دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست

پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی عمران – زلزله

بهینه‌سازی شکل سدهای بتنی وزنی برای بارگذاری شبه‌دینامیکی با استفاده از برنامه‌نویسی ژنتیک و الگوریتم‌های بهینه‌یابی تکاملی

توسط:

محسن ستاری

استاد راهنما:

دکتر عبدالحسین بغلانی

استاد مشاور:

دکتر علی جوهری

بهمن ۱۳۹۱

بسم الله الرحمن الرحیم

تقدیم به:

محبوبم مادر

،

عزیزم پدر

و

تمام آنانی که ز ژرفای وجودم

دوستشان می دارم.

سپاسگزاری

اینک که به یاری یکتای بی همتا این مجموعه به پایان رسیده است بر من واجب است که از زحمات خالصانه و بی دریغ استاد عزیز و محترم **جناب آقای دکتر بغلانی** به خاطر راهنمایی های ارزنده شان در زمینه انتخاب موضوع، پیشبرد تحقیق و تدوین پایان نامه سپاسگزاری نمایم. همچنین از **جناب آقای دکتر جوهری** که در سمت استاد مشاور با راهنمایی های ارزندهٔ خود سعی در پیشرفت و کمک به اینجانب برای هرچه بهتر شدن تدوین پایان نامه نمودند، کمال تشکر را دارم. از سایر اساتید که در طول دوره از حضورشان بهره گرفتم صمیمانه قدردانی نموده و توفیق روزافزون آنها را از یگانه ی عالم هستی خواهانم.

شایسته ذکر است که از کمک های بی دریغ و خالصانه دوست عزیزم **مهندس محمدهادی مکی آبادی** در زمینه الگوریتم های بهینه یابی بکار گرفته شده در این تحقیق، صمیمانه و از عمق وجود سپاسگزاری نمایم.

چکیده

بهینه‌سازی شکل سدهای بتنی وزنی برای بارگذاری شبه‌دینامیکی با استفاده از برنامه‌نویسی ژنتیک و الگوریتم‌های بهینه‌یابی تکاملی

به وسیله:

محسن ستاری

سد بتنی وزنی عبارت است از سازه‌ای سنگین، متشکل از بتن یا مصالح بنایی که در عرض رودخانه به منظور افزایش حجم و ارتفاع آب بالادست ساخته شده و شکل و طراحی آن بایستی به گونه‌ای باشد که در مقابل کلیه نیروهای وارده پایدار باشد. از آنجایی که وزن سد بتنی وزنی تاثیر بسیار زیادی بر هزینه‌های طراحی، ساخت، بهره‌برداری و همچنین شکست احتمالی دارد، یافتن وزن بهینه برای آن، همواره اصلی‌ترین موضوع مورد توجه طراحان بوده است. تعیین طرح بهینه برای این سدها، یک مسئله بهینه‌سازی مقید است که تابع هدف آن را وزن سد تشکیل می‌دهد و قیود آن ارضای شرایط پایداری سد در برابر لغزش، واژگونی و کنترل تنش در بدنه است. در این تحقیق سه مرحله برای رسیدن به مقطع بهینه در نظر گرفته شده است. در مرحله اول مقاطعی از سد بتنی وزنی در نرم افزار CADAM مدلسازی شده و مورد آنالیز شبه‌دینامیکی قرار می‌گیرند. از آنجا که نتایج بدست آمده از نرم‌افزار به صورت گسسته می‌باشد، نمی‌توان از آن به طور مستقیم در الگوریتم های بهینه‌یابی استفاده نمود. بنابراین در مرحله دوم با استفاده از برنامه نویسی ژنتیک (GP) روابطی برای ضرایب اطمینان در برابر لغزش، واژگونی و تنش بدست می‌آید. در مرحله سوم با استفاده از سه الگوریتم بهینه یابی مختلف، مقطع بهینه سد که ضوابط طراحی را نیز ارضا می‌کند، بدست آمده و نتایج با هم مقایسه می‌شوند. با استفاده از روش عنوان شده در این پایان‌نامه مقطع دو سد بتنی وزنی به عنوان مطالعات موردی بهینه‌یابی شده‌اند. نتایج بهینه‌یابی کاهش قابل ملاحظه‌ی در حجم بتن‌ریزی را نشان می‌داد که این امر کاهش هزینه‌های ساخت و شکست احتمالی را در پی خواهد داشت.

کلید واژه: سدهای بتنی وزنی، برنامه‌نویسی ژنتیک، بهینه‌سازی، الگوریتم‌های تکاملی، آنالیز شبه‌دینامیکی.

