادیرشان با توجه به مقدار سیلت در هر خاک مشخص می‌شود. علاوه بر روش

آزمایشگاهی، در روش عددی می‌توان از رابطه زیر روانگرایی را به‌دست آورد [۱۳ و ۳۰]:

$$r_u = \frac{u_e}{(\sigma'_v)_{in}} = 1 - \frac{\sigma'_v}{(\sigma'_v)_{in}} \quad (10)$$

که در آن u_e فشار آب منفذی اضافی، $(\sigma'_v)_{in}$ تنش عمودی مؤثر قبل از اعمال بار لرزه‌ای و σ'_v تنش عمودی مؤثر ایجاد شده ناشی از اعمال بار لرزه‌ای است. فشار آب منفذی اضافی را می‌توان از رابطه زیر به‌دست آورد [۱۳ و ۳۰]:

$$u_e = P_w - (P_w)_{in} = (\sigma'_v)_{in} - \sigma'_v \quad (11)$$

که در آن P_w و $(P_w)_{in}$ به‌ترتیب فشار منفذی ایجاد شده بعد از اعمال بار لرزه‌ای و فشار منفذی اولیه است. در این پژوهش از مفاهیم روابط ارائه شده استفاده و به‌صورت زیر روانگرایی در روند مدل‌سازی محاسبه شده است [۲۵]:

$$(\sigma'_v)_{in} = \frac{S_{xx} + S_{yy} + S_{zz}}{3} + pp \quad (12)$$

$$PP_{excess} = PP - PP_{in} \quad (13)$$

$$PP_{ratio,excess} = \frac{PP_{excess}}{(\sigma'_v)_{in}} \quad (14)$$

که در این روابط $(\sigma'_v)_{in}$ تنش عمودی مؤثر قبل از اعمال بار لرزه‌ای و S_{xx}، S_{yy} و S_{zz} تنش در جهات مختلف است. همچنین PP فشار منفذی به‌وجود آمده در مدل، PP_{in} فشار منفذی اولیه، PP_{excess} فشار منفذی اضافی به‌وجود آمده در مدل و $PP_{ratio.excess}$ نسبت فشار منفذی اضافی یا همان r_u است که روانگرایی را نشان می‌دهد و مقادیر آن به‌گونه‌ای تعریف شده است که کمترین مقدار آن صفر باشد. روابط (۱۲) تا (۱۴) به کمک تابع فیش در نرم‌افزار فلک کد نویسی شده‌اند، به این ترتیب ابتدا مقادیر اولیه فشار منفذی به نرم‌افزار معرفی می‌شوند. پس‌ازآن پارامتری به‌عنوان تنش مؤثر قبل از اعمال بار لرزه‌ای در نظر گرفته شده است. با توجه به این دستورات، نرم افزار فشار منفذی و تنش مؤثر قبل از اعمال بار لرزه‌ای را در همه گره‌ها محاسبه می‌نماید. پارامتر دیگری به‌عنوان تفاضل دو مقدار فشار منفذی در هر گره قبل و بعد از اعمال بار دینامیکی به محیط برنامه‌نویسی نرم‌افزار معرفی شده است. این پارامتر به‌گونه‌ای تعریف شده است که اگر بعد از اعمال بار لرزه‌ای، فشار منفذی افزایش نیابد و اختلاف فشار منفذی در هر گره منفی شود آنگاه این پارامتر را صفر لحاظ کند. سپس با تقسیم دو مقدار اختلاف فشار منفذی قبل و بعد از اعمال بار لرزه‌ای و تنش مؤثر قبل از اعمال بار لرزه‌ای که در رابطه (۱۴) به آن اشاره شده است، نسبت فشار منفذی اضافی تعیین می‌شود. درنهایت قدر مطلق نسبت‌هایی که برای فشار منفذی به‌دست آمده‌اند به‌عنوان مقدار r_u در نظر گرفته می‌شود که مقادیر آن در بازه صفر تا ۱ قرار می‌گیرند.

۴-۲- روابط مورد استفاده در تخمین روانگرایی با روش تجربی

روابطی جهت تخمین ضریب ایمنی در برابر روانگرایی برای باطله‌ها در سال ۲۰۱۴ توسط بولانگر و ایدریس ارائه شده است [۳۱]. در این روش ابتدا نسبت مقاومت چرخه‌ای مواد با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۶]:

$$CRR_{M=7.5,\sigma'_v=1atm} = \exp\left(\frac{(N_1)_{60cs}}{14.1} + \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{126}\right)^2 + \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{23.6}\right)^3 + \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{25.4}\right)^4 - 2.8\right) \quad (15)$$

به این ترتیب نسبت مقاومت چرخه‌ای برای باطله مورد نظر تحت زلزله‌ای با بزرگی ۷/۵ در مقیاس ریشتر و تنش عمودی مؤثر یک اتمسفر به‌دست می‌آید ($CRR_{M=7.5,\sigma'_v=1atm}$) که در آن $(N_1)_{60cs}$ مقدار نرمال تعدیل شده آزمایش نفوذ استاندارد است و با استفاده از ضریب مربوط به مقدار ریزدانه در باطله تصحیح می‌شود. این عمل توسط رابطه زیر صورت می‌گیرد [۳۲]:

$$(N_1)_{60cs} = (N_1)_{60} + \Delta(N_1)_{60} \quad (16)$$

که در این رابطه $(N_1)_{60cs}$ مقدار نرمال شده آزمایش نفوذ استاندارد و $\Delta(N_1)_{60}$ ضریب تصحیح است که با استفاده از دامنه‌ها و روابط زیر تعیین می‌شود [۳۲]:

$$\begin{Bmatrix} FC\le 5\% : \Delta(N_1)_{60}=0 \\ 5\%<FC<35\% : \Delta(N_1)_{60}=\frac{7(FC-5)}{30} \\ FC\ge 35\% : \Delta(N_1)_{60}=7 \end{Bmatrix} \quad (17)$$

که در آن FC درصد ریزدانه موجود در باطله مورد نظر است. در ادامه به‌منظور تعمیم این مقدار به زلزله و مکان دلخواه، ضرایبی به‌عنوان ضرایب تصحیح اعمال می‌شود. یکی از این ضریب‌ها مربوط به عمق است که به طریق زیر محاسبه می‌شود [16]:

$$K_\sigma = 1-\left(C_\sigma \times \ln\left(\frac{\sigma'_{v1}}{P_a}\right)\right) \le 1.1 \quad (18)$$

که در این رابطه K_σ ضریب تصحیح مربوط به عمق، σ'_{v1} تنش عمودی مؤثر و P_a فشار اتمسفر در عمق مورد نظر است. همچنین C_σ نیز ضریبی وابسته به مقدار نرمال شده آزمایش نفوذ استاندارد است و به‌صورت زیر تعیین می‌شود [16]:

$$C_\sigma = \frac{1}{18/9-\left(2/55\times\sqrt{(N_1)_{60cs}}\right)} \le 1/1 \quad (19)$$

یکی دیگر از ضریب‌های تصحیح، مربوط به زلزله است که با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود [33]:

$$MSF = 1+(MSF_{max}-1) \times\left(8/64\times\exp\left(\frac{-M_w}{4}\right)-1/325\right) \quad (20)$$

که در آن M_w بزرگی زلزله است و بیشینه مقدار آن (MSF_{max}) به‌صورت زیر قابل‌محاسبه است [33]:

$$MSF_{max} = 1/09+\left(\frac{(N_1)_{60cs}}{31/5}\right)^2 \le 2/2 \quad (21)$$

درنهایت با در دست داشتن این دو ضریب تصحیح می‌توان نسبت مقاومت چرخه‌ای برای زلزله و عمق دلخواه را به‌صورت زیر به‌دست آورد [16]:

$$CRR_{M,\sigma'_v} = CRR_{M=7/5,\sigma'_v=1atm}\times MSF\times K_\sigma \quad (22)$$

پس از محاسبه نسبت مقاومت چرخه‌ای، نسبت تنش چرخه‌ای به‌عنوان عامل محرک به‌صورت زیر محاسبه می‌شود [34]:

$$CSR_{M,\sigma'_v} = 0/65\times\frac{\sigma_v}{\sigma'_v}\times\frac{a_{max}}{g}\times r_d \quad (23)$$

که در آن σ_v تنش عمودی در عمق موردنظر، a_{max} بیشینه شتاب زلزله، g شتاب گرانش و r_d ضریب کاهشی تنش برشی است که با استفاده از رابطه زیر به‌دست می‌آید [16 و 33]:

$$r_d = \exp\left(\alpha'' + \left(\beta' \times M_w\right)\right) \quad (24)$$

که در آن α'' و β' ضرایب وابسته به عمق هستند و به‌صورت زیر محاسبه می‌شوند [33]:

$$\alpha'' = -1/012-\left(1/126\times\sin\left(\frac{z}{11/73}+5/133\right)\right) \quad (25)$$

$$\beta' = 0/106+\left(0/118\times\sin\left(\frac{z}{11/28}+5/133\right)\right) \quad (26)$$

که در آنها z عمق نقطه موردنظر به‌منظور محاسبه روانگرایی است.

درنهایت ضریب ایمنی روانگرایی در برابر زلزله، از رابطه زیر محاسبه می‌شود [16]:

$$FSL = \frac{CRR_{M,\sigma'_v}}{CSR_{M,\sigma'_v}} \quad (27)$$

به این ترتیب، علاوه بر روش عددی، با استفاده از روش تجربی نیز می‌توان وقوع پدیده روانگرایی را پیش‌بینی کرد.

