فرم شماره۱۴

دانشکده.....

پایان نامه آقای/خانم ..علی جذبی دهکردی.. به شماره دانشجویی ۸۷۷۱۱۰۰۳

..... با عنوان ..آشکارسازی اجسام پرتابی برای سرهای بترکیب.. به

تاریخ .....۹۰/۱۱/۲۰.....و شماره ثبت ..... شماره ..... مورد پذیرش

هیات محترم داوران با رتبه .....عالی..... و نمره .نوزده(۱۹)... قرار گرفت.

کمیته دفاع	نام و نام خانوادگی	امضاء
۱)استاد راهنما و رئیس هیات داوران	علیرضا تاف نور	۹۰/۱۲/۱۴
۲)استاد راهنمای دوم		
۳)استاد مشاور (در صورت وجود)		
۴)داور خارجی	حسن شرکی	
۵)داور داخلی	خلیل نیرومند	
۶) نماینده تحصیلات تکمیلی		

حق چاپ و نشر برای دانشگاه ارومیه محفوظ می باشد.

دانشگاه ارومیّه

دانشکده فنی ومهندسی

گروه مهندسی عمران

پایان نامه برای اخذ درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران– سازه

تأثیر درزهای اجرایی بر رفتار لرزه ای سد های بتنی قوسی

استاد راهنما: دکتر علیرضا مناف پور

داور داخلی: دکتر چنگیز غیرتمند

داور خارجی: دکتر حسین شوکتی

تنظیم و نگارش: علی جنابی دهکردی

اسفند ۱۳۹۰

چکیده

در این پایان نامه یکی از موضوع‌های مهم در بحث مدلسازی تحلیلی سدهای بتنی دو قوسی مورد بررسی دقیق و جامع قرار گرفته است. در سال‌های اخیر بررسی رفتار دقیق ترک خوردگی بدنه سدهای قوسی تحت بارهای دینامیکی مورد توجه محققین قرار گرفته است و به دلیل رشد و گسترش سریع رایانه‌ها و علم مواد، محققین عرصه سدسازی با استفاده همزمان از علم مکانیک شکست و مدلسازی‌های المان محدود توانسته‌اند رفتارهای غیرخطی سدهای قوسی را بیشتر از پیش مورد مطالعه و ارزیابی قرار دهند.

یکی از مهمترین سد های دو قوسی ایران (سد کارون ۴ با ارتفاع ۲۳۰ متر بر روی رود خانه کارون در جنوب غربی ایران) در این پایان‌نامه مورد مطالعه قرار گرفته است. جهت نیل به این مهم ۲ مدل المان محدود در ۸ مرحله مدلسازی و تحلیل گردید. در مدلسازی‌های المان محدود انجام شده هندسه دقیق بدنه، هندسه دقیق درزهای قائم، بارگذاری وزنی مرحله سد، بارگذاری حرارتی زمستان و تابستان، بارگذاری هیدرواستاتیکی و هیدرودینامیکی مخزن و بارگذاری لرزه ای به صورت تاریخچه زمانی در نظر گرفته شده است. فرض شده که بتن موجود در فاصله بین درزهای قائم مجاور در طی آنالیز در محدوده الاستیک خطی باقی می مانند، در حالی که درزهای اجرایی قائم به وسیله یک نوع المان اتصالی خاص که تنشهای کششی کمی را تحمل می‌کند مدل‌سازی شده است.

اثرات رفتار غیرخطی درزهای اجرایی عمودی با استفاده از مدلسازی المان محدود سد و درزهای اجرایی آن و انجام تحلیل غیرخطی مورد بررسی قرار گرفت. مشخص گردید در نظر گرفتن غیرخطیت درزهای اجرایی در تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی غیرخطی می‌تواند تفاوت‌های قابل توجهی در گسترش تنشهای کششی نسبت به تحلیل‌های خطی به وجود می‌آورد. در برخی موارد عدم توانایی مدلهای خطی در پیش‌بینی رفتار سد نشان داده شده است.

واژه های کلیدی: سد دوقوسی، غیرخطیت، درزهای اجرایی، مکانیک شکست، المان محدود.