فهرست مطالب

عنوان صفحه

فهرست جدول‌ها ..... د
فهرست شکل‌ها ..... ه
فهرست نشانه‌های اختصاری ..... ط
فهرست کلمات اختصاری ..... م

فصل ۱- مقدمه ۱
۱-۱- پیشگفتار ۲
۱-۲- هدف از انجام تحقیق ۲
۱-۳- روش انجام پایان نامه ۳
۱-۴- ساختار پایان نامه ۳

فصل ۲- پیشینه تحقیق ۴
۲-۱- مقدمه ۵
۲-۲- تحقیقات انجام گرفته ۵
۲-۳- نتیجه‌گیری ۱۰

فصل ۳- سدهای بتنی وزنی و ضوابط طراحی آنها ۱۱
۳-۱- مقدمه ۱۲
۳-۲- تاریخچه سدهای وزنی ۱۲
۳-۳- نیروهای موثر در طراحی سد بتنی وزنی ۱۴
۳-۳-۱- نیروی وزن سد ۱۵
۳-۳-۲- فشار هیدرواستاتیکی آب ۱۵
۳-۳-۳- فشار رسوبات مخزن ۱۶
۳-۳-۴- فشار بالابرنده زیر پی سد ۱۷
۳-۳-۵- فشار یخ در مناطق سردسیری ۱۷
۳-۳-۶- نیروی حاصل از زلزله ۱۸
۳-۳-۷- فشار هیدرودینامیکی آب ۱۸
۳-۳-۸- نیروی حاصل از امواج ۲۰
۳-۳-۹- فشار باد ۲۲
۳-۳-۱۰- بار ناشی از تغییر دما ۲۲
۳-۴- روش‌های تحلیل سد بتنی وزنی ۲۲

۳-۵- انواع شکست سد بتنی وزنی ۲۳
۳-۶- روشها ی تحلیل لرزه‌ای سد بتنی وزنی ۲۴
۳-۶-۱- تحلیل استاتیکی معادل (شبه‌استاتیکی) ۲۴
۳-۶-۲- تحلیل دینامیکی ۲۵
۳-۶-۲-۱- روش پاسخ طیفی (شبه‌دینامیکی) ۲۵
۳-۶-۳- صحتسنج ی روش آنالیز شبه‌دینامیکی برای سدهای بتنی وزنی ۳۳
۳-۷- بررسی تنش‌ها در سد بتنی وزنی ۳۶
۳-۷-۱- محاسبه تنش براساس مود اول ۳۶
۳-۷-۲- محاسبه تنش مودهای ارتعاشی بالاتر ۳۶
۳-۷-۳- تنش اولیه در سد بتنی وزنی قبل از زلزله ۳۷
۳-۸- تاثیر حرکت عمودی زلزله بر سد بتنی وزنی ۳۷
۳-۹- بررسی ایمنی سد بتنی وزنی ۳۸
۳-۹-۱- روشهای بررسی پایداری لغزشی ۳۹
3-1-9-1- روش اصطکاک برشی ۳۹
3-1-9-2- روش تعادل محدود ۴۰
۳-۹-۲- ضریب ایمنی در برابر واژگونی ۴۰
۳-۹-۳- ضریب ایمنی در برابر لغزش ۴۰
۳-۹-۴- بررسی پایداری در برابر فشاربالابرنده ۴۱
۳-۹-۵- بررسی روی‌وی غیرفعال گوه ۴۱

فصل ۴- معرفی نرم‌افزار CADAM ۴۲
۴-۱- نرم‌افزارهای برای تحلیل سد بتنی وزنی ۴۳
۴-۲- معرفی نرم‌افزار CADAM ۴۳
۴-۲-۱- قابلیتها ی نرم‌افزار CADAM ۴۵

فصل ۵- برنامه‌نویسی ژنتیک و الگوریتم‌های بهینه یابی تکاملی ۶۷
۵-۱- برنامه‌نویسی ژنتیک ۶۸
۵-۲- الگوریتم‌های بهینه یابی تکاملی ۷۵
۵-۲-۱- الگوریتم بهینه یابی جامعه پرندگان PSO ۷۶
۵-۲-۲- الگوریتم بهینه یابی کرم شب‌تاب FA ۸۰
۵-۲-۳- الگوریتم بهینه یابی براساس آموزش و یادگیری TLBO ۸۲

فصل ۶- نتایج تحقیق ۸۷
۶-۱- نتایج برخی از تحقیقات انجام گرفته با استفاده از نرم‌افزار CADAM ۸۸
۶-۱-۱- افزایش ارتفاع سد بتنی وزنی با استفاده از نرم‌افزار CADAM ۸۸