۵- مدل‌سازی عددی

در این بخش به ارائه مراحل مدل‌سازی انجام گرفته برای سد باطله اسفوردی با استفاده از روش تفاضل محدود و نرم‌افزار فلک دوبعدی پرداخته می‌شود. با توجه به گزارش‌های موجود از سد باطله اسفوردی، بدنه اصلی سد به‌صورت خطی است و تنها دو انتهای آن قوسی با شعاع انحنای بزرگ است. با استناد به این گزارش‌ها، استفاده از شرایط کرنش صفحه‌ای و به تبع آن، بهره‌گیری از نرم‌افزار Flac2D منطقی به نظر می‌رسد [19 و 35]. در مطالعات پیشینی که روی این سد و سدهای باطله دیگر انجام شده، نیز از فرض کرنش صفحه‌ای بهره گرفته شده است [7، 13، 17 و 19]. لازم به‌ذکر است که با توجه به در دسترس بودن نرم‌افزار فلک به‌عنوان یک نرم‌افزار روش عددی تفاضل محدود و امکان محاسبه روانگرایی، از این نرم‌افزار استفاده شده است.

۵-۱- هندسه مدل

همان‌طور که گفته شد سد باطله اسفوردی از نوع بالارو بوده و مطابق شکل ۲، مراحل ساخت آن انجام می‌شود. عمق پی‌سنگی به‌اندازه ارتفاع سد در نظر گرفته شده است. همچنین پی در قسمت آزاد بدنه سد، به‌اندازه ۱/۵ برابر ارتفاع آن گسترش داده شده است. این تمهیدات به‌منظور ایجاد بستر مناسب برای به حداقل رساندن خطای مدل‌سازی (مانند شرایط مرزی) و همچنین سوق دادن مدل به سمت شرایط واقعی زمین انجام گرفته است.

۵-۲- تخصیص مواد

در این بخش به معرفی ویژگی‌ها و پارامترهای دو مدل رفتاری موهر- کلمب و فین- بایرن پرداخته می‌شود. در مدل رفتاری موهر- کلمب، وزن مخصوص، زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی، مدول الاستیک و نسبت پوآسون هر یک از مواد تشکیل دهنده سد، مورد نیاز است. برای استفاده از مدل رفتاری فین- بایرن مقدار نرمال شده آزمایش نفوذ استاندارد به‌منظور لحاظ کردن شرایط اشباع و در نتیجه روانگرایی ناشی از بار دینامیکی مورد نیاز است. نکته حائز اهمیت در روابط دو مدل رفتاری موهر- کلمب و فین- بایرن استفاده از نفوذپذیری $\left(\frac{m^2}{Pa\times s}\right)$ به‌جای هدایت هیدرولیکی[۸] $\left(\frac{m}{s}\right)$ است [۲۵]. از آنجایی‌که مدل رفتاری فین- بایرن برخلاف مدل رفتاری موهر- کلمب در محیط نرم‌افزار فلک به‌صورت پیش‌فرض وجود ندارد؛ بنابراین با استفاده از کد نویسی این مدل رفتاری برای تحلیل‌های عددی تعریف‌شده است. به این منظور ابتدا محدوده‌های مورد نظر جهت تخصیص این مدل رفتاری در بخش‌های بدنه سد و باطله‌ها انتخاب می‌شود. در ادامه با استفاده از پارامتر مقدار نرمال شده آزمایش نفوذ استاندارد برای هر قسمت، مقادیر ثابت C_1' و C_2' به‌ترتیب از روابط (۴) و (۶) به‌دست می‌آیند. درنهایت مدل رفتاری فین- بایرن با کمک کد نویسی در محیط برنامه‌نویسی فلک انجام می‌گیرد.

۵-۳- تمهیدات مربوط به بخش دینامیکی

علاوه بر موارد در نظر گرفته شده در دو بخش هندسه مدل و تخصیص مواد، در بخش دینامیکی نیز تمهیداتی اعمال می‌شود تا بتوان نتایج قابل‌قبول و منطقی از مدل‌سازی کسب کرد که در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۵-۳-۱- مش‌بندی

مبحث مش‌بندی در دو بخش استاتیکی و دینامیکی حائز اهمیت است چراکه دو عامل مدت زمان حل مدل، دقت خروجی و صحت انتشار موج، تعداد مش‌های مربوط به هر مدل را تعیین می‌کنند. در بخش دینامیکی، بار لرزه‌ای وارده به مدل از طریق المان‌ها در مدل انتشار می‌یابد و اگر اندازه مش‌ها به اندازه کافی و منطقی کوچک نباشند، انتشار موج به‌درستی صورت نمی‌پذیرد. برای به‌دست آوردن ابعاد مش‌بندی مدل ابتدا بایستی سرعت موج عبوری در ماده‌ای که در بحرانی‌ترین حالت (در اینجا، بدنه سد) قرار دارد محاسبه شود. رابطه‌های (۲۸) و (۲۹) به‌ترتیب سرعت موج برشی و فشاری عبوری را نشان می‌دهند [۳۶]:

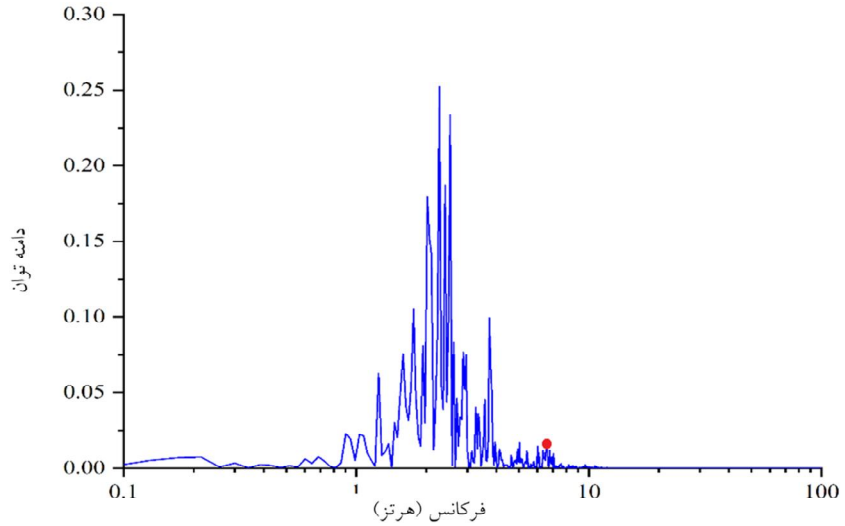
$$C_s=\left(\frac{E}{2\rho(1+\nu)}\right)^{0.5}=\left(\frac{G}{\rho}\right)^{0.5} \qquad (۲۸)$$

$$C_p=\left(\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}\right)^{0.5} \qquad (۲۹)$$

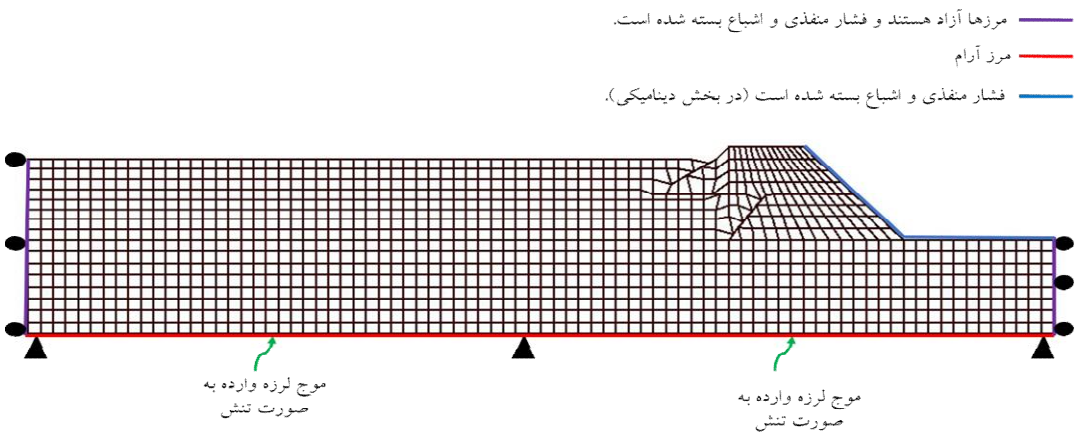
که در آنها E مدول الاستیک، G مدول برشی، ρ چگالی و ν نسبت پوآسون ماده مورد نظر است. با استفاده از رابطه (۷)، سرعت موج برشی در بدنه سد، ۵۲/۵ متر بر ثانیه به‌دست آمده است. سپس با توجه به سرعت موج برشی به‌دست آمده و بیشینه بسامد مربوط به موج وارده به مدل، بیشینه ابعاد مش بندی از رابطه (۳۰) به‌دست می‌آید [۳۷]:

$$\Delta l_{max}=\frac{C_s}{10 f_{max}} \qquad (۳۰)$$

که f_{max} بیشینه بسامدی است که موج در آن دارای توان است، این پارامتر با استفاده از نمودار توان- بسامد در شکل (۴) و همچنین با محاسبه دامنه طیف توان از رابطه (۳۱)، تعیین می‌شود:



شکل ۴- نمودار تغییرات دامنه توان با افزایش فرکانس



شکل ۵- مش‌بندی و شرایط مرزی سد باطله اسفوردی در نرم‌افزار فلک

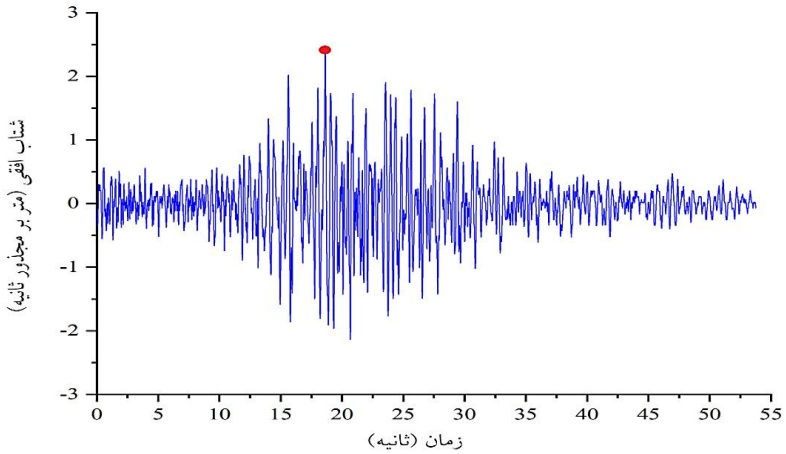
$$PSA = \frac{(FA)^2}{\pi T(RMSA)^2} \qquad (۳۱)$$

که در آن FA دامنه فوریه، π عدد ثابت ۳/۱۴، T مدت زمان ثبت موج و RMSA جذر میانگین مربع شتاب است.

به این ترتیب، با بهره‌گیری از شکل (۴) و رابطه (۳۱)، بیشترین بسامدی که در آن موج دارای توان باشد، ۶ هرتز است که با جایگذاری در رابطه (۳۰)، ابعاد مش‌بندی به‌طور تقریبی ۱ متر به‌دست می‌آید.

۵-۳-۲- شرایط مرزی

به‌منظور پیاده‌سازی شرایط نزدیک به واقعیت، شرایط مرزی شامل جابه‌جایی‌ها، نفوذپذیری و شرایط اشباع در صورت لزوم اعمال می‌شود. این موارد محدود به مدل‌سازی استاتیکی هستند و برای مدل‌سازی دینامیکی باید مرزهای مدل را تا حد امکان به‌گونه‌ای آماده‌سازی کرد تا به شرایط واقعی زمین نزدیک باشد. به همین دلیل، به‌طور کلی از دو مرز آزاد[۹] و یا آرام[۱۰] می‌توان استفاده کرد. بار لرزه‌ای مورد نظر به‌صورت تنش برشی به پایین مدل وارد شده به همین دلیل مرز پایین مدل، آرام و بقیه مرزهای اطراف، آزاد در نظر گرفته شده است که در شکل (۵) مشاهده می‌شود. همچنین تحلیل حساسیتی بر روی شرایط مرزی و ابعاد مدل به‌منظور تعیین ابعاد بهینه طبق پارامترهای ژئومکانیکی صورت گرفته است که ابعاد و شرایط مرزی مدل



شکل ۶- موج ورودی به کف مدل

به‌ترتیب در شکل‌های (۳) و (۵) مشاهده می‌شود.

۵-۳-۳- اعمال بار لرزه‌ای

واردکردن بار لرزه‌ای به مدل می‌تواند از دو طریق شتاب (یا سرعت) و تنش باشد که در این پژوهش از حالت دوم یعنی تنش استفاده شده است. داده‌های موجود، سرعت‌های ثبت‌شده توسط مرکز ژئوفیزیک دانشگاه تهران بوده که بهمن‌ماه سال ۱۳۸۳ در شهرستان بافق یزد رخ‌داده است. این زلزله به بزرگی ۶/۴ ریشتر و به مدت‌زمان ۵۳/۷ ثانیه اتفاق افتاد [۳۸]. شکل (۶)، نمودار مربوط به موج ورودی در کف مدل را نشان می‌دهد. با توجه به این نمودار می‌توان دریافت که بیشینه شتاب زمین[11] ۰/۲۵g است.

داده‌های مورد نظر پس از دسته‌بندی براساس مؤلفه‌های افقی و عمودی و اعمال تصحیحات لازم، مانند خط مبنا، با استفاده از رابطه (۳۲) به‌صورت تنش برشی به مدل اعمال شده است [۱۷]:

$$\sigma_s = ۲(\rho C_s) V_s \qquad (۳۲)$$

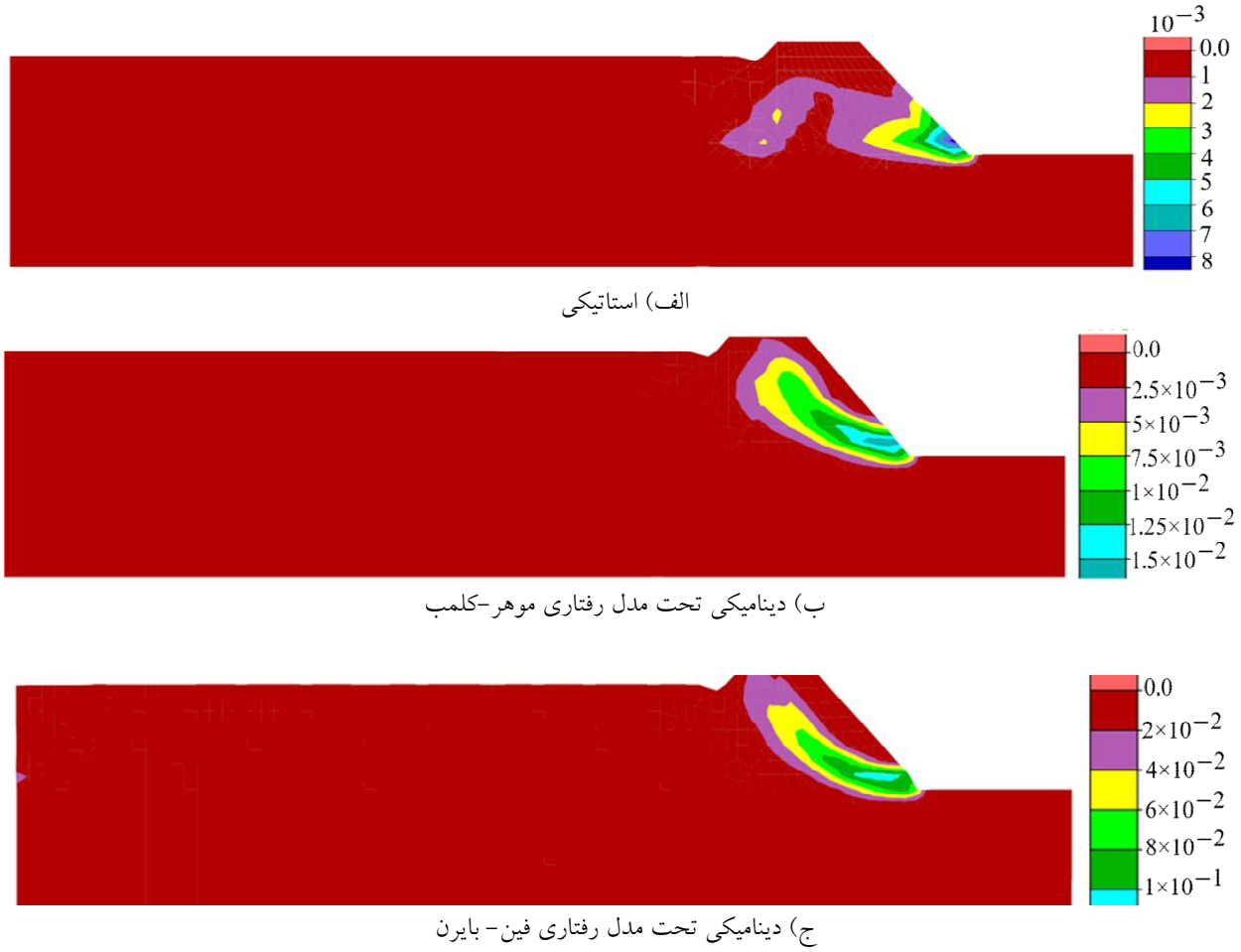
که در آن σ_s تنش برشی وارده، ρ چگالی ماده، C_s سرعت انتشار موج S شکل درون ماده و V_s سرعت ورودی به مدل است. لازم به‌ذکر است که مقادیر مربوط به سرعت در دو جهت افقی و قائم به‌صورت جدول با فاصله زمانی ۰/۰۰۵ ثانیه و تعداد ۲۱۵۰۸ آرایه، به‌مدت ۵۳/۷ ثانیه در نرم‌افزار فراخوانی می‌شود. سپس در هر بازه زمانی از حل مدل، سرعت‌های فراخوانی شده، در رابطه (۳۲) جایگذاری شده و به‌صورت تنش برشی به کف مدل اعمال شده است.