فهرست مطالب

۱ فصل اول مقدمه ۱

۱-۱ پیشگفتار ۱

۱-۲ اهداف پایاننامه ۲

۱-۳ ساختار تحقیق و فصل بندی پایان نامه ۲

۲ فصل دوم کلیات سد سازی و مروری بر ادبیات فنی ۳

۲-۱ مقدمه ۳

۲-۲ سد سازی ۳

۲-۲-۱ مراحل مطالعات در سد سازی : ۳

۲-۲-۲ انواع سد ها و انتخاب نوع سد ۴

۲-۲-۲-۱ انواع سدها ۵

۲-۲-۲-۲ انتخاب محل سد ۶

۲-۲-۳ سد قوسی تک انحنایی (سد یک قوسی) ۸

۲-۲-۴ سدهای قوسی دو انحنایی ۸

۲-۲-۵ سد قوسی وزنی ۸

۲-۳ درزهای سازه ای ۸

۲-۳-۱ درز انقباض ۸

۲-۳-۲ درز انبساط ۹

۲-۳-۳ درزهای ساختمانی (اجرایی) ۹

۲-۴ کلیدها ۹

۲-۵ تعاریف اولیه سدهای دو قوسی ۹

۲-۶ مکانیک شکست بتن ۱۰

۲-۶-۱ مفاهیم پایه ای شکست و گسیختگی ۱۱

۲-۶-۱-۱ مفاهیم اولیه ۱۱

۲-۶-۱-۲ فرضیه تنش اصلی ۱۱

۲-۶-۱-۳ فرضیه کرنش اصلی ۱۲

۲-۶-۱-۴ فرضیه تنش برشی حداکثر ۱۲

۲-۶-۱-۵ فرضیه انرژی کرنشی ۱۳

۲-۶-۱-۶ فرضیه مور-کلمب ۱۳
۲-۶-۱-۷ فرضیه انرژی کرنشی حداکثر در تغییر شکل برشی ۱۴
۲-۶-۱-۸ فرضیه دراکر- پراگر ۱۵
۲-۶-۲ ترک خوردگی از دیدگاه مکانیک شکست ۱۵
۲-۶-۳ - گسترش ترک خوردگی در مکانیک شکست ۱۶
۲-۶-۳-۱ دیدگاه ترک مجزا ۱۶
۲-۶-۳-۲ دیدگاه ترک پراکنده ۱۶
۲-۷ درزها در سد های قوسی ۱۷
۲-۸ مکانیک شکست در سدهای بتنی: ۲۰
۳ فصل سوم معرفی سد کارون چهار ۲۳
۳-۱ مقدمه ۲۳
۳-۲ موقعیت سد ۲۳
۳-۳ مشخصات رودخانه ۲۴
۳-۴ مشخصات فنی ۲۴
۳-۵ شرایط محیطی ۲۶
۴ فصل چهارم مدلسازی های المان محدود ۲۸
۴-۱ مقدمه ۲۸
۴-۲ مدل هندسی سد کارون چهار ۲۸
۴-۳ مشخصات مصالح ۳۰
۴-۴ بارگذاری ها ۳۰
۴-۴-۱ بار وزن ۳۰
۴-۴-۲ بار آب مخزن ۳۱
۴-۴-۳ بار حرارتی ۳۲
۴-۴-۴ بار زلزله ۳۳
۴-۵ مشخصات المان محدود ۳۴
۴-۶ میرایی دینامیکی ۳۵
۴-۷ رفتار درز ها ۳۶
۴-۸ تداخل درزها با مرز بارگذاری وزنی مرحلهای ۳۷
۴-۹ استفاده از نتایج رفتارنگاری برای اعتبار سنجی مدل تحلیلی ۳۸
۵ فصل پنجم نتایج مدلسازیها ۴۰
۵-۱ مقدمه ۴۰

۵-۲ اطلاعاتِ پیشفرضِ مطالعات ۴۲
۵-۲-۱ بلوک ها ۴۲
۵-۲-۲ نقاط ۴۳
۵-۳ بررسی تنشهای اصلی ۴۴
۵-۴ نتایج تاریخچه زمانی نقاط شاهد ۴۹
۵-۵ تنشهای برشی درزها ۵۱
۵-۶ بازشدگی ها در تحلیلهای استاتیکی ۵۳
۵-۷ بازشدگیها در تحلیلهای دینامیکی ۵۶
۶ فصل ششم خلاصه و نتیجه‌گیری ۵۸
پیوست الف مشخصات زلزله ها
پیوست ب نمایش پوش تنشهای اصلی حداکثر و حداقل

