بسم الله الرحمن الرحیم

پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران

دانشکده مهندسی عمران

رساله دوره دکتری، گرایش ژئوتکنیک

بررسی آزمایشگاهی و عددی رفتار لرزه ای سدهای سنگریزه ای با هسته بتن آسفالتی

دانشجو: سیامک فیضی خانکندی

اساتید راهنما : آقایان دکترعلی اصغر میرقاسمی و عباس قلندرزاده

استاد مشاور : پروفسور هوگ

پاییز ۱۳۸۷

Islamic Republic of Iran

University College of engineering, university of Tehran
Department of civil engineering

Title of thesis

Numerical and Experimental investigation of dynamic behavior of Asphaltic concrete core rockfill dams

By: Siamak Feizi-Khankandi

Supervisor(s): Ali Asghar Mirghasemi, Abbas Ghalandarzadeh
Advisor: Kaare Hoeg

Fall 2008

تشکر و قدردانی

از زحمات اساتید ارجمندم جناب آقای دکتر میرقاسمی و جناب آقای دکترقلندرزاده ونیزآقای پروفسور هوگ که در طول دوره تحصیلیم زحمات فراوانی کشیده اند سپاسگزارم.

انجام این رساله دکترا با حمایت های مالی شرکت مدیریت منابع آب ایران، شرکت مشاور مهاب قدس و شرکت Kolo-Veidekke نروژ صورت گرفت که جای تشکر و قدردانی فراوان دارد.

حمایت جناب آقای دکتر نورزاد در تمامی مراحل انجام و تکمیل رساله جای سپاس و تشکر فراوان دارد.

از جناب آقای دکتر قانونی که کمک فراوانی را درپیشبرد مراحل درسی و کاری برای اینجانب انجام داده اند صمیمانه سپاسگزارم. همچنین از زحمات آقای مهندس افسری راد که در نروژ کمک فراوانی در پیشبرد پروژه داشتند و نیز کلیه پرسنل آزمایشگاه آسفالت Kolo-Veidekke و شرکت NGI و نیز آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه تهران علی الخصوص آقای مهندس میردامادی قدردانی می شود.

تقدیم به:

پدر و مادر فداکارم که در تمام لحظات زندگی پشتیبان بزرگ و امید دهنده به آینده برایم بوده و نیز برادران عزیزم بابک، اتابک و سهیل که همیشه یار و یاور من در لحظات سخت بودند.

توجه: مطالب این رساله به صورت فصل به فصل تنظیم و شماره گذاری شـده اسـت و شماره شکلها در فصول مختلف بر اساس شماره آن فصل است.

فهرست مطالب

فصل اول	
۱- مقدمه	۱۲
۱-۱- عنصر آب بند سدهای خاکی و سنگریزه ای	۱۲
۱-۲- ویژگیهای بتن آسفالتی از دیدگاه سد سازی	۱۳
۲- مشخصات فنی بتن آسفالتی	۱۴
۲-۱- مصالح شامل درشت دانه ها و ریزدانه ها	۱۴
۲-۲- قیر	۱۴
۳- روشهای ساخت هسته بتن آسفالتی و تاثیرات آن	۱۷
۳-۱- روش BMM (Bituminous Mastic Between Forms)	۱۸
۳-۲- روش CMC (Cyclopean Mortar Core)	۱۸
۳-۳- روش CBC (Cyclopean Bitumen Core)	۱۸
۳-۴- روش FACC (Flowable Asphalt Concrete Core)	۱۹
۳-۵- روش DACC (Dense Asphalt Concrete Core)	۱۹
۳-۵-۱- بخش اول : هسته	۲۰
۳-۵-۱-۱- توصیف نمودار فولر و کاربرد آن در توزیع دانه بندی بتن آسفالتی	۲۰
۳-۵-۲- بخش دوم : لایه انتقالی بالادست	۲۲
۳-۵-۳- بخش سوم : ناحیه انتقالی پایین دست	۲۲
۳-۵-۴- ابزار و روش ساخت هسته های بتن آسفالتی متراکم	۲۲
۴- توجیه انجام تحقیقات جدید	۲۴
۵- مرور تحقیقات گذشته	۲۶
۵-۱- آزمایشهای سیکلی و استاتیک	۲۷
۵-۲- آزمایشهای کششی و خمشی	۴۱
۵-۳- بررسی اثرات مقدار قیر در مخلوط بتن آسفالتی	۴۷
۵-۴- پژوهشهای عددی	۴۹
۶- سدهای ساخته شده و ارائه یک سری نتایج کلی از پاسخ سد	۵۱
۶- ۱- بررسی مزایای هسته بتن آسفالتی در برابر رویه بتنی	۵۲
۷- فهرست مراجع	۵۶