۵-۳-۴- میرایی

سیستم‌های دینامیکی به‌طور طبیعی دارای مقداری از میرایی هستند که در غیر این صورت، سیستمی که تحت تأثیر یک نیروی دینامیکی قرار می‌گیرد برای همیشه نوسان می‌کند [۸]. اصطکاک بین مواد و همچنین لغزش صفحات روی یکدیگر می‌تواند میرایی را به دنبال داشته باشد، بنابراین مدل‌سازی عددی نیز باید این ویژگی از طبیعت را پوشش دهد تا به حالت واقعی نزدیک باشد. انواع میرایی مختلف برای مواد در مدل‌سازی وجود دارد که رایج‌ترین آن برای سازه‌های خاکی و سنگی، میرایی رایلی است که در این تحقیق مورد استفاده قرارگرفته است [۳۹]. میرایی مواد زمین‌شناسی معمولاً در بازه ۲ تا ۵٪ از میرایی بحرانی قرار می‌گیرد. در تحقیق حاضر به‌دلیل پایین بودن مقدار مدول برشی مواد تشکیل دهنده سد، از میرایی رایلی[12] ۵٪ استفاده شده است.

۶- نتایج و بحث

جابه‌جایی‌ها یکی از ملاک‌های اصلی بررسی پایداری سازه هستند. همان‌طور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، افزایش



الف) استاتیکی

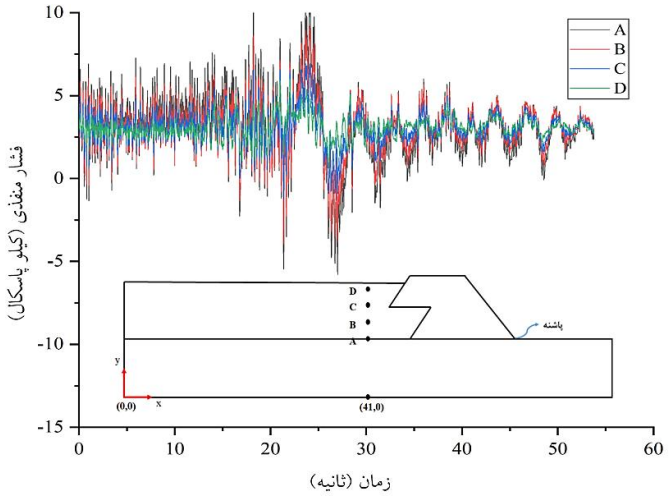
ب) دینامیکی تحت مدل رفتاری موهر-کلمب

ج) دینامیکی تحت مدل رفتاری فین- باین

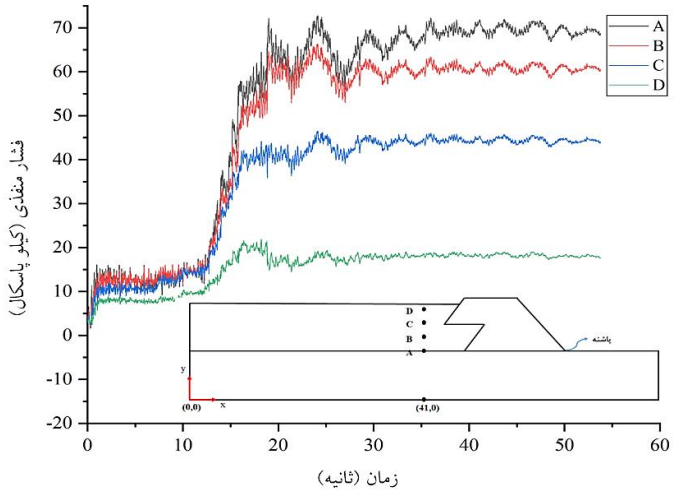
شکل ۷- کانتورهای افزایش کرنش برشی در حالت‌های مختلف استاتیکی و دینامیکی

کرنش برشی در حالت استاتیکی در بدنه سد رخ داده و به مقدار کمی در باطله‌ها مشاهده شده است. بیشترین جابه‌جایی در این حالت، ۲ سانتی‌متر بوده که در قسمت پایین‌دست بدنه سد رخ داده است. پس از واردکردن موج زلزله بافق، همان‌طور که انتظار می‌رود این موج به‌عنوان یک نیروی مخرب عمل کرده و میزان کرنش برشی و به‌تبع آن جابه‌جایی‌ها نیز افزایش می‌یابند. شکل (۷- ب) و(۷- ج)، به‌خوبی گویای این موضوع است چرا که در این حالت، افزایش کرنش برشی روند صعودی چشمگیری نسبت به حالت استاتیکی داشته است و در نتیجه آن، بیشترین جابه‌جایی در پایین‌دست بدنه سد برای مدل رفتاری موهر– کلمب به ۵ سانتی‌متر می‌رسد. اما نکته قابل توجه، تفاوت در نتایج دو مدل رفتاری موهر- کلمب و فین- باین است، به‌طوری که مقادیر جابه‌جایی به‌صورت قابل توجهی در مدل رفتاری فین- باین افزایش یافته و بیشترین جابه‌جایی در پایین‌دست در بدنه سد به ۳۵ سانتی‌متر رسیده است که این مقدار، اختلاف بین دو مدل رفتاری مربوطه را به‌خوبی نشان می‌دهد. همچنین در حالتی که از مدل رفتاری فین– باین استفاده شده است، علاوه بر جابه‌جایی‌های افقی، در اکثر نقاط سد، نشست‌هایی رخ‌داده که بیشترین مقدار آن تقریباً ۲۲ سانتی‌متر و مربوط به بالادست بدنه سد است.

فشار منفذی از دیگر ملاک‌هایی است که به‌منظور مقایسه دو مدل رفتاری موهر– کلمب و فین– باین و همچنین پایداری سد باطله، مورد بررسی قرارگرفته است. به این ترتیب نقاطی به‌عنوان شاهد در دو مدل رفتاری مختلف در عمق‌ها و فواصل



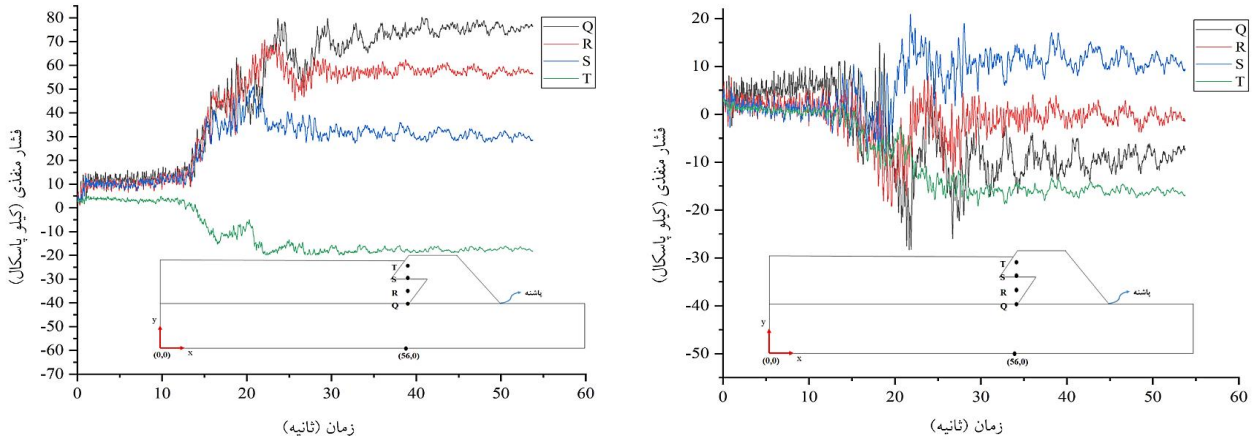
الف) مدل رفتاری موهر- کلمب



ب) مدل رفتاری فین- بایرن

شکل ۸- فشار منفذی به‌دست‌آمده از دو مدل رفتاری موهر- کلمب و فین- بایرن در فاصله ۲۹ متری از پاشنه

مختلف از پاشنه سد به‌منظور پایش تغییر فشار منفذی در نظر گرفته شده‌اند. شکل (۸) فشار منفذی را در فاصله ۲۹ متری از پاشنه سد و در ترازهای ۸، ۱۰، ۱۲ و ۱۴ متری، برای دو مدل رفتاری موهر- کلمب و فین- بایرن نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۸- الف) مشاهده می‌شود، فشار منفذی با افزایش عمق، بیشتر می‌شود به‌طوری‌که در نقطه شاهد A که مرز بین پی و باطله است، به حداکثر مقدار خود می‌رسد. در مدل رفتاری موهر- کلمب کاملاً مشهود است که فشار منفذی پس از نوسانات زیاد درنهایت تمایل دارد به مقدار اولیه خود برگردد. در شکل (۷- ب) نیز با افزایش عمق، فشار منفذی بیشتر می‌شود، اما نکته قابل ذکر در مدل رفتاری فین- بایرن افزایش تصاعدی مقادیر فشار منفذی در فاصله زمانی ۱۰ تا ۲۰ ثانیه و ثابت ماندن تقریبی آن پس از ثانیه ۲۰ به‌دلیل میرا شدن شتاب لرزه‌ای است. این پدیده در ادامه می‌تواند باعث افزایش فشار آب منفذی اضافی و در نتیجه آن باعث روانگرایی شود. فاصله ۱۴ متری از پاشنه سد به‌دلیل عبور موج از هر سه بخش سد (پی، باطله و بدنه سد)، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در همین راستا چندین نقطه شاهد در این فاصله و در ترازهای