فهرست اشکال

شکل ۲-۱: محدوده تنش در فرضیه کرنش اصلی ۱۲
شکل ۲-۲: محدوده تنش برای فرضیه تنش برشی حداکثر ۱۲
شکل ۲-۳: محدوده تنش برای فرضیه کلمب ۱۳
شکل ۲-۴: محدوده تنش برای فرضیه موهر ۱۴
شکل ۲-۵: محدوده تنش فرضیه انرژی کرنشی حداکثر در تغییر شکل برشی ۱۴
شکل ۲-۶: محدوده تنش برای فرضیه دروکر- پراگر ۱۵
شکل ۲-۷: تفاوت گسیختگی در دیدگاه ترک مجزا به دلیل تفاوت در مش بندی ۱۶
شکل ۲-۸: نمایش پیکربندی المان اتصال داولینگ و هال ۱۸
شکل ۳-۱: نمای تاج سد؛ الف-نقشه توپوگرافی ساختگاه، ب- عکس هوایی ۲۴
شکل ۴-۱: مراحل توسعه بدنه سد در نرم افزار CATIA ۲۹
شکل ۴-۲: مراحل توسعه درزهای سد در نرم افزار CATIA ۲۹
شکل ۴-۳: بیشینه تنش اصلی در انتهای بار وزن، الف- بارگذاری ۱ مرحله ای ب- بارگذاری ۶ مرحله ای ۳۱
شکل ۴-۴: روند بارگذاری وزنی ۶ مرحلهای از سمت چپ به راست ۳۱
شکل ۴-۵: توزیع دمای سطح بالادست در ارتفاع سد برای تابستان و زمستان ۳۳
شکل ۴-۶:نمودار الف-رفتار برشی و ب- رفتار تماس- فشار در درزها ۳۴
شکل ۴-۷: تفاوت بین تعریف صفحه و نواحی گرهای در نرم افزار ABAQUS[43]؛ الف- صفحه؛ ب- نواحی گرهای ۳۶
شکل ۴-۸: انتقال تنش در رفتار اثر متقابل و اتصال صفحه- صفحه نرم افزار ABAQUS[43] ۳۷
شکل ۴-۹: مرز صفحات اتصال در مرز بین بلوک ۰ و بلوک ۱ ..... ۳۸
شکل ۴-۱۰: نمودار تغییرات تغییر مکان در وسط بلوک های ۰، ۹ و ۱۰ برای دو حالت بارگذاری ۱۰۲۱/۱ متر آب مخزن (الف، ب و پ) و ۹۶۹/۹۶ متر آب مخزن (ت، ث و ج) ۳۹
شکل ۵-۱:جانمایی بلوکها ودرزهای اجرایی عمودی سمت راست وچپ سد از نمای بالادست (با دید ۴۵±) ۴۳
شکل ۵-۲: جانمایی نقاط انتخاب شده برای گزارش تاریخچه زمانی پاسخ بر روی بدنه سد ۴۳
شکل ۵-۳: نمایش توزیع پوش تنش اصلی حداکثر ناشی از بارگذاری زلزله فریولی و بار حرارتی تابستان در بدنه سد؛ الف- تحلیل خطی، ب- تحلیلی غیرخطی ۴۴
شکل ۵-۴: نمایش توزیع پوش تنش اصلی حداکثر ناشی از بارگذاری زلزله لندرز و بار حرارتی تابستان در بدنه سد؛ الف- تحلیل خطی، ب- تحلیلی غیرخطی ۴۵
شکل ۵-۵: نمایش تفاوت پوش تنش اصلی حداقل ناشی از بارگذاری زلزله لندرز تحت بار حرارتی تابستان در بدنه سد؛ الف- تحلیل خطی، ب- تحلیلی غیرخطی ۴۶
شکل ۵-۶: نمایش برداری پوش تنش اصلی حداکثر ناشی از بارگذاری زلزله لندرز تحت بار حرارتی تابستان در تحلیل غیرخطی؛ الف-بالادست، ب-پایین دست ۴۷
شکل ۵-۷: بزرگنمایی نواحی مشخص شده در شکل ۵-۶ ..... ۴۷