فصل دوم	
۱-مقدمه	۶۰
۲- بررسی تئوری های مورد استفاده	۶۱
۲-۱- روش تفاضل محدود	۶۱
۲-۲- روش تفاضل محدود صریح (Explicit Finite Difference Method)	۶۲
۳- بررسی روشهای مختلف تحلیل سدهای خاکی و سنگریزه ای	۶۲
۳-۱- تحلیل شبه استاتیکی	۶۳
۳-۲- روش مبتنی بر رفتار ویسکو الاستیک(Visco Elastic) سدهای خاکی	۶۳
۳-۳- تحلیل دینامیکی واقعی	۶۳
۳-۳-۱- مبانی تحلیل دینامیکی سدهای خاکی و سنگریزه ای	۶۴
۴- سابقه تحلیل دینامیکی سدهای خاکی با هسته آسفالتی	۶۵
۴-۱- آنالیز والستاد (۱۹۹۱)	۶۶
۴-۲- تحلیل گاردیل (۱۹۹۹)	۶۷
۴-۳- تحلیل میتجز و جونز (۱۹۹۹)	۶۷
۴-۴- پژوهشهای انجام گرفته در داخل کشور	۶۷
۵- مدل سازی	۷۰
۵-۱- نرم افزار مورداستفاده	۷۰
۵-۲- مدل سازی هندسی	۷۲
۵-۳- مدلهای رفتاری مورد استفاده	۷۲
۵-۴- شرح مراحل ساخت و بارگذاری (بخش استاتیکی)	۷۴
۵-۴- ۱- شرایط اولیه پی آبرفتی	۷۵
۵-۵- شرح مرحله بارگذاری دینامیکی	۷۵
۶- ارائه نتایج بدست آمده از انجام تحلیل ها و بحث پیرامون آن	۷۷
۶- ۱- بررسی رفتار سد در مرحله پایان ساخت (E.O.C)	۷۷
۶-۲- بررسی رفتار سد در مرحله آبگیری و پس از آن	۷۸
۶-۳- بررسی رفتار سد در برابر زلزله	۷۹
۶-۴- انجام تحلیل های بر اساس تبدیلات فوریه	۸۲
۶-۵- بررسی پدیده قوس زدگی در سدهای با هسته بتن آسفالتی	۸۳
۷- نتیجه گیری تحلیل های عددی اولیه	۸۳
۸- فهرست مراجع	۸۵

فصل سوم	
۱- مقدمه	۱۲۰
۲- معرفی آزمایشها	۱۲۱
۲-۱- آزمایشهای سه محوری	۱۲۱
۴- متدولوژی انجام آزمایشها	۱۲۳
۴-۱- آزمایشهای سه محوری سیکلیک	۱۲۳
۵- فهرست مراجع	۱۲۴
فصل چهارم	
۱-مقدمه	۱۲۶
۲- بررسی اثرات مقدار قیر در مخلوط بتن آسفالتی	۱۲۶
۳- طرز تهیه نمونه ها ی کوچک مقیاس برای تعیین درصد قیر بهینه	۱۲۷
۳-۱- طرز تهیه نمونه های سه محوری	۱۲۷
٤-آزمایشهای سه محوری مونوتونیک	۱۲۹
۴-۱- ارائه نتایج آزمایشهای سه محوری مونوتونیک و بحث و نتیجه گیری	۱۲۹
۵- آزمایشهای سه محوری سیکلیک	۱۳۲
۵-۱- رفتار تنش-کرنش مصالح بتن آسفالتی تحت بارهای سیکلیک	۱۳۲
۵-۱-۱- مدل های خطی معادل	۱۳۳
۵-۱-۲-مدل های غیر خطی سیکلی	۱۳۴
۵-۱-۳-مدل های رفتاری پیشرفته	۱۳۵
۵-۲- برنامه ریزی آزمایشهای سه محوری سیکلیک	۱۳۵
۵-۳- تعریف شرایط بارگذاری	۱۳۶
۵-۴- ارائه نتایج	۱۳۸
۵-۴-۱- بررسی تاثیر درجه حرارت و فشار همه جا نبه در شرایط همسان	۱۴۰
۵-۴-۲- بررسی کمی پارامترهای دینامیکی	۱۴۱
۵-۴-۳ – بررسی دقیق تر پارامترهای مختلف بر خواص دینامیکی مصالح آسفالتی	۱۴۴
۵-۴-۳-۱- بررسی اثرات ناهمسانی و درجه حرارت	۱۴۴
۵-۴-۳-۲- بررسی اثرات تنش همه جانبه	۱۴۴
۵-۴-۳-۳- بررسی تاثیر شکل منحنی های هیسترزیس	۱۴۵
۵-۴-۳-۴- بررسی تاثیر تعداد سیکل های بارگذاری	۱۴۵
۵-۴-۳-۵- بررسی تغییرات مقادیر میرایی	۱۴۵
۶- بررسی رفتار بعد از بارگذاری سیکلیک (Post-cyclic behavior)	۱۴۶
۷- نتیجه گیری بخش آزمایشگاهی	۱۴۷

فصل پنجم	
۱-مقدمه	۱۷۹
۲- مدل سازی	۱۷۹
۳- استخراج پارامترهای مورد نیاز برنامه	۱۷۹
۴- انجام تحلیل های خطی و غیر خطی	۱۸۰
۵- ارائه نتایج بدست آمده از انجام تحلیل ها و بحث پیرامون آن	۱۸۱
۶- نتیجه گیری بخش تحلیل های نهایی عددی	۱۸۷
۷- فهرست مراجع	۱۸۸
فصل ششم	
۱- مقدمه	۱۹۰
۲- معرفی آزمایشهای میزلرزه در محیط 1g	۱۹۰
۳- آزمایش‌های مدل فیزیکی با استفاده از میزلرزه	۱۹۱
۴- طراحی مدل	۱۹۱
۵- برخی از مشاهدات آزمایش شماره ۲	۱۹۵
۶- مدل سازی	۱۹۸
۶-۱- مدل سازی هندسی	۱۹۸
۶-۲- شرح مراحل ساخت و بارگذاری (بخش استاتیکی)	۲۰۰
۶-۳- شرح مرحله بارگذاری دینامیکی	۲۰۱
۷- ارائه نتایج بدست آمده از انجام تحلیل ها و بحث پیرامون آن	۲۰۲
۷-۱- نتایج تحلیل برای طیف کوبه	۲۰۲
۷-۱-۱- مقایسه نتایج تحلیل عددی با نتایج آزمایش(طیف کوبه)	۲۰۴
۷-۲- نتایج تحلیل برای طیف منجیل	۲۰۹
۷-۲-۱- مقایسه نتایج تحلیل عددی با نتایج آزمایش(طیف منجیل)	۲۱۰
۷-۳- نتایج تحلیل برای طیف سینوسی استاندارد	۲۱۵
۷-۳-۱- مقایسه نتایج تحلیل عددی با نتایج آزمایش(طیف سینوسی استاندارد)	۲۱۶
۸- فهرست مراجع	۲۲۰
فصل هفتم	
نتیجه گیری نهایی	۲۲۱