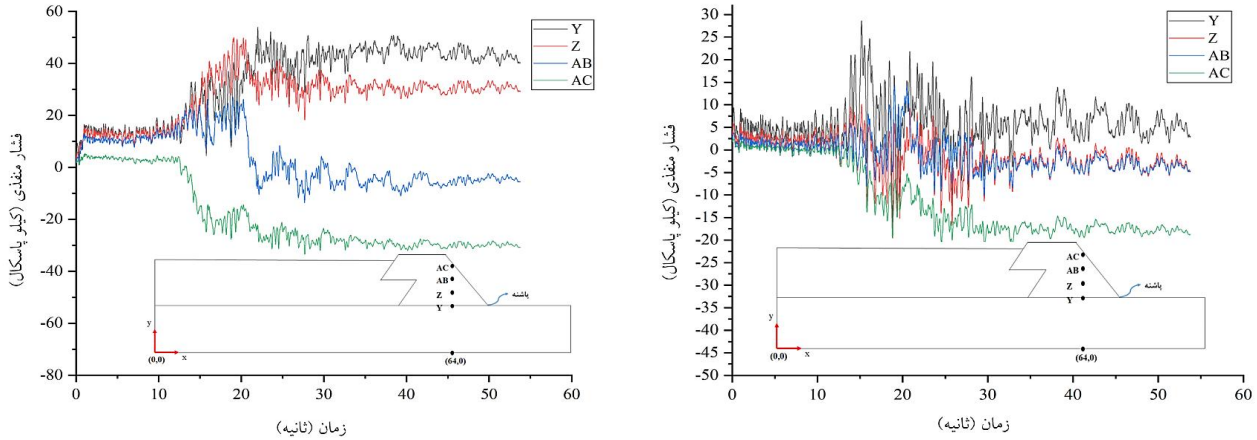


الف) مدل رفتاری موهر- کلمب ب) مدل رفتاری فین- بایرن

شکل ۹- فشار منفذی به‌دست آمده از دو مدل رفتاری موهر- کلمب و فین- بایرن در فاصله ۱۴ متری از پاشنه سد

مختلف در نظر گرفته شده‌اند. در شکل (۹) می‌توان فشار منفذی را در فاصله ۱۴ متری از پاشنه سد و در چند تراز مختلف مشاهده کرد. با توجه به شکل (۹- الف) که از مدل رفتاری موهر- کلمب استفاده شده است، بیشترین مقدار فشار منفذی را در نقطه مرز بین پی و باطله (Q) نشان می‌دهد که این مسئله، روند شکل (۸) را تصدیق می‌کند. کمترین مقدار فشار منفذی نیز در باطله اتفاق افتاده است چرا که با عبور موج از پی، به‌عنوان ماده‌ای سخت و رسیدن به باطله، سرعت موج کم شده و در نتیجه فشار منفذی کاهش یافته است و به کمترین مقدار خود می‌رسد. با عبور موج از باطله، به‌عنوان ماده‌ای سست و رسیدن به بدنه سد، دوباره سرعت موج افزایش می‌یابد و نتیجه آن افزایش فشار منفذی است که در شکل مشاهده می‌شود. اما برای مدل رفتاری فین- بایرن (شکل ۹- ب) همان‌طور که قبلاً گفته شد افزایش فشار منفذی در هرکدام از نقاط شاهد به‌صورت تصاعدی بوده و با افزایش عمق، فشار منفذی افزایش یافته است. با توجه به شکل (۹) می‌توان دریافت که مدل رفتاری موهر- کلمب حساسیت بیشتری نسبت به کاهش و افزایش سرعت موج در ماده و در نتیجه آن تغییرات فشار منفذی دارد درحالی‌که مدل رفتاری فین- بایرن این حساسیت را بیشتر نسبت به عمق نشان می‌دهد.

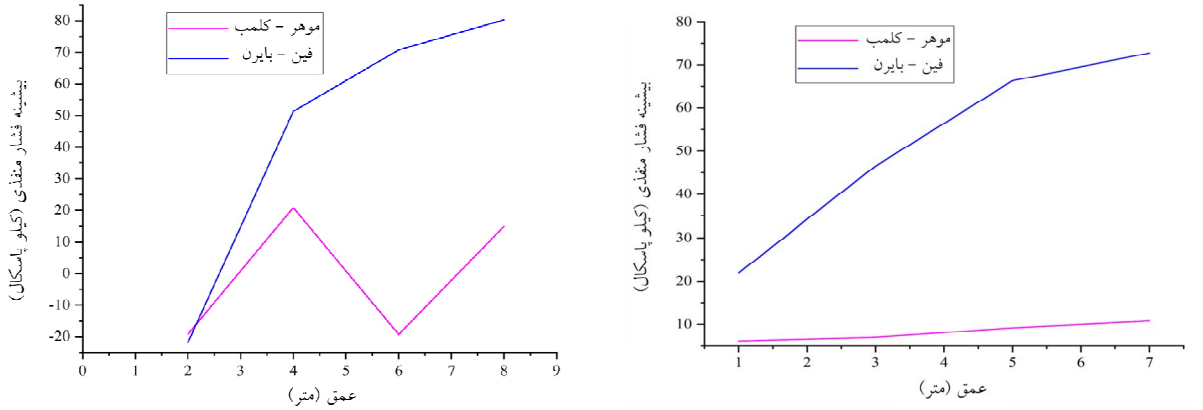
نقاط شاهد دیگری در فاصله ۶ متری از پاشنه سد در نظر گرفته شده‌اند، جایی که موج از پی به‌صورت مستقیم بدون برخورد با باطله‌ها وارد بدنه سد می‌شود. شکل (۱۰) تغییرات فشار منفذی را در این خصوص ارائه می‌دهد. با توجه به شکل (۱۰)، در عمق زیاد همانند بخش‌های قبل، بیشترین فشار منفذی (در هر دو مدل رفتاری) اتفاق افتاده است. ازآنجایی‌که در این بخش، موج بدون هیچ برخوردی با باطله، به بدنه سد وارد می‌شود و ازآنجایی که مقادیر پارامترهای مقاومتی پی از بدنه سد بیشتر است، این موج تضعیف شده و در نتیجه آن فشار منفذی کاهش‌یافته است. همان‌طور که در شکل (۱۰- ب) دیده می‌شود با وارد شدن موج به منطقه ضعیف‌تر، موج تضعیف شده ولی رفته رفته موج تشدید می‌یابد به‌طوری که در نقطه شاهد AC که روی پیشانی سد و در قسمت بیرونی آن قرار دارد، موج تشدید شده و فشار منفذی از سایر نقاط دیگر موجود در بدنه سد، بیشتر شده است. این مسئله می‌تواند باعث روانگرایی در بدنه سد و همچنین افزایش جابه‌جایی‌ها در بدنه شود که بایستی موردتوجه قرار گیرد. با اینکه در مدل رفتاری فین- بایرن، عمق تأثیر زیادی دارد اما همان‌طور که دیده می‌شود در شکل (۱۰- ب) در نقطه AC با اینکه عمقی کمتر از نقطه AB دارد، اما به‌دلیل تشدید موج همانند نتایج مدل رفتاری موهر- کلمب، فشار منفذی بیشتری دارد. این دو مدل رفتاری می‌توانند در این قسمت همدیگر را تصدیق کنند و اهمیت پایش تغییرات و افزایش فشار منفذی به‌وجود آمده ناشی از



الف) مدل رفتاری موهر- کلمب

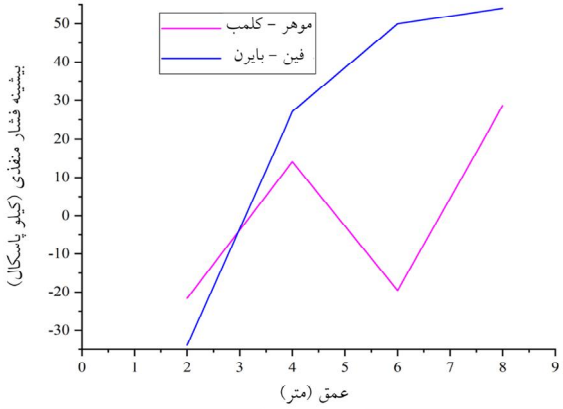
ب) مدل رفتاری فین- بایرن

شکل ۱۰- فشار منفذی به‌دست آمده از دو مدل رفتاری موهر- کلمب و فین- بایرن در فاصله ۶ متری از پاشنه سد



الف) تغییرات بیشینه فشار منفذی در فاصله ۲۹ متری از پاشنه سد

ب) تغییرات بیشینه فشار منفذی در فاصله ۱۴ متری از پاشنه سد



ج) تغییرات بیشینه فشار منفذی در فاصله ۶ متری از پاشنه سد

شکل ۱۱- تغییرات بیشینه فشار در فواصل مختلف از پاشنه سد در عمق‌های متفاوت

زلزله را پررنگ‌تر جلوه می‌دهند.