شکل ۵-۸: نمایش برداری پوش تنشهای اصلی حداکثر در بدنه سد تحت بار لرزه ای فریولی و بار حرارتی تابستان؛ الف- خطی، ب- غیرخطی. ۴۸
شکل ۵-۹: نمایش برداری پوش تنشهای اصلی حداکثر در بدنه سد تحت بار لرزه ای لندرز و بار حرارتی تابستان؛ الف- خطی، ب- غیرخطی. ۴۸
شکل ۵-۱۰: نمودارهای تاریخچه زمانی تغییرات شتاب نقطه N1 برای تحلیل تحت بارگذاری لرزهای فریولی و بار حرارتی تابستان؛ الف- خطی، ب- غیرخطی. ۴۹
شکل ۵-۱۱: نمودارهای تاریخچه زمانی تغییرات شتاب نقطه N2 برای تحلیل تحت بارگذاری لرزهای فریولی و بار حرارتی تابستان؛ الف- خطی، ب- غیرخطی. ۴۹
شکل ۵-۱۲: نمودارهای تاریخچه زمانی تغییرات شتاب نقطه N3 برای تحلیل تحت بار گذاری لرزهای فریولی و بار حرارتی تابستان؛ الف- خطی، ب- غیرخطی. ۵۰
شکل ۵-۱۳نمودارهای تاریخچه زمانی تغییرات شتاب نقطه N4 برای تحلیل تحت بار گذاری لرزهای فریولی و بار حرارتی تابستان؛ الف- خطی، ب- غیرخطی. ۵۰
شکل ۵-۱۴: نمودارهای تاریخچه زمانی تغییرات شتاب نقطه N5 برای تحلیل تحت بار گذاری لرزهای فریولی و بار حرارتی تابستان؛ الف- خطی، ب- غیرخطی. ۵۰
شکل ۵-۱۵: نمودارهای تاریخچه زمانی تغییرمکان نقطه N2 برای تحلیل تحت بارگذاری لرزهای فریولی و بار حرارتی تابستان؛ الف- خطی، ب- غیرخطی. ۵۱
شکل ۵-۱۶: نمودارهای تاریخچه زمانی تغییرمکان نقطه N5 برای تحلیل تحت بار گذاری لرزهای فریولی و بار حرارتی تابستان؛ الف- خطی، ب- غیرخطی. ۵۱
شکل ۵-۱۷نمایش پوش تنش برشی برای مدل استاتیکی تحت بار حرارتی تابستان، بار وزن ۶ مرحله ای و فشار هدرواستاتیکی؛ الف- درز B10-12، ب- درز B9-11، پ- درز B0-1، ت- درز B10-12، ث- درز B9-11، ج- درز B0-1. ۵۲
شکل ۵-۱۸نمایش پوش تنش برشی برای مدل غیرخطی تحت بار زلزله فریولی و بار حرارتی تابستان؛ الف- درز B10-12، ب- درز B9-11، پ- درز B0-1، ت- درز B10-12، ث- درز B9-11، ج- درز B0-1. ۵۲
شکل ۵-۱۹: نمایش ۴۰۰ برابر شده تغییرشکل بدنه سد به همراه نمایش تنش اصلی حداکثر برای ترکیب بار ۱. الف- تحلیل خطی استاتیکی، ب- تحلیل غیرخطی استاتیکی ۵۳
شکل ۵-۲۰: نمایش ۵۰۰ برابر بزرگنمایی شده بدنه سد در شرایط ترکیب بار ۱. ۵۴
شکل ۵-۲۱: نمایش ۴۰۰ برابر شده تغییرشکل بدنه سد به همراه نمایش تنش اصلی حداکثر برای ترکیب بار ۲. الف- تحلیل خطی استاتیکی، ب- تحلیل غیرخطی استاتیکی ۵۵
شکل ۵-۲۲: نمایش ۴۰۰ برابر شده تغییرشکل بدنه سد به همراه نمایش تنش اصلی حداکثر برای ترکیب بار ۳. الف- تحلیل خطی استاتیکی، ب- تحلیل غیرخطی استاتیکی ۵۵
شکل ۵-۲۳: جانمایی نقاط N6 و N7. ۵۶
شکل ۵-۲۴: نمودار تاریخچه زمانی بازشدگی- زمان برای نقطه N6. ۵۶
شکل ۵-۲۵: نمودار تاریخچه زمانی بازشدگی- زمان برای نقطه N7. ۵۶
شکل ۵-۲۶: نمایش تنش اصلی حداکثر در بالادست سد تحت ترکیب بارگذاری ۴؛ الف- ۴/۳۳ ثانیه پس از شروع تحلیل دینامیکی، ب- ۴/۳۲۴ ثانیه پس از شروع تحلیل دینامیکی. ۵۷
شکل ۵-۲۷: درشت نمایی نواحی مشخص شده در شکل ۵-۲۶. ۵۷