۶-۱-۲- بررسی پایداری سدهای بتنی وزنی براساس آنالیز بارگذاری افزایشی ۹۰
۶-۱-۲-۱- تغییر در ارتفاع آب بالادست ۹۱
۶-۱-۲-۲- تغییر در حداکثر شتاب افقی ۹۴
۶-۱-۳- تحلیل قابلیت اطمینان سدهای بتنی وزنی با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو ۹۷
۶-۲- بهینه یابی مقطع سد بتنی وزنی Bluestone و Friant ۱۰۰
۶-۲-۱- بهینه یابی مقطع سد بتنی وزنی Bluestone ۱۰۰
۶-۲-۱-۱- معرفی سد بتنی وزنی Bluestone ۱۰۰
۶-۲-۱-۲- مدلسازی سد بتنی وزنی Bluestone در نرم‌افزار ۱۰۴
۶-۲-۱-۳- استفاده از برنامه‌نویسی ژنتیک برای بدست آوردن روابط طراحی ۱۰۵
۶-۲-۱-۴- بهینه یابی با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی ۱۱۰
۶-۲-۲- بهینه یابی مقطع سد Friant ۱۱۲
۶-۲-۲-۱- معرفی سد بتنی وزنی Friant ۱۱۳
۶-۲-۲-۲- مدلسازی سد بتنی وزنی Friant در نرم‌افزار ۱۱۴
۶-۲-۲-۳- استفاده از برنامه‌نویسی ژنتیک برای بدست آوردن روابط طراحی ۱۱۵
۶-۲-۲-۴- بهینه یابی با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی ۱۱۸
۶-۲-۲-۵- مقایسه نتایج بدست آمده برای مقطع سد بتنی وزنی Friant در این تحقیق با نتایج بدست آمده از سایر محققین در بهینه یابی مقطع آن ۱۲۰

فصل ۷- خلاصه، نتیجه گیری و پیشنهادات ۱۲۱
۷-۱- خلاصه پایان‌نامه ۱۲۲
۷-۲- نتیجه گیری ۱۲۲
۷-۳- پیشنهادات ۱۲۳
فهرست مراجع ۱۲۴

فهرست جدول‌ها

عنوان صفحه

جدول ۳-۱ : زاویه اصطکاک داخلی مواد مختلف ۱۶
جدول ۳-۲ : مقدار α_0 برحسب ناحیه لرزه‌ی [۳۸] ۲۴
جدول ۳-۳ : مقدار φ_0 برحسب ناحیه لرزه‌ی [۳۸] ۲۶
جدول ۳-۴ : مقدار A_p بر حسب $\alpha = 1$ و R_w ۳۲
جدول ۳-۵ : مقدار A_p بر حسب α و R_w مختلف ۳۲
جدول ۴-۱ : - انواع بارگذاری لرزه‌ای [۵۷] ۶۲
جدول ۴-۲ : مقدار ضرایب اطمینان برای حالات مختلف بارگذاری [۲۹] ۶۲
جدول ۴-۳ : ضرایب تنش مجاز برای حالات مختلف بارگذاری [۲۹] ۶۲
جدول ۶-۱ : ضرایب اطمینان سد قبل از افزایش ارتفاع ۸۹
جدول ۶-۲ : ضرایب اطمینان سد بعد از افزایش ارتفاع ۸۹
جدول ۶-۳ : ضرایب اطمینان سد بعد از افزایش ارتفاع و با استفاده از تکنیک پس‌تنیدگی ۹۰
جدول ۶-۴ : مشخصات لرزه‌ای آنالیز شبه‌دینامیکی ۹۱
جدول ۶-۵ : حداقل مجاز ضرایب اطمینان در حالت استاتیکی [۲۹] ۹۴
جدول ۶-۶ : حداقل مجاز ضرایب اطمینان در حالت لرزه‌ای [۲۹] ۹۶
جدول ۶-۷ : تغییر در ضرایب پایداری نسبت به تغییر ارتفاع آب بالادست و شتاب افقی (برحسب درصد) ۹۷
جدول ۶-۸ : مشخصات متغیرهای شبیه سازی مونت کارلو ۹۸
جدول ۶-۹ : نتایج شبیه سازی مونت کارلو ۹۸
جدول ۶-۱۰ : مشخصات فیزیکی سد Bluestone ۱۰۱
جدول ۶-۱۱ : خصوصیات مصالح بدنه و فونداسیون سد Bluestone ۱۰۲
جدول ۶-۱۲ : مشخصات زهکش سد Bluestone ۱۰۳
جدول ۶-۱۳ : مشخصات لرزه‌ای آنالیز شبه‌دینامیکی برای سد Bluestone ۱۰۴
جدول ۶-۱۴ : معیارهای آماری جهت صحت‌سنجی نتایج ۱۰۸
جدول ۶-۱۵ : مقایسه نتایج الگوریتم‌های بهینه یابی برای سد Bluestone ۱۱۱
جدول ۶-۱۶ : مقایسه نتایج مقطع بهینه با نتایج نرم‌افزار CADAM ۱۱۲
جدول ۶-۱۷ : مشخصات مصالح بدنه و فونداسیون سد Friant ۱۱۳
جدول ۶-۱۸ : پارامترهای لرزه‌ای برای آنالیز شبه‌دینامیکی سد Friant ۱۱۴
جدول ۶-۱۹ : معیارهای آماری جهت صحت‌سنجی نتایج ۱۱۶
جدول ۶-۲۰ : مقایسه نتایج الگوریتم‌های بهینه یابی برای سد ۱۱۸
جدول ۶-۲۱ : مقایسه نتایج مقطع بهینه با نتایج نرم‌افزار CADAM ۱۱۹