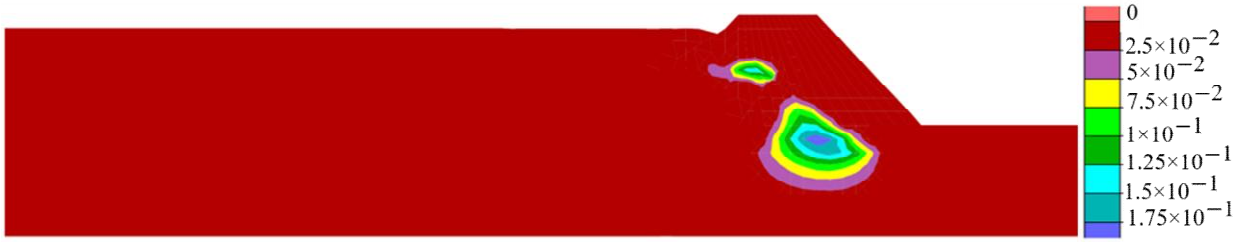
تغییرات بیشینه فشار منفذی در عمق‌های مختلف با استفاده از دو مدل رفتاری موهر- کلمب و فین – بایرن بررسی شده است و در شکل (۱۱) می‌توان مقایسه بین این دو مدل رفتاری

را در فواصل مختلف از پاشنه سد مشاهده کرد. همان‌طور که در شکل (۱۱) دیده می‌شود، در فاصله ۲۹ متری از پاشنه سد، در هر دو مدل رفتاری موهر- کلمب و فین- بایرن، فشار منفذی روندی صعودی دارد، در حالی که این افزایش در مدل رفتاری فین- بایرن بسیار قابل‌توجه است. به‌طوری که بیشینه فشار منفذی به‌وجود آمده از مدل رفتاری فین- بایرن تقریباً ۷ برابر مدل رفتاری موهر- کلمب است. اما با کم شدن فاصله از پاشنه سد، تفاوت در افزایش فشار منفذی برای دو مدل رفتاری مدنظر، کمتر شده که در شکل (۱۱- ب) و (۱۱- ج) این نکته کاملاً قابل مشاهده است. در هر سه بخش از شکل (۱۱) می توان دید که با افزایش عمق و روباره بالای نقطه مدنظر، فشار منفذی نیز افزایش یافته است. در فاصله ۶ متری از پاشنه سد تفاوت بین تغییرات فشار منفذی در دو مدل رفتاری به حداقل مقدار خود رسیده و بیشینه فشار منفذی در مدل رفتاری فین- بایرن دو برابر بیشینه فشار منفذی در مدل رفتاری موهر- کلمب است که این تناسب خیلی کمتر از مقداری است که در فاصله ۲۹ متری از پاشنه سد به دست آمد.

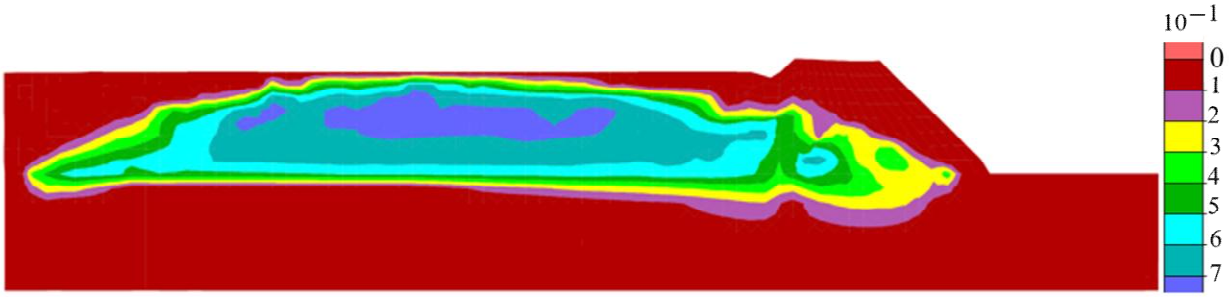
همچنین مشاهده شد که اعمال بار لرزه‌ای به مدل باعث افزایش جابه‌جایی‌های افقی و قائم (نشست) در بدنه سد و باعث افزایش فشار منفذی شده و بیشترین مقادیر آن مربوط به مدل رفتاری فین- بایرن است؛ اما تأثیرات این متحرک کننده دینامیکی به این ختم نشده و اثرات آن در افزایش فشار منفذی اضافی و در نتیجه آن باعث پدیده روانگرایی می‌شود.

با بهره‌گیری از مفاهیم روابط (۷-۱۱) و همچنین استفاده از روابط (۱۲-۱۴) در کد نویسی فلک روانگرایی محاسبه می‌شود. در شکل (۱۲)، کانتورهای روانگرایی به‌دست آمده از دو مدل رفتاری موهر- کلمب و فین- بایرن مشاهده می‌شود. تعدادی از محققان مقدار r_u برابر یک را حد روانگرایی در نظر گرفته‌اند [۱۵ و ۱۷]. در حالی که دیگر محققان که حالت محافظه کارانه‌ای را در نظر می‌گیرند بر این باورند که مقدار نسبت فشار منفذی اضافی با قرار گرفتن در بازه ۰/۸ و ۱ نیز مستعد روانگرایی است [۳۰]. حتی در پژوهشی بیان شده است که اگر r_u از ۰/۷ بزرگ‌تر باشد آنگاه روانگرایی مستعد رخداد است که این حالت بسیار محافظه کارانه است [۴۰]. همان‌طور که در شکل ۱۲-الف مشاهده می‌شود، فشار منفذی اضافی، در بدنه سد و قسمت پایین‌دست آن، که نزدیک به پاشنه سد است اتفاق افتاده است، البته در شکل ۱۲- الف که از مدل رفتاری موهر- کلمب استفاده شده است، مقادیر نسبت فشار منفذی اضافی کمتر از ۰/۷ است، بنابراین روانگرایی رخ نداده است اما می‌توان گفت که این مناطق تحت زمین‌لرزه‌های شدیدتر می‌تواند مستعد روانگرایی باشد. در شکل (۱۲- ب) کانتورهای روانگرایی که در حل آن از مدل رفتاری فین- بایرن استفاده شده است، علاوه بر ناحیه پایین‌دست بدنه سد که در مدل رفتاری موهر- کلمب نیز افزایش فشار منفذی را شاهد هستیم، در محل پشت بدنه سد که باطله‌ها قرار دارند نیز فشار منفذی افزایش یافته است. در مدل رفتاری فین- بایرن، بیشینه مقدار نسبت فشار منفذی اضافی، ۰/۷ است که طبق پژوهشی که پیش‌تر در مورد آن بحث شد، می‌توان گفت این مناطق دچار روانگرایی می‌شوند. با توجه به کانتورهای روانگرایی در شکل (۱۲- ب) می‌توان دریافت که مناطقی با نسبت فشار منفذی اضافی ۰/۷ است، بیشتر شامل باطله‌ها و قسمت‌هایی از پایین‌دست بدنه سد جایی که محل برخورد باطله‌ها با بدنه سد است، اتفاق افتاده است؛ بنابراین مشاهده می‌شود که مقادیر نسبت فشار منفذی اضافی در مدل رفتاری فین- بایرن به‌مراتب بزرگ‌تر از مدل رفتاری موهر- کلمب هستند و همچنین مکان هایی که در آنها افزایش فشار منفذی رخ داده است بسیار گسترده‌تر است.

با استفاده از روابط تجربی (۱۵-۲۷) ضریب ایمنی در برابر روانگرایی ناشی از زلزله محاسبه‌شده که نتایج آن در شکل (۱۳) قابل مشاهده است. همان‌طور که در شکل (۱۳) مشاهده می‌شود، در عمق‌های کم، ضرایب ایمنی در برابر روانگرایی که برای روش تجربی به‌دست آمده‌اند، بالاتر از ۱/۳ است. با افزایش عمق، ضریب ایمنی در برابر روانگرایی کاهش یافته تا اینکه به کمترین مقدار خود یعنی ۱/۲ رسیده است. در روش

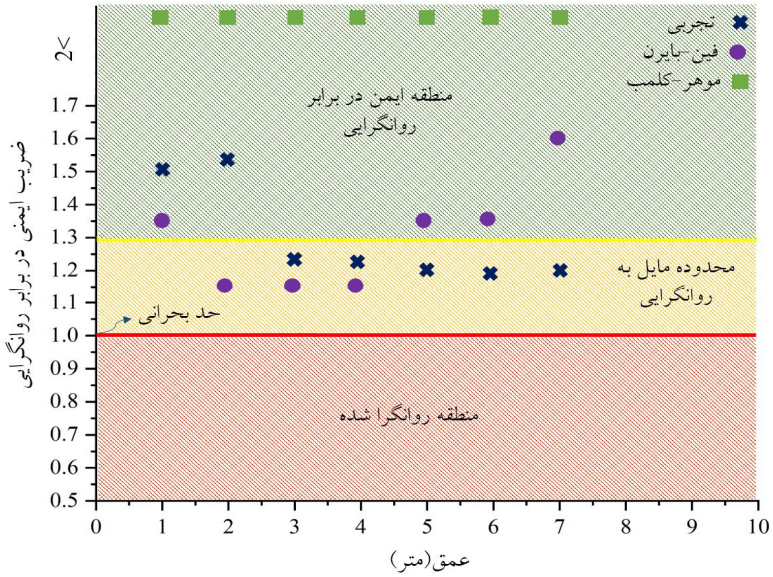


الف) مدل رفتاری موهر- کلمب



ب) مدل رفتاری فین- بایرن

شکل ۱۲- کانتورهای روانگرایی در دو مدل رفتاری موهر- کلمب و فین- بایرن



شکل ۱۳- ضرایب ایمنی روش عددی و تجربی در عمق‌های مختلف

عددی که در آن از مدل رفتاری فین- بایرن استفاده شده است، مقادیر ضریب ایمنی به‌روش تجربی نزدیک است. هر چند که با افزایش عمق، مقادیر ضریب ایمنی روش تجربی و روش عددی که از مدل رفتاری فین- بایرن استفاده شده است، از یکدیگر فاصله گرفته‌اند. همان‌طور که در بخش تحلیل نتایج عددی گفته شد، در قسمت‌هایی از باطله، مواد در محدوده مایل به روانگرایی قرار گرفته‌اند. این نتیجه با استفاده از روش تجربی نیز قابل مشاهده است. در حالی که با استفاده از مدل رفتاری موهر- کلمب ضرایب ایمنی در برابر روانگرایی به‌خوبی برآورد نشده و با مقادیر تجربی فاصله بسیاری دارند.