فهرست جداول

جدول ۲-۱: دسته بندی سد های قوسی از نظر ضخامت ۷
جدول ۲-۲: مشخصات سد های مدل شده توسط اولیورا و فریب ۲۲
جدول ۳-۱:مشخصات جغرافیایی سد ۲۴
جدول ۳-۲: مشخصات بدنه ۲۵
جدول ۳-۳: مشخصات مخزن ۲۵
جدول ۳-۴:مشخصات سرریز دریچهدار ۲۵
جدول ۳-۵: سیستم انحراف آب ۲۵
جدول ۳-۶ترازهای آب مخزن (از سطح آبهای آزاد) ۲۶
جدول ۳-۷: دما هوا در ساختگاه سد کارون ۴ برحسب درجه سانتیگراد برای یک دوره ۱۰ ساله ۲۶
جدول ۳-۸: درصد رطوبت هوا در ساختگاه سد کارون ۴ برای یک دوره ۱۰ ساله ۲۶
جدول ۳-۹ : دمای پیشنهادی آب مخزن سد کارون ۴ براساس داده های سد کارون ۳ برای طول یک سال ۲۷
جدول ۴-۱:مشخصات بتن ۳۰
جدول ۴-۲: شتابهای بیشینه در ساختگاه سد ۳۴
جدول ۴-۳: خلاصه زلزله های استفاده شده جهت مدلسازی های دینامیکی ۳۴
جدول ۴-۴: جدول تحلیلهای خطی ۳۸
جدول ۵-۱: خلاصه نتایج پوش تنشهای اصلی در تحلیلها خطی تحت بارگذاریهای حرارتی تابستان و زمستان ۴۰
جدول ۵-۲: خلاصه نتایج پوش تنشهای اصلی وبرشی درزها در تحلیلها غیرخطی تحت بارگذاریهای حرارتی تابستان و زمستان ۴۱
جدول ۵-۳: مشخصات بتن سد(عیناً مطابق با جدول ۸ از منبع ۸) ۴۲
جدول ۵-۴: ترکیب بارها برای نمایش نتایج تحلیلهای خطی و غیرخطی ۵۳

۱ فصل اول

مقدمه

۱-۱ پیشگفتار

در آغاز قرن ۲۱ میلادی بشر با سه مشکل بنیادین بحران آب، تضمین توسعه پایدار و مدیریت سیلاب روبرو است که بنحو پیچیده‌ای با یکدیگر روابط متقابل دارند. نیاز آبی بشر در دو دهه آینده تقریبا ۴۰ درصد افزایش می‌یابد که این مقدار ۱۷ درصد بیشتر از آبی است که در حال حاضر در دسترس می‌باشد. بیست میلیون نفر در شش کشور در غرب و مرکز آفریقا جهت تأمین آب به دریاچه چاد متکی می‌باشند و این در حالیست که این دریاچه در ۳۸ سال اخیر به اندازه ۹۵ درصد کوچک شده است[45]. دو سوم شهرهای چین با مشکل کمبود آب شدید مواجه‌اند. لذا طلوع یک قرن تشنه معادله نیاز و منابع آب در جهان را نامتوازن خواهد ساخت و این به معنای اهمیت یافتن صنعت سد سازی به عنوان یک راهکار موثر است. به دلیل افزایش روز افزون ساخت سد های مخزنی بزرگ در صد سال گذشته و همچنین به دلیل اهمیت این سد ها در تأمین آب مورد نیاز شهرها و جوامع بشری مسائل مرتبط با سد های بزرگ اعم از ساخت سد، بهره برداری از سد و تأثیرات ساخت سد در ساختگاه آن مورد توجه محققین عرصه سد سازی بوده است.

ایران به عنوان یک کشور با آب و هوای نسبتاً خشک و در عین حال رودخانه‌های مستعد دارای پتانسیل مناسبی برای ساخت سدها می‌باشد. در دهه‌های اخیر سدهای بلند علاوه بر تأمین مقادیر قابل توجه آب از لحاظ تأمین منابع انرژی نیز مورد توجه قرار گرفته اند. این موضوع محققان و طراحان را به سمت طراحی سدهای بلندتر جهت تأمین هرچه بیشتر انرژی سوق داده است. در ساختگاه‌های مناسب سدهای دو قوسی به دلیل شکل خاص و هزینه‌های کمتر ساخت بیشتر از انواع دیگر مورد توجه هستند. هم اکنون نزدیک به پانزده سد مخزنی بزرگ در کشور در حال ساخت است و یا مراحل مطالعاتی خود را طی می‌کند. این موضوع نشان از اهمیت سد سازی در کشور دارد.

سدهای دو قوسی جهت ساخت در دره‌های V شکل مناسب‌تر هستند و علت آن عملکرد قوسی آنها است که در دره‌های تنگ‌تر عملکرد بهتری دارد. از طرفی فراوانی گسلهای زمین شناختی در دره‌های مناسب برای سدهای دو قوسی زیاد است. به همین دلیل با افزایش ساخت این نوع سد ها در کشور احتمال رخداد زلزله در ساختگاه سدهای دو قوسی رو به افزایش است. همچنین پیچیدگی‌های طراحی و ساخت بدنه این نوع سدها و ارتفاع بلند آنها پیشبینی رفتار این نوع از سدها را در برابر شرایط متفاوت، نسبت به سایر انواع سدها سخت‌تر کرده است.