فهرست اشکال و جداول

شکل ۱- ۱- تغییرات در مقاومت کششی بر حسب زمان و درجه حرارت	۱۷
شکل ۱- ۲- اجزای المان ساندویچی	۱۹
شکل ۱- ۳- طرح دانه بندی فولر و توان ۰٫۴۵	۲۱
شکل ۱-۴- دستگاه اجرای هسته بتن آسفالتی	۲۳
شکل ۱- ۵- دستگاه ابداعی Breth و Schwab و نتایج آن	۲۸
شکل ۱- ۶- نتایج کار Ohne و تعریف کرنش جاری شدن	۳۰
شکل ۱- ۷- نتایج ارائه شده توسط Wang	۳۲
شکل ۱- ۸- نتایج ارائه شده توسط Wang در ارتباط با مساله خزش، تنش همه جانبه ۵۰۰ کیلوپاسکال	۳۳
شکل ۱- ۹- نتایج ارائه شده توسط Wang در ارتباط با مساله خزش، تنش همه جانبه ۱۰۰۰ کیلوپاسکال	۳۳
شکل ۱- ۱۰- نتایج ارائه شده توسط Wang ، انجام آزمایشها با هزاران سیکل، تنش همه جانبه ۴۰۰ کیلوپاسکال	۳۴
شکل ۱- ۱۱- منحنی تنش-کرنش حاصل از آزمایش سه محوری استاتیک	۳۶
شکل ۱- ۱۲- تغییرات تغییرمکان قائم در زمان اعمال بار سیکلی	۳۷
شکل ۱- ۱۳- ابعاد مدل شده سد برای انجام آزمایش	۳۸
شکل ۱- ۱۴- ابزار بندی مدل	۳۸
شکل ۱- ۱۵- شمایی از حرکت ورودی در یکی از تستها	۳۹
شکل ۱- ۱۶- مقایسه پاسخ بارگذاری در تاج و پایه سد	۳۹
شکل ۱- ۱۷- نتایج کارهای Tereda و Daicho	۴۲
شکل ۱- ۱۸- نتایج کارهای Kawashima	۴۳
شکل ۱- ۱۹- نتایج کارهای Ishi و Kamajo	۴۴
شکل ۱- ۲۰- روابط میان G-γ و میرایی	۴۵
شکل ۱- ۲۱- مقایسه بین Superflex-Phalt و آسفالت معمولی	۴۷
شکل ۱- ۲۲- درجه اتساع برحسب مقدار قیر	۴۸
شکل ۱- ۲۳- آماده سازی بستر (استفاده از ماستیک داغ قبل از ساخت هسته)	۵۴
شکل ۱- ۲۴- ماشین آلات مورد استفاده و شمای کلی از محل ساخت هسته	۵۴
شکل ۱- ۲۵- قالب بندی برای ساخت هسته	۵۵
شکل ۱- ۲۶- بارگیری و دپوی مصالح	۵۵
شکل ۲-۱- چرخه اصلی انجام محاسبات به روش تفاضل محدود صریح	۸۷