فهرست شکل‌ها

عنوان صفحه

شکل ۲-۱ : نتایج بهینه‌یابی مقطع سد Pine Flat با استفاده از الگوریتم‌های PSO و GA در تحقیق هاشمی و همکاران [۹] ۷

شکل ۲-۲ : نتایج بهینه‌یابی مقطع سد Friant با استفاده از الگوریتم‌های PSO و GA در تحقیق هاشمی و همکاران [۹] ۸

شکل ۲-۳ : نحوهٔ بارگذاری و متغیر های هندسه‌ای مسئله در تحقیق سلماسی [۲۰] ۸

شکل ۲-۴ : متغیر های هندسی مسئله در تحقیق کیو [۲۴] ۹

شکل ۳-۱ : اولین سطح مقطع مثلثی برای سد وزنی [۲۷] ۱۳

شکل ۳-۲ : نمای از سد کریستال اسپرینگ ۱۳

شکل ۳-۳ : نمای از سد گرند دیکسنس ۱۴

شکل ۳-۴ : زیروی‌های وارد بر سد در آنالیز استاتیکی [۲۹] ۱۵

شکل ۳-۵ : توزیع فشار حاصل از رسوب [۲۹] ۱۶

شکل ۳-۶ : زیروی بالابرنده وارد بر سد[۳۱] ۱۷

شکل ۳-۷ : مقدار ضریب تصحیح کرن و مقایسه آن با مقدار فرمول ۱۹

شکل ۳-۸ : حالت‌های شریب بالادست برای تعیین زاویه θ [۲۹] ۲۰

شکل ۳-۹ : زیروهای حاصل از فشار موج و محل اثر آنها [۳۶] ۲۱

شکل ۳-۱۰ : زیروهای وارد به سد برای آنالیز شبه‌استاتیکی [۲۹] ۲۵

شکل ۳-۱۱ : طیف پاسخ شتاب [۴۱] ۲۶

شکل ۳-۱۲ : زیروهای وارد به سد برای آنالیز شبه‌دینامیکی [۲۹] ۲۷

شکل ۳-۱۳ : نمودار مربوط به $\boldsymbol{\xi_r}$ و $\mathbf{R_r}$ [۲۹ و ۳۰] ۲۸

شکل ۳-۱۴ : نمودار مربوط به $\boldsymbol{\xi_f}$ و $\mathbf{R_f}$ [۲۹ و ۳۰] ۲۹

شکل ۳-۱۵ : مقادیر استاندارد برای تابع فشار هیدرودینامیکی $\mathbf{p}(\hat{\mathbf{y}})$ در حالت مخزن پر بیضی، $\boldsymbol{\alpha = 0.75}$, $\alpha = 0.5$; $\frac{H}{Hs} = 1$ [۲۹ و ۳۰] ۳۰

شکل ۳-۱۶ : a) پریود استاندارد و حالات مودی برای سد بتنی وزنی b) مقایسه مقادیر استاندارد با ویژگی‌های شش سد موجود [۲۹ و ۳۰] ۳۱

شکل ۳-۱۷ : مقادیر استاندارد برای تابع فشار هیدرودینامیکی $\mathbf{p_0}(\hat{\mathbf{y}})$ [۲۹ و ۳۰] ۳۳

شکل ۳-۱۸ : هیستوگرام تنش اصلی بر حسب کیلوپاسکال در حالت مخزن پر با پی منعطف [۴۷] ۳۴

شکل ۳-۱۹ : هیستوگرام تنش اصلی بر حسب کیلوپاسکال در حالت مخزن خالی با پی منعطف [۴۷] ۳۵

شکل ۳-۲۰ : هیستوگرام تنش اصلی بر حسب کیلوپاسکال در حالت مخزن پر با پی صلب [۴۷] ۳۵

شکل ۳-۲۱ : هیستوگرام تنش اصلی بر حسب کیلوپاسکال در حالت مخزن خالی با پی صلب [۴۷] ۳۵