نتایج نشان می‌دهند که تغییرات پارامتر مقدار نرمال شده آزمایش نفوذ استاندارد، بیشترین تأثیر را در پدیده روانگرایی دارد. با توجه به نتایج آزمایشگاهی، سعی شده است مقدار این پارامتر به مقدار واقعی نزدیک شود. البته می‌توان در مطالعات بعدی به بررسی دقیق‌تر و آنالیز حساسیت با توجه به عدم قطعیت در پارامترهای ژئومکانیکی پرداخت.

۷- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

پایداری و روانگرایی دینامیکی سد باطله معدن فسفات اسفوردی تحت زلزله‌ای به بزرگی ۶/۴ در مقیاس ریشتر که در سال ۱۳۸۳ در شهرستان بافق استان یزد رخ‌داده، مورد بررسی قرارگرفته است. از آنجایی که این سد از نوع بالارو بوده، طبق مطالعات پیشین، احتمال وقوع روانگرایی و جابه‌جایی‌ها در آن زیاد است. در مدل‌سازی عددی این سد از دو مدل رفتاری موهر- کلمب و فین- بایرن به‌صورت مقایسه‌ای استفاده شده است. پارامترهای کرنش برشی، جابه‌جایی‌های قائم (نشست) و افقی، افزایش فشار منفذی و همچنین روانگرایی پایش و مورد بررسی قرارگرفته‌اند که نتایج آن به‌صورت خلاصه در زیر ارائه می‌شود:

- کرنش برشی در هر دو حالت استاتیکی و دینامیکی در بدنه سد اتفاق می‌افتد. در حالت استاتیکی، بیشترین جابه‌جایی افقی در پاشنه سد به اندازه ۲ سانتی‌متر مشاهده می‌شود که نشست‌های محسوسی در این حالت رخ نداده است؛ اما در حالت دینامیکی همان‌طور که انتظار می‌رود، کرنش‌های برشی و درنتیجه جابه‌جایی‌ها افزایش یافته‌اند. در حالتی که از مدل رفتاری موهر- کلمب استفاده شده، بیشترین جابه‌جایی در پاشنه سد برابر با ۵ سانتی‌متر رخ‌داده است و اما کماکان نشست‌های محسوسی مشاهده نمی‌شود؛ اما در حالتی که از مدل رفتاری فین- بایرن استفاده‌شده، بیشینه جابه‌جایی افقی در پاشنه سد به‌صورت قابل‌توجهی افزایش یافته و به ۳۵ سانتی‌متر رسیده است، همچنین تقریباً در همه جای مدل نشست‌هایی اتفاق افتاده که بیشترین مقدار آن در بخش بالادست بدنه سد و به میزان ۲۲ سانتی‌متر است.
- فشار منفذی به‌عنوان یکی از معیارهایی که برای پایداری سد و مقایسه دو مدل رفتاری موهر- کلمب و فین- بایرن در نظر گرفته شده، پایش شده است. همان‌طور که در بخش بررسی فشار منفذی اشاره شد، با افزایش عمق فشار منفذی در هر دو حالت مدل رفتاری موهر-کلمب و فین- بایرن افزایش یافته‌اند؛ اما نکته قابل‌توجه این است که میزان تغییرات و افزایش فشار منفذی در مدل رفتاری فین- بایرن بسیار بیشتر از مدل رفتاری موهر-کلمب است به‌طوری که در فاصله ۲۹ متری از پاشنه سد و در عمق ۷ متری جایی که مرز بین پی و باطله‌ها بوده، این تفاوت به حداکثر مقدار خود رسیده و فشار منفذی در مدل رفتاری فین- بایرن تقریباً ۷ برابر فشار منفذی در مدل رفتاری موهر- کلمب بوده است. همان‌طور که با عبور موج لرزه از ماده قوی به ضعیف، سرعت و شتاب کاهش می‌یابد، فشار منفذی نیز از این قاعده مستثنا نبوده و روندی کاهشی داشته است. مشاهده می‌شود که با افزایش عمق باطله، موج لرزه مسیر طولانی‌تری را طی می‌کند تا به سطح آزاد برسد و در این بین موج کاملاً تضعیف شده و از میزان افزایش فشار منفذی کاسته می‌شود؛ بنابراین همین نکته برای سد باطله اسفوردی قابل‌توجه است چراکه اگر در سال‌های اول عمق باطله‌ها کم باشد، موج سریع‌تر به سطح آزاد می‌رسد و می تواند باعث افزایش قابل‌توجه فشار منفذی و در نتیجه روانگرایی شود. نکته دیگری که باید به آن توجه نمود این است که مدل رفتاری موهر- کلمب نسبت به عمق، حساسیت بیشتری از فین- بایرن از خود نشان می‌دهد و با افزایش عمق، فشار منفذی در مدل رفتاری موهر- کلمب خیلی بیشتر از مدل رفتاری فین- بایرن رخ داده است. در عمق‌های زیاد و نزدیک پاشنه سد (فاصله ۶ متری) اختلاف بین این دو مدل رفتاری برای بیشترین فشار منفذی به کمترین مقدار خود می‌رسد.
- افزایش فشار منفذی اضافی باعث ایجاد روانگرایی می‌شود

که می‌تواند سرریز شدن باطله‌ها از تاج سد و همچنین ناپایداری بدنه را به‌دنبال داشته باشد. به همین منظور، روانگرایی نیز با استفاده از دو مدل رفتاری موهر- کلمب و فین- بایرن مورد بررسی قرارگرفته است. مشاهده می‌شود که در حالت اولیه که از مدل رفتاری موهر- کلمب استفاده می‌شود حداکثر نسبت فشار منفذی اضافی تقریباً ۰/۱۸ به دست می‌آید که تهدیدی برای سد محسوب نمی‌شود اما نکته قابل توجه آن این است که چون مدل رفتاری موهر- کلمب نسبت به عمق حساسیت بیشتری از خود نشان می‌دهد، مکانی که احتمال رخداد روانگرایی است همان بدنه سد باطله است که این می‌تواند در زلزله‌های قوی‌تر مشکل‌زا و حتی منجر به ناپایداری سد شود. در حالت دوم که از مدل رفتاری فین- بایرن استفاده‌شده است، مقادیر نسبت فشار منفذی اضافی بیشتر از حالت اولیه شده و بیشترین آن در قسمت پایین‌دست بدنه سد و وسط باطله‌ها اتفاق افتاده که مقدار آن ۰/۷ بوده است. این مقدار در اکثر منابع تهدیدی برای روانگرایی محسوب نمی‌شود اما در بعضی از منابع از مقدار ۰/۷ به‌عنوان آستانه رخداد روانگرایی یاد می‌شود.

- ضریب ایمنی در برابر روانگرایی با استفاده از روش تجربی نیز محاسبه شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که در این روش، ضریب ایمنی به‌طور کامل به عمق وابسته است. در واقع با افزایش عمق، ضریب ایمنی در برابر روانگرایی کاهش می‌یابد؛ که در اعماق کمتر از روانگرایی رخ نداده و از اعماق ۳ تا ۷ متر، ضرایب ایمنی کاهش یافته است و مواد باطله در آستانه روانگرایی قرار می‌گیرند.

درنهایت برای حالتی که از مدل رفتاری فین- بایرن استفاده شده است کرنش برشی، جابه‌جایی‌های افقی و قائم، فشار منفذی و همچنین نسبت فشار منفذی اضافی بیشتری مشاهده می‌شود. مقادیر به‌دست آمده برای ضرایب ایمنی در برابر روانگرایی با استفاده از روش تجربی و مدل رفتاری فین- بایرن با روش عددی مطابقت قابل قبولی نشان می‌دهند. این در حالی است که نتایج مدل رفتاری موهر- کلمب با روش تجربی فاصله قابل توجهی دارند. توجه به این نتایج می‌توان گفت که مدل رفتاری فین- بایرن در مسائل دینامیکی می‌تواند نتایج محافظه کارانه و نزدیک به واقعیت را ارائه دهد. همچنین پدیده تشدید و تضعیف موج و ارتباط آن با فشار منفذی را به‌خوبی نمایش می‌دهد. با استناد به مقادیر جابه‌جایی‌های افقی و قائم و همچنین نسبت فشار منفذی اضافی، می‌توان اظهار کرد که سد باطله اسفوردی در حالت آستانه روانگرایی (و احتمالاً ناپایداری) قرار می‌گیرد که با رخداد زلزله‌های قوی‌تر احتمال ناپایداری آن افزایش‌یافته و می‌تواند تهدیدی جدی برای سد محسوب شود.