یکی از مسائل مرتبط با ساخت سدهای مخزنی بتنی دو قوسی که در دهه‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است،

موضوع تأثیردرزهای اجرایی سد در رفتار لرزه‌ای آن می‌باشد. این موضوع در روش‌های ساده شده‌ی طراحی سدهای قوسی معمولاً صرف نظر می‌گردد و بدنه سد به عنوان یک سازه یکپارچه مورد تحلیل و طراحی قرار می‌گیرد. با توجه به نحوه ساخت سدهای قوسی که ایجاد درزهای قائم در بین بلوک‌ها مختلف آن و تزریقات بَعدی آنها را ایجاد می‌کند، احتمال تأثیر این درزها که در مقایسه با بتن بدنه سد از مشخصات مکانیکی متفاوتی برخوردار است در رفتار سد بخصوص رفتار لرزه‌ای بطور جدی مورد توجه محققین قرار گرفته است. با توجه به پیچیدگی رفتار این درزها که عموماً نیاز به مدل‌سازی‌های غیرخطی دارد بررسی دقیق این موضوع بدون استفاده از ابزارهای تحلیلی توانمند بسیار مشکل می‌باشد.

بر اساس پیشرفت‌های روز افزون علم مکانیک شکست و نرم افزارها و سخت افزارهای رایانه‌ای محققین عرصه سد سازی در سه دهه اخیر نرم افزارها، مدلها المان محدود و تئوری‌های موجود در علم مواد را ترکیب کرده و جهت تحلیل غیرخطیت بدنه سد تحت بارهای دینامیکی از آنها بهره برده‌اند. همچنین انواع سدهای قوسی به دلیل کاهش هزینه ساخت و نگهداری، ارتفاع نسبتاً بلند و قابلیت ساخت سریعتر بدنه بیشتر مورد توجه بوده اند.

۱–۲ اهداف پایان‌نامه

براساس اهمیت ذکر شده در بالا در این پایان‌نامه بررسی اثر درزهای قائم در رفتار دینامیکی و لرزه‌ای سد کارون ۴ به عنوان بزرگترین سد بتنی دو قوسی ایران مورد توجه قرار گرفته است و با مدل‌سازی المان محدود و با احتساب رفتار غیرخطی دینامیکی به بررسی این اثرات پرداخته شده است. اهداف این پایان‌نامه را در موارد زیر می‌توان خلاصه کرد:

۱- مدلسازی المان محدود و تحلیل خطی و غیرخطی سد کارون چهار در نرم افزار ABAQUS.
۲- مقایسه بین نتایج تحلیل های خطی و غیرخطی و بررسی تفاوت‌های حاصل شده از رفتار غیرخطی درز های اجرایی بدنه سد.
۳- مقایسه نتایج تحلیل های خطی و غیرخطی و همزمانی آنها با بارگذاری‌های حرارتی بدنه سد.

۱–۳ ساختار تحقیق و فصل بندی پایان نامه

در این پایان‌نامه ابتدا مروری بر کلیات و ادبیات فنی سدسازی، طراحی سدهای مخزنی بزرگ و مکانیک شکست در فصل دوم انجام پذیرفته است سپس تاریخچه استفاده از مکانیک شکست در تحقیقات سدهای بتنی قوسی ارائه شده است. سد کارون چهار در فصل سوم این پایان‌نامه معرفی شده و در فصل چهارم مشخصات مدلسازی های المان محدود، فرض‌های انجام شده جهت ساخت مدلسازی‌های المان محدود و مطابق سازی‌های انجام شده جهت حصول اطمینان از واقع گرایانه بودن نتایج تحلیل‌های المان محدود مشخصاً ارائه شده‌اند. در فصل پنجم نتایج تحلیل‌های المان محدود مورد مقایسه و بررسی قرار گرفتند.

کلیات سد سازی و مروری بر ادبیات فنی

۲–۱ مقدمه

در طی سالهای گذشته پژوهشهای ارزشمندی در حوضه سدسازی انجام شده است. در این فصل ابتدا کلیات پژوهش در قالب چهار موضوع کلی سد سازی، سدهای قوسی، درزها در سد سازی، کلیدهای برشی در سد سازی و اصطلاحات رایج در رابطه با سدهای دو قوسی مطرح شده و سپس تئوری های اولیه مکانیک شکست در بتن و پژوهش‌های صورت گرفته در دو حوضه مربوط با موضوع این پایان نامه یعنی مدلسازی درزها در بدنه سدهای قوسی و کاربرد مکانیک شکست در سدسازی بحث شده است.