شکل ۳-۲۲ : تاریخ شتاب عمودی زلزله بر فشار هیدرواستاتیکی [۲۹] ۳۸

شکل ۳-۲۳ : ریزوهای در نظر گرفته شده در روش اصطکاک برشی [۲۹] ۳۹
شکل ۳-۲۴ : ریزوهای موثر گوه [۲۹] ۴۱
شکل ۴-۱ : نمونه‌ی از سد مدل شده در نرم‌افزار ۴۴
شکل ۴-۲ : آیکون‌های نرم‌افزار CADAM ۴۵
شکل ۴-۳ : پنجره اطلاعات کلی سد ۴۶
شکل ۴-۴ : پنجره تعیین نقاط هندسی سد ۴۶
شکل ۴-۵ : جهت‌های قراردادی نرم‌افزار [۲۹] ۴۷
شکل ۴-۶ : پنجره ریزوهای اضافی وارد بر بدنه سد ۴۷
شکل ۴-۷ : پنجره خصوصیات مصالح ۴۸
شکل ۴-۸ : نمودار تنش برشی – تنش نرمال [۲۹] ۴۹
شکل ۴-۹ : نمودار ریزو ی تنش برشی- جابجایی و حالت های حداکثری و پسماند[۳] ۴۹
شکل ۴-۱۰ : پنجره مربوط به لایه‌بندی بدنه سد ۵۰
شکل ۴-۱۱ : پنجره مربوط به طول و محل ترک‌ها ۵۰
شکل ۴-۱۲ : ۱، ۲- ترک‌های افقی، ۳، ۴- ترک‌های منحرف، ۵- ترک‌های عمودی پی، ۶- امتداد ناپیوستگی‌های پی در بدنه سد، ۷- لغزش در پی، ۸- شکست کمانشی ناشی از نازکی لایه‌های بستر [۲۹] ۵۱
شکل ۴-۱۳ : پنجره مشخصات مخزن، یخ، رسوبات و مواد شناور ۵۱
شکل ۴-۱۴ : پنجره مشخصات گالری زهکش و آیین‌نامه ۵۲
شکل ۴-۱۵ : نحوه محاسبه فشار بالابرنده در آیین‌نامه‌ها ی مختلف در صورت وجود گالری زهکش a) آیین‌نامه b CDSA) آیین‌نامه‌ها ی USACE و c FERC) آیین‌نامه USBR ۵۲
شکل ۴-۱۶ : نحوه محاسبه فشار بالابرنده در آیین‌نامه FERC در صورت وجود گالری زهکش زیر پایاب a) در حالت بدون ترک b) در حالت وجود ترک [۵۱] ۵۳
شکل ۴-۱۷ : نحوه محاسبه فشار بالابرنده در آیین‌نامه FERC در صورت وجود گالری زهکش بالای پایاب a) در حالت بدون ترک b) در حالت وجود ترک [۵۱] ۵۴
شکل ۴-۱۸ : پنجره محاسبه ضریب زهکش ۵۴
شکل ۴-۱۹ : فشار بالابرنده موقتی در ترک حاصل از زلزله [۲۹] ۵۵
شکل ۴-۲۰ : پنجره اطلاعات مربوط به کابل‌های پیش‌تنیده و پس‌تنیده ۵۶
شکل ۴-۲۱ : شبکه بندی اجزا محدود سیستم سد بتنی وزنی و فونداسیون ۵۶
شکل ۴-۲۲ : افزایش ارتفاع سد ولینگتون از ۱۹ متر به ۳۴ متر [۵۶] ۵۷
شکل ۴-۲۳ : مهارهای پس تنیده در سد سفید رود: (۱) مقطع عرضی معادل (۲) تراز بالایی سد (۳) مقطع A-A [۵۵] ۵۸
شکل ۴-۲۴ : پنجره مربوط به ریزوهای منفرد وارد به بدنه ۵۸
شکل ۴-۲۵ : پنجره دادههای لرزه‌ای برای حالت شبه‌استاتیکی ۵۹
شکل ۴-۲۶ : جهت قراردادی ریزوی زلزله در نرم‌افزار [۲۹] ۵۹
شکل ۴-۲۷ : پنجره دادههای لرزه‌ای برای حالت شبه‌دینامیکی ۶۰
شکل ۴-۲۸ : پنجره چگونگی گسترش ترک در حین آنالیز ۶۱