واژه‌نامه

1. up stream
2. downstream
3. centerline
4. phreatic surface
5. beach
6. mid-cycle
7. relative density
8. hydraulic conductivity
9. free field
10. quiet boundary
11. peak ground acceleration
12. Ryleigh damping

مراجع

1. Blight, G. E. and Fourie, A. B., "A Review of Catastrophic Flow Failures of Deposits of Mine Waste and Municipal Refuse", *in International Workshop on Occurrence and Mechanisms of Flow in Natural Slopes and Earth Fills,* Italia, pp. 1–17, 2003.
2. Lyu, Z., Chai, J., Xu, Z., Qin, Y. and Cao, J., "A Comprehensive Review on Reasons for Tailings Dam Failures Based on Case History", *Advances in Civil Engineering*, Vol. 2019, pp. 1-18, 2019.
3. Seed, H. B., "Earthquake-Resistant Design of Earth Dams*", First International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering & Soil Dynamics*, *Missouri*, pp. 1157-1173, 1981.

4. Liu, H. X., Li, N., Liao, X., Wu, C. S. and Pan, X. D., "Effective Stress Analysis Method of Seismic Response for High Tailings Dam", *Journal of Central South University of Technology*, Vol. 14, No. 1, pp. 129-134, 2007.
5. Chakraborty, D. and Choudhury, D., "Investigation of the Behavior of Tailings Earthen Dam Under Seismic Conditions", *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 2, No. 3, pp.559-564, 2009.
6. Chakraborty, D. and Choudhury, D., "Seismic Slope Stability Analysis of Tailings Earthen Dam Using TALREN 4", *In Indian Geotechnical Conference, Geotrendz*, pp. 187-190, 2010.
7. Xu, B., Lu, Q. and He, D., "Seismic Stability Analysis of the Yanghuya Fly Ash Tailings Dam*", Environmental & Engineering Geoscience*, Vol. 20, No. 4, pp. 371-391, 2014.
8. Azhari, A. and Ozbay, U., "Role of Geometry and Stiffness Contrast on Stability of Open Pit Mines Struck by Earthquakes", *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 36, No. 2, pp.1249-1266 2018.
9. Naeini, M. and Akhtarpour, A., "Numerical Analysis of Seismic Stability of a High Centerline Tailings Dam", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 107, pp.179-194, 2018.
10. Korzec, A. and Świdziński, W., "Dynamic Response of Zelazny Most Tailings Dam to Mining Induced Extreme Seismic Event Occurred in 2016", *MATEC Web of Conferences*, Vol. 262, p. 01001, EDP Sciences, 2019.
11. Zhang, C., Chai, J., Cao, J., Xu, Z., Qin, Y. and Lv, Z., "Numerical Simulation of Seepage and Stability of Tailings Dams: A Case Study in Lixi", *China. Water*, Vol. 12, No. 3, p.742, 2020.
12. Chakraborty, D. and Choudhury, D., "Seismic Behavior of Tailings Dam Using FLAC super (3D)", *American Society of Civil Engineers*, Vol. 9, pp. 3138–3147, Texas, 2011.
13. Barrero, A. R., Taiebat, M. and Lizcano, A., "Application of an Advanced Constitutive Model in Nonlinear Dynamic Analysis of Tailings Dam", *68th Canadian Geotechnical Conference*, Sept, pp. 20-23, 2015.
14. Chundi, S., Baolin, X. And Wei, W., "Analysis on Seismic Dynamic Response and Liquefaction Area of Tailings Dam", *International Journal of Computer Applications in Technology*, Vol. 57, No. 2, pp.183-191, 2018.
15. Vargas, C. O., "Analysis and Seismic Design of Tailings Dams and Liquefaction Assessment", *American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Vol. 7, p. 392, 2019.
16. Garcia Diez, J. L., Gonzalez Galindo, J., "Adjustment of a Numerical Model for Pore Pressure Generation During an Earthquake", *Plos One*, Vol. 14, No. 9, pp.1–24, 2019.
17. Doan, N. P., Park, S. S. and Lee, D. E., "Assessment of Pohang Earthquake - Induced Liquefaction at Youngil - Man Port Using the UBCSAND2 Model", *Applied Sciences*, Vol. 10, No. 16, p.5424. 2020.
18. Ghani Ardakan, Z., Mojtahedzadeh, S. H., Mosleh Arani, A. and Gharibi, Kh., "Using Phytoremediation Techniques to Deal With Environmental Pollution of the Tailings Dam of the Phosphate Mine Esfordi", *The Sixth Conference of the Economic Geological Society Iran*, Zahedan, 2014 (In Persian).
19. Najafi, M. and Yarahmadi Bafghi, A., "Analysis of Sustainability and Environmental Management of Tailings Dam (Case Study: Tailings Dam Esphordi Phosphate Mine Processing Factory)", *5th Iranian Conference on Engineering Geology and Environment*, Tehran, 2007 (In Persian).
20. Sadeghi, N. H., Oliveira, D. V., Correia, M., Azizi-Bondarabadi, H. and Orduña, A., "Seismic Performance of Historical Vaulted Adobe Constructions: A Numerical Case Study From Yazd, Iran*", International Journal of Architectural Heritage*, Vol. 12, No. 5, pp. 879-897, 2018.
21. Azhari, A. and Ozbay, U., "Evaluating the Effect of Earthquakes on Open Pit Mine Slopes", *50th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*, American Rock Mechanics Association, 2016.
22. Khalid, M.S., "Dynamic Analysis of an Upstream Tailings Dam", *Master Thesis*, Lulea University of Technology, Sweden, 2013.
23. Martin, G. R., Finn, W. D. L., and Seed, H. B. "Fundamentals of Liquefaction under Cyclic Loading," *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 101 (GT5)*, Vol. 101, pp. 423 – 438,1975.
24. Byrne, P.M., "A Cyclic Shear-Volume Coupling and Pore Pressure Model for Sand", *2nd International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, pp.47–55. 1991.
25. "Itasca Consulting Group Inc., 2016. FLAC2D – Fast Lagrangian Analysis of Continua in 2 Dimensions. V7.0.411, *User's Manual. ICG*, Minneapolis," 2011.
26. Vargas, O., Ortiz, R. and Flores, F., "Liquefaction Analysis Using Pore Pressure Generation Models During Earthquakes", *Fundamentals to Applications in Geotechnics*, pp. 1057-1064, 2015.
27. Seed, H. B., Idriss, I. M., "Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential*", Journal of Soil Mechanics & Foundations division, ASCE*, Vol. 97, No. 8, pp. 1249-1274, 1971.
28. Booker, J. R., Rahman, M. S. and Seed, H. B., "A Computer Program for the Analysis of Pore Pressure Generation and Dissipation During Cyclic or Earthquake Loading", *Earthquake Engineering Research Center, University of California*, Rep. No.

EERC 76-24,1976.
29. Baziar, M. H., Shahnazari, H. and Sharafi, H., M. H. Baziar, "A Laboratory Study on the Pore Pressure Generation Model for Firouzkooh Silty Sands Using Hollow Torsional Test", *International Journal of Civil Engineering*, Vol. 9, No. 2, pp.126-134, 2011.
30. Zardari, M. A., Mattsson, H., Knutsson, S., Khalid, M. S., Ask, M. V. and Lund, B., "Numerical Analyses of Earthquake Induced Liquefaction and Deformation Behaviour of an Upstream Tailings Dam", *Advances in Materials Science and Engineering*, Vol. 2017, pp. 1-17, 2017.
31. Seed, H. B. and Idriss, I. M., "Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations division*, Vol. 97, No. 9, pp.1249-1273, 1971.
32. Rauch, A. F., "EPOLLS: an Empirical Method for Prediciting Surface Displacements Due to Liquefaction-Induced Lateral Spreading in Earthquakes", *Doctoral dissertation*, Virginia Tech, 1997.
33. Boulanger, R. W., and I. M. Idriss., "CPT and SPT Based Liquefaction Triggering Procedures", *Report No. UCD/CGM-141*, 2014.
34. Villavicencio, G., Breul, P., Bacconnet, C., Fourie, A. and Espinace, R., "Liquefaction Potential of Sand Tailings Dams Evaluated Using a Probabilistic Interpretation of Estimated In-Situ Relative Density", *Journal of Construction*, Vol. 15, No. 2, pp.9-18, 2020.
35. Peshandi, H., Dehghani, A. and Ansari, A., "Design of Tailings Dam Esfordi Phosphate Mine", *M.Sc thesis*, Yazd University, 2006 (In Persian).
36. Zhan, Z. and Qi, S., "Numerical Study on Dynamic Response of a Horizontal Layered-Structure Rock Slope under a Normally Incident Sv Wave", *Applied Sciences*, Vol. 7, No. 7, p. 716, 2017.
37. Asaadi, A., Sharifipour, M. and Ghorbani, K., "Numerical Simulation of Piles Subjected To Lateral Spreading and Comparison with Shaking Table Results", *Civil Engineering Infrastructures Journal*, Vol. 50, No. 2, pp. 277-292, 2017.
38. Azhari, A., Yarahmadi, A. and Faramarzi, L., "Determination of Parameters and Dynamic Analysis of Rock Slope Stability (Case study: Tectonic Blocks 1 and 2 of Choghart Mine", *M.Sc thesis*, Yazd University, 2010 (In Persian).
39. Wang, T., He, Y., Zhao, X. and Wang, S., "Dynamic Stability Analysis of the Laizigou Phosphogypsum Tailings Pond", *53rd US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*, American Rock Mechanics Association, 2019.
40. Beaty, M. H. and Perlea, V. G., "Several Observations on Advanced Analyses with Liquefiable Materials", *In Proceedings of the 31st Annual USSD Conference and 21st Conference on Century Dam Design-Advances and Adaptations*, San Diego, California, pp. 1369-1397, 2011.