۲–۲ سد سازی

در این بخش به بیان کلیاتی در مورد دلایل ساخت سدها ، انواع سدها ، مطالعات اولیه لازم برای پروژه‌های سد سازی پرداخته می‌شود. برای این منظور پس از توضیح مراحل مختلف مطالعاتی، عوامل موثر در انتخاب محل و نوع سد تشریح می‌گردد

۲–۲–۱ مراحل مطالعات در سد سازی :

به منظور تحقق اهداف مطالعات طرحهای سد سازی، تمام عوامل موثر بر طرح از قبیل نوع سد ، کمیت و کیفیت مصالح مصرفی ، نحوه قرار گیری تاسیسات وابسته به سد، به ویژه سرریز ها با توجه به مجموع شرایط توپوگرافی، ژئو تکنیک، منطقه ای و زمین ساخت، شرایط پی و باربری جناحین، هیدروکلیماتولوژی و هیدرولیک مورد بررسی عمیق قرار می‌گیرند که بدین لحاظ و با توجه به اهمیت این پروژه ها، بر اساس توصیه استاندارد صنعت آب ایران، مراحل مطالعات یک سد به سه بخش عمده مرحله شناسایی، مرحله توجیهی و مرحله تفضیلی تقسیم بندی شده است. در واقع هر یک از مراحل فوق، به منظور پاسخ به یک سوال اصلی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. مرحله شناسایی به منظور پاسخ به این سوال که آیا باید مطالعات

ادامه یابد یا خیر، مرحله توجیهی به این سوال پاسخ می‌دهد که آیا طرح اجراء شود یا خیر و به همین ترتیب مرحله طراحی تفظیلی به این سوال پاسخ می‌دهد که طرح را چگونه باید اجرا نمود[۹].

در مطالعات مربوط به مرحله شناسایی پروژه های سد سازی، نتیجه گیری مربوطه عمدتاً بر اساس بررسی های کامل محلی و بازدید از تمام محل های ممکن برای احداث سد در حوزه مورد نظر و نیز نتایج و اطلاعات و گزارش های موجود صورت می‌پذیرد. چنانچه در این مرحله مجموعه اطلاعات و داده ها از وسعت کافی برای یک نتیجه گیری منطقی برخوردار نباشد، لازم است تا با استفاده از تجربیات گروه طراح و نیز تجربیات بدست آمده از سایر پروژه های مشابه و شناخت بدست آمده از منطقه، به پردازش و تجزیه و تحلیل برخی داده ها و اطلاعات نظیر هیدروکلیماتولوژی، زمین شناسی و ژئوتکنیکی، نیاز ها و ... پرداخت و این مطالعات و بررسی ها و نتیجه گیری های مربوط در نهایت بایستی از چنان اعتباری برخوردار باشد که حتی المکان تغییرات کلی و فاحشی در سایت های قابل توسعه بوجود نیاید. برای رسیدن به این مقصود لازم است که گروه مطالعه کننده و مهندسین طراح از چنان تجربه و تبحر و دید مسلطی برخوردار باشند که با استنتاج از داده ها و اطلاعات و نقشه های موجود و نیز بازدید های کامل و دقیق، برداشت صحیح و جامعی را نسبت به تمام عوامل موثر در پروژه داشته باشد[۹].

در مرحله بعدی که مرحله مطالعات توجیهی می‌باشد ، شناختی عمیق‌تر و دقیق‌تر نسبت به برخی عوامل نظیر مشخصه‌ها و ویژگیهای زمین ساختاری، زمین شناسی، ژئومکانیکی لرزه‌خیزی و همچنین وجود گسل‌های مهم و لایه های ضعیف، لایه های دگرسان و فرسوده، ریزشها و لغزش های احتمالی، فضاهای خالی، مناطق تراوا و انحلال پذیر و ... لازم می‌باشد. و بخصوص بررسی و اظهار نظر درباره جنبه‌های طراحی عمومی اجزاء پروژه، پی سازی و تقویت و بهسازی زمین را ایجاب می‌نماید. همچنین عوامل هیدرولوژیکی و سیلاب محل طرح با دوره‌ای بازگشت مختلف و نیز پدیده‌ها و مسائل هیدرولیکی مربوط و شکل و ابعاد سازه ها و تاسیسات مختلف لازم مورد بررسی جامع قرار می‌گیرد. در این مرحله، و بر اساس مطالعات مرحله توجیهی و نتایج مطالعات جدید کسب شده، گزینه های مختلف مورد بررسی های فنی اقتصادی قرار گرفته و پس از مقایسه و انتخاب گزینه برتر مسائلی نظیر محل سد، ارتفاع و نوع آن، مصالح مورد نیاز و منابع قرضه و کمیت و کیفیت آنها و نهایتا چگونگی تحقق اهم اهداف پروژه، کاملا تبیین می گردد. در مرحله مطالعات طراحی تفضیلی و از آنجا که بایستی جزئیات اجرایی طرح تهیه گردد، مجدداً با نگاهی عمیق تر و انجام آزمایش‌های لازم و احتمالا ساخت مدل‌های هیدرولیکی، انجام آزمایش‌های تکمیلی ژئومکانیکی، ژئوتکنیکی و هیدروژئولوژیکی و انجام آنالیزهای دقیق و در نظرگرفتن طیف گسترده‌ای از بارگذاری‌ها در شرایط عادی، غیر عادی و استثنایی، رفتار سازه و زمین و آب و اندرکنش آنها مورد بررسی قرار می‌گیرد. و در نهایت نقشه‌ها و جزئیات اجرایی طرح تهیه می‌شود[۹].