شکل ۴-۲۹ : پنجره ترکیبات بارگذاری ۶۱
شکل ۴-۳۰ : پنجره پارامترهای ورودی برای تحلیل قابلیت اطمینان ۶۳
شکل ۴-۳۱ : پنجره پارامترهای ورودی برای آنالیز بارگذاری افزایشی ۶۴
شکل ۴-۳۲ : خروجی تصویری نرم‌افزار ۶۵
شکل ۴-۳۳ : خروجی به صورت اکسل نرم‌افزار ۶۵
شکل ۴-۳۴ : نقشههای گرافیکی نرم‌افزار ۶۶
شکل ۵-۱ : جمعیت کوچک توابع چندجمله‌ای در برنامه‌نویسی ژنتیک [۵۹] ۶۹
شکل ۵-۲ : اجزا یک نمودار درختی در برنامه‌نویسی ژنتیک [۶۳] ۶۹
شکل ۵-۳ : معرفی ارتفاع یک گره در نمودار درختی [۶۳] ۷۰
شکل ۵-۴ : یک نمونه درخت تولید شده به روش کامل [۶۳] ۷۱
شکل ۵-۵ : نمونه‌ی از عملگر ادغام در برنامه‌نویسی ژنتیک [۶۷] ۷۳
شکل ۵-۶ : نمونه‌ی از عملگر جهش در برنامه‌نویسی ژنتیک [۶۷] ۷۴
شکل ۵-۷ : فلوچارت برنامه‌نویسی ژنتیک [۶۶] ۷۵
شکل ۵-۸ : اندرکنش بین ذرات و بهترین ذره gbest [۷۳] ۷۷
شکل ۵-۹ : بردار سرعت و موقعیت به روز رسانی در الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات [۷۶] ۷۷
شکل ۵-۱۰ : فلوچارت الگوریتم PSO [۷۷] ۷۹
شکل ۵-۱۱ : شبه کد برنامه‌نویسی برای الگوریتم کرم شب‌تاب [۹۲] ۸۲
شکل ۵-۱۲ : توزیع نمرات کسب شده توسط دانشآموزان دو کلاس مختلف [۹۷] ۸۳
شکل ۵-۱۳ : توزیع نمرات کسب شده توسط دانش‌آموزان [۹۸] ۸۴
شکل ۵-۱۴ : فلوچارت الگوریتم TLBO [۱۰۲] ۸۶
شکل ۶-۱ : مشخصات هندسی سد قبل و بعد از افزایش ارتفاع ۸۹
شکل ۶-۲ : مشخصات هندسی سد پورشوک ۹۱
شکل ۶-۳ : تغییر ضریب پایداری در برابر لغزش برای حالتها ی حداکثر و پسماند در برابر تغییر ارتفاع آب بالادست ۹۲
شکل ۶-۴ : تغییر ضریب پایداری واژگونی نسبت به بالادست(U/S) و پایین‌دست (D/S) در برابر تغییر ارتفاع آب بالادست ۹۳
شکل ۶-۵ : تغییر ضریب پایداری فشار بالابرنده در برابر تغییر ارتفاع آب بالادست ۹۳
شکل ۶-۶ : تغییر ضریب پایداری در برابر لغزش برای حالت های حداکثر و پسماند در برابر تغییر شتاب افقی ۹۵
شکل ۶-۷ : تغییر ضریب پایداری واژگونی نسبت به بالادست (U/S) و پایین‌دست (D/S) در برابر تغییر شتاب افقی ۹۵
شکل ۶-۸ : تغییر ضریب پایداری فشار بالابرنده در برابر تغییر شتاب افقی ۹۶
شکل ۶-۹ : نمودارهای مربوط به ضریب اطمینان لغزش (حداکثر) ۹۹
شکل ۶-۱۰ : نمودارهای مربوط به ضریب اطمینان لغزش (پسماند) ۹۹
شکل ۶-۱۱ : نمودارهای مربوط به ضریب اطمینان واژگونی ۹۹
شکل ۶-۱۲ : نمودارهای مربوط به ضریب اطمینان فشار بالابرنده ۹۹
شکل ۶-۱۳ : مقطع واقعی سد Bluestone [۱۱۰] ۱۰۱