شکل۲-۲- دستگاه بزرگ مقیاس NGI	۸۷
شکل ۲- ۳- مقایسه تغییر مکان های قائم و افقی در زمان مخزن پر در سد استورواتن	۸۸
شکل ۲- ۴- وابستگی مدول برشی و میرایی به سطح کرنش برشی در مورد سنگریزه ها	۸۹
شکل۲- ۵ - شتاب افقی حداکثر برای شتاب پایه افقی	۸۹
شکل ۲- ۶- شتاب افقی حداکثر برای نقاط انتخاب شده (بردارها) و کرنش برشی سیلکی حداکثر در اثر شتاب پایه افقی و عمودی	۹۰
شکل ۲- ۷ - مقایسه کرنش های برشی در هسته و نواحی انتقالی	۹۰
شکل ۲-۸- تاریخچه زمانی زلزله ورودی	۹۱
شکل ۲-۹- تاریخچه زمانی پاسخ سد در منطقه نزدیک تاج	۹۱
شکل۲- ۱۰ - تغییرات مقدار کرنش برشی برای فیلتر و هسته در ارتفاع سد	۹۲
شکل ۲- ۱۱- مقطع سدمدل شده	۹۳
شکل ۲- ۱۲- شبکه المان بندی شده مقطع سد	۹۴
شکل ۲-۱۳- تاریخچه زمانی شتاب زلزله مبنای طرح	۹۵
شکل ۲-۱۴- نمودارهای ارائه شده توسط Ohne	۹۵
شکل۲-۱۵- نشستهای قائم در انتهای ساخت	۹۶
شکل۲-۱۶- تغییرمکان هسته و شافت حین آبگیری (سد گراس دان)	۹۷
شکل۲-۱۷- تغییرمکان نسبی بین هسته و شافت(سد گراس دان)	۹۸
شکل۲-۱۸- تغییرمکان های افقی و قائم اندازه گیری شده درسد فینس ترتال	۹۹
شکل۲-۱۹- تغییر مکانهای افقی در انتهای ساخت	۱۰۰
شکل ۲- ۲۰- نتور تنش قائم در مرحله پایان ساخت	۱۰۱
شکل ۲-۲۱- کنتور تنش افقی در مرحله پایان ساخت	۱۰۲
شکل ۲-۲۲- کنتور تنش برشی در مرحله پایان ساخت شکل ۲- ۲۳- کنتور نشست قائم در مرحله پس از آبگیری	۱۰۳
شکل ۲- ۲۴- کنتور تغییرمکان افقی در مرحله پس از آبگیری	۱۰۴
شکل ۲- ۲۵- کنتور فشار آب حفره ای در مرحله پس از آبگیری	۱۰۵
شکل ۲- ۲۶- کنتور تنش های کل قائم در مرحله پایان آبگیری	۱۰۶
شکل ۲- ۲۷- کنتور تنش های کل افقی در مرحله پایان آبگیری	۱۰۷
شکل ۲- ۲۸- کنتور تنش های موثر قائم در مرحله پایان آبگیری	۱۰۸
شکل۲-۲۹- کنتور تنش های موثر افقی در مرحله پایان آبگیری	۱۰۹
شکل ۲- ۳۰- پاسخ سد در گره نزدیکی تاج	۱۱۰
شکل ۲-۳۱- کنتور نشست قائم در زمان وقوع زلزله	۱۱۱
شکل ۲-۳۲- کنتور تغییرمکان افقی در زمان وقوع زلزله	۱۱۲

شکل ۲-۳۳- کنتور تنش قائم در زمان وقوع زلزله	۱۱۳
شکل ۲- ۳۴- کنتور تنش افقی در زمان وقوع زلزله	۱۱۴
شکل ۲-۳۵- کنتور تنش برشی در زمان وقوع زلزله	۱۱۵
شکل ۲- ۳۶- توزیع مقادیر تنشهای نرمال، افقی و برشی در ارتفاع سد	۱۱۶
شکل ۲- ۳۷- توزیع مقادیرکرنشهای برشی در ارتفاع سد	۱۱۷
شکل ۲-۳۸- تاریخچه زمانی زلزله طرح (بر اساس تبدیل فوریه)	۱۱۷
شکل ۲-۳۹- پاسخ فرکانسی سد به زلزله در نزدیکی تاج	۱۱۸
شکل ۴-۱- نمونه های ساخته شده برای آزمایشهای مارشال	۱۵۰
شکل ۴-۲- منحنی های استاندارد برای تعیین قیر بهینه برای ۱۰ ضربه	۱۵۱
شکل ۴-۳- منحنی های استاندارد برای تعیین قیر بهینه برای ۳۰ ضربه	۱۵۲
شکل۴-۴- شمایی از مولد و چکش تراکم برای ساخت نمونه های بتن آسفالتی	۱۵۳
شکل ۴-۵- نمونه بتن آسفالتی برای انجام آزمایشها	۱۵۳
شکل ۴-۶- منحنی تنش-کرنش برای روشهای مختلف تراکم مصالح بتن آسفالتی	۱۵۴
شکل ۴-۷- منحنی کرنش حجمی-کرنش محوری برای روشهای مختلف تراکم مصالح بتن آسفالتی	۱۵۴
شکل ۴-۸- شکل تغییر یافته بتن آسفالتی پس از آزمایش مونوتونیک	۱۵۵
شکل ۴-۹- رفتار تنش- کرنش نمونه تحت فشار همه جانبه ۲۵۰ کیلوپاسکال	۱۵۵
شکل ۴-۱۰- رفتار تنش- کرنش نمونه تحت فشار همه جانبه ۵۰۰ کیلوپاسکال	۱۵۶
شکل ۴-۱۱- رفتار تنش- کرنش نمونه تحت فشار همه جانبه ۱۰۰۰ کیلوپاسکال	۱۵۶
شکل ۴-۱۲- رفتار تنش- کرنش نمونه تحت فشار همه جانبه های مختلف	۱۵۷
شکل ۴-۱۳- رابطه کرنش حجمی- کرنش محوری نمونه تحت فشار همه جانبه ۲۵۰ کیلوپاسکال	۱۵۷
شکل ۴-۱۴- رابطه کرنش حجمی- کرنش محوری نمونه تحت فشار همه جانبه ۵۰۰ کیلوپاسکال	۱۵۸
شکل ۴-۱۵- رابطه کرنش حجمی- کرنش محوری نمونه تحت فشار همه جانبه ۱۰۰۰ کیلوپاسکال	۱۵۸
شکل ۴-۱۶- رابطه کرنش حجمی- کرنش محوری نمونه تحت فشار همه جانبه های مختلف	۱۵۹
شکل ۴-۱۷- منحنی هیسترزیس ارائه شده توسط انه برای مصالح بتن آسفالتی	۱۵۹
شکل ۴-۱۸- نمودارهای $G-\gamma$ و $D-\gamma$ ارائه شده توسط انه برای مصالح بتن آسفالتی	۱۶۰
شکل ۴- ۱۹-نمایی از دستگاه سه محوری سیکلیک موسسه □□□	۱۶۱
شکل ۴- ۲۰- نمودار تنشهای تفاضلی بر حسب زمان بارگذاری (بارگذاری دو طرفه)	۱۶۲
شکل ۴- ۲۱- نمودار تنشهای تفاضلی بر حسب زمان بارگذاری (بارگذاری یک طرفه)	۱۶۲