شکل ۶-۱۴ : نمودار پاسخ طیفی سد Bluestone [۱۱۱] ۱۰۳
شکل ۶-۱۵ : نمودار تحلیل خطر هیدرولوژی Bluestone [۱۱۱] ۱۰۴
شکل ۶-۱۶ : متغیرهای هندسی در نظر گرفته شده برای بهینه یابی مقطع سد Bluestone ۱۰۵
شکل ۶-۱۷ : روند همگرایی SSF در GP ۱۰۶
شکل ۶-۱۸ : روند همگرایی OSF در GP ۱۰۷
شکل ۶-۱۹ : روند همگرایی تنش اصلی حداکثر در GP ۱۰۷
شکل ۶-۲۰ : مقایسه نتایج نرم‌افزار و برنامه‌نویسی ژنتیک برای SSF ۱۰۸
شکل ۶-۲۱ : مقایسه نتایج نرم‌افزار و برنامه‌نویسی ژنتیک برای OSF ۱۰۹
شکل ۶-۲۲ : مقایسه نتایج نرم‌افزار و برنامه‌نویسی ژنتیک برای تنش اصلی ۱۰۹
شکل ۶-۲۳ : روند بهینه یابی الگوریتم‌های بهینه یابی و مقایسه نتایج آنها برای سد Bluestone ۱۱۱
شکل ۶-۲۴ : مقطع بهینه سد Bluestone (ابعاد به متر) ۱۱۲
شکل ۶-۲۵ : مقطع واقعی سد بتری وزری Friant [۴۵] ۱۱۳
شکل ۶-۲۶ : نمودار حداکثر شتاب افقی سد Friant [۱۱۷] ۱۱۴
شکل ۶-۲۷ : متغیرهای هندسی در نظر گرفته شده برای بهینه یابی مقطع سد Friant ۱۱۵
شکل ۶-۲۸ : مقایسه نتایج نرم‌افزار و برنامه‌نویسی ژنتیک برای SSF ۱۱۶
شکل ۶-۲۹ : مقایسه نتایج نرم‌افزار و برنامه‌نویسی ژنتیک برای OSF ۱۱۷
شکل ۶-۳۰ : مقایسه نتایج نرم‌افزار و برنامه‌نویسی ژنتیک برای تنش اصلی ۱۱۷
شکل ۶-۳۱ : روند بهینه یابی الگوریتم‌های بهینه یابی و مقایسه نتایج آنها برای سد Friant ۱۱۸
شکل ۶-۳۲ : مقطع بهینه سد Friant (ابعاد به متر) ۱۱۹

فهرست نشانه‌های اختصاری

ارتفاع آب	h
ارتفاع آب بالادست	h_1
ارتفاع آب بالادست	h_m
ارتفاع آب پایین‌دست	h_j
ارتفاع آب پایین‌دست	h_2
ارتفاع رسوب	h_s
ارتفاع سد	H
ارتفاع موج	H_w
استهلاک افزوده شده بر اثر اندرکنش سد، آب و خاصیت جذب کف مخزن	ξ_r
استهلاک افزوده شده بر اثر اندرکنش سد و فونداسیون	ξ_f
بهترین مقدار تابع در الگوریتم کرم شب‌تاب	X_{new}
پارامتر لختی(اینرسی) وزن	ω
پاسخ کیفی براساس مود اساسی	r_1
پاسخ کیفی براساس مودهای بالاتر	r_{sc}
پاسخ کیفی قبل از زلزله	r_{st}
پریود اساسی سد بتنی وزنی، بر روی پی صلب با مخزن پر	$\tilde{T}_r$
پریود اساسی سد بتنی وزنی، بر روی پی صلب با مخزن خالی	T_1
پریود اساسی سد بتنی وزنی، بر روی پی منعطف با مخزن پر	$\tilde{T}_1$
پریود اساسی سد بتنی وزنی، بر روی پی منعطف با مخزن خالی	$\tilde{T}_f$
پریود اصلی ارتعاش آب مخزن	T_1^r
پریود طبیعی سازه	T
پریود مشخص شده با ارتعاش اجباری سد	t_e
پوند بر اینچ	psi
تنش اصلی حداکثر	σ_1
تنش برشی	τ
تنش کلی در پایه سد	σ

تنش نرمال خمشی	σ_{y1}
جذابیت	β_o
جرم تعمیم یافته	$\widetilde{M}_1$
جرم حجمی آب	ρ_w
حداقل تنش نرمال فشاری برای بسیج کردن چسبندگی ظاهری	σ_n^*
حداکثر پاسخ کیفی	r_{max}
حداکثر شتاب زمین	a_g
چسبندگی	C
چسبندگی ظاهری	Ca
دنباله تصادفی یکنواخت	r_3
سرعت باد	V
سرعت موج فشاری در آب	C
شتاب طیفی	Sa
شتاب عمودی زلزله	acc_v
شتاب گرانشی زمین	g
شدت نور اولیه	I_o
ضریب استهلاک بدنه سد	ξ
ضریب استهلاک هیترسیس فونداسیون	η_f
ضریب اصطکاک داخلی رسوب	φ
ضریب بازتاب موج	α
ضریب پواسون	υ
ضریب ترم تصادفی	α
ضریب تصحیح سد شیبدار	K_θ
ضریب تعمییم یافته نیروی زلزله	$\tilde{L}_1$
ضریب جذب نور	γ
ضریب شتاب لرزه‌ای افقی	a_{cc}
ضریب گروه غیرفعال	c_3
ضریب لرزه‌ای	α