شکل ۴-۲۲- الگوی تعیین تنش های برشی در صفحه ۴۵ درجه در سطح مقطعی از یک سد	۱۶۳
شکل۴-۲۳- منحنی هیسترزیس برای $\sigma_3 = 250KPa, T = 5^\circ C, K_c = 1.0$	۱۶۳
شکل۴-۲۴- منحنی هیسترزیس برای $\sigma_3 = 250KPa, T = 18^\circ C, K_c = 1.0$	۱۶۴
شکل۴-۲۵- منحنی هیسترزیس برای $\sigma_3 = 85KPa, T = 5^\circ C, K_c = 1.0$	۱۶۴
شکل۴-۲۶- منحنی هیسترزیس برای $\sigma_3 = 85KPa, T = 18^\circ C, K_c = 1.0$	۱۶۵
شکل۴-۲۷- منحنی هیسترزیس برای $\sigma_3 = 500KPa, T = 5^\circ C, K_c = 2.0$	۱۶۵
شکل۴-۲۸- منحنی هیسترزیس برای $\sigma_3 = 250KPa, T = 5^\circ C, K_c = 2.0$	۱۶۶
شکل۴-۲۹- منحنی هیسترزیس برای $\sigma_3 = 85KPa, T = 5^\circ C, K_c = 2.0$	۱۶۶
شکل۴-۳۰- منحنی هیسترزیس برای $\sigma_3 = 500KPa, T = 5^\circ C, K_c = 3.0$	۱۶۷
شکل ۴-۳۱- منحنی هیسترزیس برای $\sigma_3 = 500KPa, T = 18^\circ C, K_c = 3.0$	۱۶۷
شکل۴-۳۲- منحنی هیسترزیس برای $\sigma_3 = 250KPa, T = 5^\circ C, K_c = 3.0$	۱۶۸
شکل۴-۳۳- منحنی هیسترزیس برای $\sigma_3 = 250KPa, T = 18^\circ C, K_c = 3.0$	۱۶۸
شکل ۴- ۳۴- محدوده کرنش های بدست آمده در سرعت های مختلف بارگذاری	۱۶۹
شکل ۴- ۳۵- برشی از نمونه های بتن آسفالتی پس از آزمایش سیکلی	۱۶۹
شکل ۴-۳۶- تاثیر مقادیر تنش همه جانبه و ناهمسانی برمدول برشی در دماهای مختلف	۱۷۰
شکل ۴-۳۷- مقایسه مدول برشی در حالت های extension و compression در دماهای مختلف	۱۷۱
شکل ۴-۳۸- تاثیر تعداد سیکلهای بارگذاری بر میزان مدول برشی مصالح آسفالتی	۱۷۲
شکل ۴-۳۹- تاثیر مقادیر تنش همه جانبه و ناهمسانی بر میرایی در دماهای مختلف	۱۷۳
شکل ۴- ۴۰- مقایسه نتایج آزمایش مونوتونیک قبل و بعد آزمایش سیکلیک در درجه حرارت ۵	۱۷۴
شکل۴-۴۱- نتایج آزمایش مونوتونیک بعد آزمایش سیکلیک در درجه حرارت ۱۸	۱۷۴
شکل ۱-۵- منحنیهای $G - \gamma$ برای مصالح مختلف مورد استفاده در بدنه سد	۱۸۰
شکل ۵-۲- تاریخچه زمانی شتاب زلزله در نزدیکی تاج سد با روش معادل خطی	۱۸۱
شکل ۵-۳- تاریخچه زمانی شتاب زلزله در نزدیکی تاج سد با روش غیر خطی	۱۸۱
شکل۵-٤ -بلوک های لغزشی برای تحلیل نیومارک	۱۸۲
شکل ۵-۵- مقدار کرنش برشی ایجاد شده در هسته آسفالتی	۱۸۴
شکل ۵-٦- روند تغییر شکل بدنه پس از پایان بارگذاری دینامیکی	۱۸۵
شکل ۵-۷-کنتور تغییر مکان های افقی در بارگذازی زلزله بر حسب متر	۱۸۵
شکل ٦-۱- نقشه مدل آزمایش شده و موقعیت حسگرها (شتاب سنج: ACC - تغییرمکان سنج: LVDT)	۱۹۴
شکل ۶-۲- مقایسه تغییر مکان کلی-زمان برای بدنه سد و تاج هسته آسفالتی	۱۹۶
شکل۶-۳- تصاویر قبل و بعد از اعمال لرزه به مدل	۱۹۷

شکل ٦- ۴- شبکه المان بندی شده مقطع سد	۱۹۹
شکل ٦-۵- تاریخچه شتاب کوبه ژاپن	۲۰۲
شکل ۶-۶- پاسخ سد در گره نزدیکی تاج	۲۰۳
شکل ۶-۷- مقایسه طیف پاسخ شتاب در تاج سد	۲۰۴
شکل ۶-۸- مقایسه طیف پاسخ شتاب در تراز ۳۰ سانتیمتری از کف پی	۲۰۵
شکل ۶-۹- مقایسه طیف پاسخ شتاب در تراز ۱۵ سانتیمتری از کف پی	۲۰۵
شکل ۶-۱۰- مقایسه طیف پاسخ تغییر مکان افقی در تاج سد	۲۰۶
شکل ۶-۱۱- مقایسه طیف پاسخ تغییر مکان افقی در پوسته	۲۰۷
شکل ۶-۱۲- مقایسه طیف پاسخ تغییر مکان قائم در پوسته	۲۰۷
شکل ۶-۱۳- مقایسه طیف پاسخ فشار آب حفره ای در ناحیه انتقالی	۲۰۸
شکل ٦-١٤- تاریخچه شتاب منجیل	۲۰۹
شکل ٦-۱۵- پاسخ سد در گره نزدیکی تاج	۲۱۰
شکل ۶-۱۶- مقایسه طیف پاسخ شتاب در تاج سد	۲۱۱
شکل ۶-۱۷- مقایسه طیف پاسخ شتاب در تراز ۳۰ سانتیمتری از کف پی	۲۱۲
شکل ۶-۱۸- مقایسه طیف پاسخ شتاب در تراز ۱۵ سانتیمتری از کف پی	۲۱۲
شکل ۶-۱۹- مقایسه طیف پاسخ تغییر مکان افقی در تاج سد	۲۱۳
شکل ۶-۲۰- مقایسه طیف پاسخ تغییر مکان افقی در تاج سد	۲۱۳
شکل ۶-۲۱- مقایسه طیف پاسخ تغییر مکان قائم در پوسته	۲۱۴
شکل ۶-۲۲- مقایسه طیف پاسخ فشار آب حفره ای در ناحیه انتقالی	۲۱۴
شکل ٦-۲۳- تاریخچه شتاب سینوسی استاندارد	۲۱۵
شکل ٦-٢٤- پاسخ سد در گره نزدیکی تاج	۲۱۶
شکل ۶-۲۵- مقایسه طیف پاسخ شتاب در تاج سد	۲۱۶
شکل ۶-۲۶- مقایسه طیف پاسخ شتاب در تراز ۳۰ سانتیمتری از کف پی	۲۱۷
شکل ۶-۲۷- مقایسه طیف پاسخ شتاب در تراز ۱۵ سانتیمتری از کف پی	۲۱۷
شکل ۶-۲۸- مقایسه طیف پاسخ تغییر مکان افقی در تاج سد	۲۱۸
شکل ۶-۲۹- مقایسه طیف پاسخ تغییر مکان افقی در پوسته	۲۱۹
شکل ۶-۳۰- مقایسه طیف پاسخ تغییر مکان قائم در پوسته	۲۱۹
شکل ۶-۳۱- مقایسه طیف پاسخ فشار آب حفره ای در ناحیه انتقالی	۲۲۰

جدول ۱-۱ معرفی تعدادی از سدهای با هسته بتن آسفالتی	۱۵
جدول ۱ – ۲- مقایسه خصوصیات آسفالت معمولی و نوع بهبود یافته	۴۷
جدول ۲-۱- مقادیر پارامترهای مصالح سد	۷۴
جدول ۴- ۱- نتایج آزمایشات فشاری سه محوری برای مخلوطهای بتنی آسفالتی مختلف	۱۷۵
جدول ۴ - ۲- وزن لایه های مختلف بر اساس منحنی فولر	۱۷۵
جدول۴- ۳- برنامه ریزی آزمایشهای مونوتونیک	۱۷۶
جدول ۴- ۴-نتایج آزمایشها مونوتونیک	۱۷۶
جدول ۴- ۵- معرفی آزمایشهای سیکلیک	۱۷۷
جدول ۴- ۶- بررسی انواع رفتار مشاهده شده در نمونه های بتن آسفالتی	۱۷۷
جدول ۵-۱- نتایج تحلیل خطی معادل با بلوک لغزشی نیومارک	۱۸۳
جدول ٦-۱- ضرایب مقیاس جهت ایجاد شرایط تشابه بین مدل و سازهٔ واقعی درآزمایشات مدل میدان 1g در حالت λ=۷۵	۱۹۱
جدول ٦-۲- برنامه‌ریزی آزمایشهای مدل میزلرزه	۱۹۵
جدول۶- ۳- پارامترهای مورد استفاده در تحلیل های دینامیکی	۱۹۹

فصل اول

(معرفی کلی سدهای با هسته بتن آسفالتی، مروری بر ادبیات فنی)

۱- مقدمه

به طور کلی از بدو تشکیل تاریخ بشری نیاز به آب و غذا به عنوان ۲ عنصر اساسی، زندگی انسانها را تحت الشعاع خود قرار داده است. برای میل به اهداف کشاورزی، مهار رودخانه ها و در نتیجه فکر احداث موانعی در جلوی آب رودخانه هامورد نظر بشر قرار گرفت. از لحاظ تاریخچه سد سازی، شاید قدیمی ترین سد را در کشور اردن بتوان یافت. سد الکفرا در مصر به ۲۶۰۰ سال پیش از میلاد مسیح (ع) بر می گردد.

از لحاظ کاربردی سدها به سه دسته مخزنی، تنظیمی و انحرافی تقسیم بندی می شوند. اگر دید مصالح را مد نظر قرار دهیم با ۲ نوع سد روبرو هستیم:

الف) سد بتنی ب) سد خاکی و سنگریزه ای.