ضریب لرزه‌ای پایه	α_o
ضریب موثر حداکثر شتاب زلزله	K
ضریب نیروی هیدرودینامیکی	A_p
طولانی‌ترین فاصله مستقیم عمود بر محور سد تا دورترین فاصله از مخزن	F
عرض تاج سد	a
عرض سد در تراز پی	B
فاصله بین کرم شب‌تاب‌ها	r
فاکتور اندرکنش خاک و فونداسیون	β
فاکتور اهمیت	I
فاکتور آموزش	T_F
فاکتور تصحیح وسترگارد برای تراکم‌پذیری آب	C_c
فاکتور کاهش فشار بالابرنده	ζ
فاکتور ناحیه لرزه‌ای	φ_o
فاکتور وابسته به عمق آب و پریود ارتعاش زلزله	C_e
فشار آب بر عرض واحد سد	F_p
فشار حاصل از امواج	P_w
فشار هیدرودینامیکی	$p(\hat{y})$
فشار هیدرودینامیکی براساس مودهای بالاتر ارتعاش	$p_0(y)$
فشار هیدرودینامیکی در وجه بالادست	$p_1(y)$
فشار هیدرودینامیکی در وجه پایین‌دست	p_{sc}
لنگر وارد بر مرکز ثقل سد	M_p
مدول الاستیسیته مصالح سد	E_s
محل اثر نیروی برآیند	L_{FR}
مساحت صفحه شکست گوه	A_2
مساحت فشاری	A_C
مقاومت فشاری بتن	f_c'
مقاومت کششی بتن	f_t
مقاومت لغزشی	τ_a

مقاومت لغزشی موجود	R
مقدار افزایش ارتفاع توسط باد	S
مقدار بردار سرعت	V_i^k
مود اساسی ارتعاش	$\phi(y)$
مولفه افقی نیروی پس‌تنیدگی	P_{dh}
مولفه عمودی نیروی پس‌تنیدگی	P_v
نسبت استهلاک سد بروی فونداسیون صلب با مخزن خالی	ξ_1
نسبت پریود	R_w
نسبت طولی پریود به علت اثرات پی منعطف	R_f
نسبت طولی پریود به علت اثرات هیدرودینامیکی	R_r
نیروی افقی هیدرودینامیکی	Q_h
نیروی اینرسی ناشی از زلزله	F_e
نیروی بالابرنده	U
نیروی جانبی معادل زلزله با توجه به مود اصلی ارتعاش	$f_1(y)$
نیروی جانبی معادل زلزله با توجه به مودهای بالاتر ارتعاش	$f_{sc}(y)$
نیروی حاصل از رسوب	F_s
نیروی کلی هیدرواستاتیکی	F_{st}
نیروی هیدرودینامیکی اضافه شده، براساس فرمول وسترگارد	$H_d(y)$
نیروی هیدرودینامیکی افقی ناشی از زلزله	H_{du}
وزن اشباع گوه سنگ	W
وزن سد	D
وزن سد در واحد ارتفاع	$W_s(y)$
وزن مخصوص آب	γ_w
وزن مخصوص رسوب اشباع	γ_s
وزن مخصوص مصالح سد	γ_m
یک ذره تصادفی از جمعیت	R_i^k

فهرست کلمات اختصاری

ACO	Ant Colony Optimization
ADINA	Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis
APDL	ANSYS Parametric Design Language
CADAM	Computer Analysis of concrete gravity DAMs
CDF	Cumulative Distribution Function
CDSA	The Canadian Dam Safety Association
CNCOA	Constrained Nonlinear Complex Optimization Algorithm
DBE	Design Base Earthquake
EACD-3D	Three-Dimensional Earthquake Analysis of Concrete Dams
EAGD-84	Earthquake Analysis of Concrete Gravity Dams
EA	Evolutionary Algorithm
ESO	Evolutionary Structural Optimization
FA	Firefly Algorithm
FERC	Federal Energy Regulatory Commission
GA	Genetic Algorithm
GP	Genetic Programming
GRG	Generalized Reduced Gradient
GSA	Gravitational Search Algorithm
HMO	Hybrid Metaheuristic Optimization
HPGA	Horizontal Peak Ground Acceleration
ICOLD	International Commission on Large Dams
IFF	Imminent Failure Flood
MA	Maximum Error
MAE	Mean Absolute Error
MCE	Maximum Credible Earthquake
OBE	Operating Basic Earthquake
OSF	Overturning Safety Factor
PDF	Probability Distribution Function
PGA	Peak Ground Acceleration
PMF	Probable Maximum Flood
PSO	Particle Swarm Optimization
PSOPS	Particle Swarm Optimization with Passive Congregation
SA	Simulated Annealing
SQP	Sequential Quadratic Programming
SRSS	Square Root of the Sum of Square
SSF	Sliding Safety Factor
TLBO	Teaching-Learning-Based Optimization
USACE	The United States Army Corps of Engineers

USBR	U.S. Bureau of Reclamation
USF	Uplifting Safety Factor
VPGA	Vertical Peak Ground Acceleration
WLS-SVM	Weighted Least Squares Support Vector Machine

فصل ۱ -مقدمه