اگر بخواهیم تا حدی مزایای سد خاکی و سنگریزه ای را بیان کنیم شاید نکات زیر برجسته تر به نظر آید:

- سد خاکی را می توان بر روی پی های ضعیف احداث کرد.
- از مصالح محلی بر اساس موجود بودن در سازه سد استفاده می شود.
- در شرایط طبیعی از سد بتنی ارزان تر تمام می شود.
- احداث سریع
- انعطاف پذیری بیشتری در مقابل نیروهای دینامیکی دارد.

از معایب عمده این سدها می توان به نکات زیر اشاره کرد:

- امکان فرسایش خاک
- عدم امکان ساخت سازه های بتنی در بدنه سد

۱-۱- عنصر آب بند سدهای خاکی و سنگریزه ای

هسته های بتن آسفالتی، در سال ۱۹۴۸ برای اولین بار به عنوان المان آب بند در سدهای سنگریزه ای مورد استفاده قرار گرفت. این نوع هسته، دارای نفوذپذیری بسیار کم، خاصیت انعطاف پذیری بالا است و تراکم پذیری خوبی دارد و امکان ساخت بدون درزه هسته را فراهم می آورد[1]. یکی از بهترین مزایای این نوع هسته ها، عدم تابع بودن ساخت آن نسبت به شرایط آب و هوایی و . . . است. تحقیقات بسیار کمی بر روی این هسته ها و خصوصا رفتار دینامیکی آنها انجام گرفته است. با توجه به اینکه ساخت این نوع سدها در نواحی مرطوب و پرباران نظیر مناطق شمالی و غربی بسیار ساده تر و مشکلات هسته رسی چون درصد رطوبت بهینه و ... را ندارد لزوم تحقیق احساس شد. مناطق شمالی و غربی ایران دارای

پتانسیل لرزه خیزی بالایی هستند و به این دلیل رفتار دینامیکی این نوع سد ها باید به طور کامل بررسی و در صورت داشتن رفتار مناسب در طرح های ملی در نظر گرفته شود.

۱-۲- ویژگیهای بتن آسفالتی از دیدگاه سد سازی[۱] و [۲]

برخی از ویژگیهای بتن آسفالتی که آن را برای استفاده در هسته سد مناسب کرده است به صورت زیر بیان می شود:

۱) رفتار الاستو - پلاستیک بتن آسفالتی به عنوان ماده ساختمانی است که اساس کاربرد هسته های قیری، در سدها می باشد. این خاصیت از ایجاد ترک در هسته در اثر تغییر شکل های بعدی سد، جلوگیری می کند و بنابراین، هسته ای نفوذناپذیر بدست می آید.

۲) هسته بتن آسفالتی به وسیله ساختار خاکی یا سنگی نواحی مجاور هسته در برابر حوادث مکانیکی ناشی از وقایع شدید نظیر زلزله محافظت می شود و ترکهای ناشی از این به علت خاصیت خود التیامی قیر، ترمیم می شود.

۳) مقاومت بتن آسفالتی در برابر فرسایش ناشی از تراوش آب.

۴) حساسیت کم بتن آسفالتی به تغییرات آب و هوا.

۵) اتصال مناسب بتن آسفالتی با مصالح نواحی مجاور آن.

۶) حفظ مقاومت با گذشت زمان و طول عمر زیاد مصالح.

۷) انعطاف پذیری کافی جهت هماهنگی با تغییر شکل خاکریزها بدون ترک خوردگی.

۸) تحمل تغییر شکل های پیش بینی نشده بدنه توسط هسته، به علت خاصیت تغییر شکل پذیری

۲- مشخصات فنی بتن آسفالتی

مصالح سنگی و فیلر در حدود ۹۰ تا ۹۵ درصد وزن و ۸۰ تا ۸۵ درصد حجم بتن آسفالتی را تشکیل می دهند و قیر به عنوان یک ماده چسبنده عمل می کند. بیشتر مقاومت ترکیب بتن آسفالتی از مصالح سنگی سرچشمه می گیرد و بنابراین وقتی بتن آسفالتی به عنوان وسیله ای برای آب بندی در یک سد به کار می رود. شناخت خواص مصالح سنگی بسیار مهم است[۳].

۲-۱- مصالح شامل درشت دانه ها و ریزدانه ها

بزرگترین اندازه دانه هایی که در رویه های بتن آسفالتی به کار می رود ۱/۵ اینچ می باشد. در هسته های بتن آسفالتی، این مقدار را می توان به ۳ اینچ افزایش داد. فیلر شامل ذرات عبوری از الک نمره ۲۰۰ است و دارای هیچ عملکرد ساختمانی نبوده و تنها برای بهبود کارایی ترکیب بتن آسفالتی استفاده می شود.[٤] شکل دانه ها از نظر مهندسی دارای اهمیت می باشد. دانه های گرد، دارای کارایی بیشتری نسبت به زاویه دارها می باشند. بنابراین برای هسته های بتن آسفالتی ایده آل می باشد[٤]. نکته دیگری که باید ذکر شود این مساله است که با توجه به این که عمر مفید یک سازه هیدرولیکی با هسته بتن آسفالتی، تا حد زیادی به توانایی و ترکیب بتن آسفالتی جهت جلوگیری از ایجاد درز بین مصالح سنگی و قیر، بستگی دارد. لذا خواص چسبندگی و جذب قیر توسط مصالح سنگی در طرح اختلاط بتن آسفالتی، اهمیت فراوانی خواهد داشت[٤] .

۲-۲- قیر

قیر به علت داشتن دو خاصیت مهم یعنی غیرقابل نفوذ بودن در برابر آب و چسبنده بودن یکی از پر کاربردترین مصالح می باشد[٥] . در بیشتر سدهایی که تاکنون با هسته بتن آسفالتی ساخته شده است. مقدار قیر اندکی بیشتر از مقدار بهینه ای است که در آزمایش مارشال تعیین شده است. به طور کلی میزان قیر در محدوده ۵/۵ تا٦/٥ درصد وزنی ترکیب بتن آسفالتی می باشد. انتخاب نوع قیر مورد استفاده، به عواملی از جمله شرایط جوی، جنس، دانه بندی مصالح سنگی و نحوه اجرای بتن آسفالتی بستگی دارد. هر اندازه درجه حرارت متوسط سالیانه منطقه بیشتر باشد، باید از قیرهایی با خاصیت کمتر روانی برای ساخت آسفالت استفاده کرد[۳] .

در ادامه ، جدولی از سدهای ساخته شده با هسته آسفالتی آورده میشود:

جدول ۱-۱ معرفی تعدادی از سدهای با هسته بتن آسفالتی[٤]

Name	Country	Height (m)	Crest lenght (m)	Year completed
Kleine Dhuenn	Germany	35	265	1962
Bremge	Germany	20	125	1962
Eberlaste	Austria	28	475	1968
Koedel	Germany	17	90	1969
Legadadi	Etiopia	26	35	1969
Wiehl	Germany	53	360	1971
Meiswinkel	Germany	22	190	1971
Finkenrath	Germany	14	130	1972
Wiehl, Main Outer Dam	Germany	18	255	1972
Baihe	China	25	250	1973
Danghe (1)	China	58	230	1974
Eixendorf	Germany	28	150	1975
Eicherscheid	Germany	18	175	1975
Jiulikeng	China	44	107	1977
Guotaizi	China	21	290	1977
High Island West	Hong Kong	95	720	1977
Los Cristales	Chile	31	190/140	1977
Dachang	China	22	180	1978
High Island East	Hong Kong	105	420	1978
Antrift	Germany	18		1978
Breitenbach	Germany	13	370	1978
Kamigazawa	Japan	14	170	
Buri	Japan	16	173	1979
Finstertal	Austria	100	652	1980
Yangjiatai	China	15	135	1980
Megget	Scotland,UK	56	568	1980
Grosse Dhuenn	Germany	63	400	1980
Vestredal	Norway	32	500	1980
Katlavatn	Norway	35	265	1980
Langavatn	Norway	26	290	1981
Erdouwan	China	30	320	1981
Kurbing	China	23	153	1981
Dhuenn, Outer Dam	Germany	12	115	1981
Sulby	Isle of Man, UK	36	143	1982
Kleine Kinzig	Germany	70	345	1982
Biliuhe (Left Dam)	China	49	288	1983
Biliuhe (Right Dam)	China	33	113	1983
Feldbach	Germany	14	110	1984
Wiebach	Germany	12	98	1985
Shichigashuko	Japan	37	300	1985
Döerpe	Germany	16	118	1986
Lenneper Bach	Germany	11	93	1986
Wupper	Germany	40	280	1986
Riskallvatn	Norway	45	600	1986
Storvatn	Norway	100	1472	1987
Berdalsvatn	Norway	65	465	1988
Borovitza	Bulgaria	76	218	1988
Rottach	Germany	38	190	1989
Styggevatn	Norway	52	880	1990
Feistritzbach	Austria	88	380	1990
Hintermuhr	Austria	40	270	1990

Name	Country	Height (m)	Crest length (m)	Year completed
Queens Valley	Jersey, UK	29	170	1991
Schmalwasser	Germany	76	325	1992
Muscat	Oman	26	110	1993
Danghe(2)	China	74	304	1994
Urar	Norway	40	151	1997
Storglomvatn	Norway	128	830	1997
Holmvatn	Norway	60	396	1997
Hatta	Dubai U.A.E.	45	422	1998
Greater Ceres	South Africa	60	280	1998
Algar	Spain	30	485	1999
Goldistal,Outer Dam	Germany	26	142	1999
Dongtang	China	48	142	2000
Yatang	China	57	407	U.C.
Tuo Li	China			2000
Mora de Rubielos	Spain	34	215	*U.C.
Mao Ping Xi	China	104	1840	*U.C..
Yele	China	125	411	*U.C.
Plovdivtzi	Bulgaria	48	225	*U.C.
Neikovtzi	Bulgaria	43	205	*U.C.
Eyjabakkar	Iceland	26	4100	*U.D.
Köprü	Turky	139	565	*U.D.
Yadenitza	Bulgaria	110	312	*U.D.
Bujagali	Uganda	25	900	*U.C.
Ni'erji	China	40	7000	*U.C.
Majiagou	China	38	264	2001
Meyjaran	Iran	55	180	2003

با نگاه کلی به لیست بالا میتوان نتیجه گیری کرد که کشورهای آلمان، نروژ و چین دارای بیشترین تعداد سد از نوع هسته آسفالتی هستند. یکی از دلایل عمده برای عدم گسترش ساخت این سدها در ایران، نگرانی مشاوران از رفتار این نوع از سدها در برابر زلزله می باشد. به دلیل اینکه اکثر سدهای ساخته شده در منطقه با لرزه خیزی پایین قرار گرفته اند، گزارش های انتشار یافته صرفا در مورد پایان ساخت و آبگیری است. سد میجران در شمال ایران به عنوان اولین نمونه سد با هسته بتن آسفالتی طراحی و ساخته شده است.