۲-۲-۲ انواع سد ها و انتخاب نوع سد

پروژه های سد سازی در سه فاز و یا مرحله مختلف انجام می‌گیرد. مرحله اول شامل مرحله مطالعات و بررسی‌ها می‌باشد در این فاز کلیه مطالعات مورد لزوم برای کسب اطلاعات پایه‌ای به منظور تهیه بهترین طرح‌ها انجام می‌گیرد. مقصود از بهترین طرح، طرحی است که به نحو شایسته ای از لحاظ فنی، اقتصادی و اجرائی حداکثر کارایی را داشته باشد. فاز دوم تهیه طرح‌های نهایی است که در این مرحله نقشه های فنی و اجرایی تهیه می‌شود و فاز سوم اجرای طرح می‌باشد. در ادامه به

بررسی تعاریف زیربنایی سدها می‌پردازیم[۲].

۲-۲-۲-۱ انواع سدها

سد مخزنی: سدی است که معمولا در مقیاس بزرگ در مقابل جریان آب برای ذخیره آب به منظور تامین آب کشاورزی ، تامین آب شرب، ایجاد ارتفاع هیدروالکتریکی برای تولید نیرو، تامین آب سایر مصارف و کنترل سیل ایجاد می‌گردد.

سد مخزنی بزرگ: طبق تعریف کمیته‌ی بین المللی سد های بزرگ، سد هایی که در زمان ساخت (طراحی) ارتفاع آنها از پایین‌ترین رقوم سطح پی تا سطح پیاده رو یا سواره رو تاج ۱۵ متر یا بیشتر باشد جزو سد های بزرگ طبقه بندی می‌شوند ، به علاوه در صورتی که ارتفاع سد بین ۱۰ الی ۱۵ متر یا بیشتر باشد مشروط بر اینکه حداقل یکی از شرایط ذیل را دارا باشد جزو سد های بزرگ محسوب می‌شود[۲].

- تاجی به طول ۵۰۰ متر داشته باشد.
- ظرفیت مخزن سد حداقل یک میلیون متر مکعب باشد.
- ظرفیت تخلیه سیلاب حداقل ۲۰۰۰ متر مکعب در ثانیه باشد.
- پی سد با مسائل پیچیده و خاصی مواجه شده باشد.
- شکل سد دارای طرحی خاص و غیرعادی باشد.

سد های مخزنی را به طور کلی به ۵ دسته تقسیم می کنند.

۱. سد های خاکی Earth-Fill Dam

سد خاکی عمدتا از مواد خاکی تشکیل یافته است. بدیهی است که مواد تشکیل دهنده آن باید طبق مشخصات مخصوصی باشد و فرم مقطع آن بر اساس ضوابط فنی. محاسباتی تعیین شود.

۲. سد های وزنی Gravity Dam

سد وزنی به سدی اطلاق می‌شود که از مصالح بنایی از قبیل بتن و مشابه آن تشکیل یافته و تعادل ایستایی آن عمدتا از وزن سد تامین می‌شود

۳. سد های قوسی Arch Dam

سد قوسی به سدی اطلاق می‌شود که در پلان بصورت قوس(معمولا دو طرف گیردار) است و تعادل آن عمدتا بر اساس تعادل و مقاومت قوس در مقابل نیروی رانش آب تامین می‌شود.

۴. سد های سنگی Rock-Fill Dam

سد سنگی نیز مانند سد خاکی عمدتا از مواد سنگی طبقه بندی شده تشکیل یافته است

۵. .سد های پایه دار Buttress Dam

سدپایه دار از یک سری دال و یا پوشش نسبتا نازک (مسطح و یا قوسی شکل) که نیروی رانش و تکیه گاه خود را به پایه ها منتقل می‌کنند تشکیل یافته است

۲-۲-۲-۲ انتخاب محل سد

۱ انتخاب سد قوسی:

با مختصر تعریفی که از سد قوسی شد چنین بر می‌آید که این نوع سد را باید در دره‌های تنگ و بستر سنگی سالم احداث نمود چرا که پهلوهای دو طرف باید قادر به جذب نیروی هیدرولیک آب مخزن (وارد بر قوس سد) باشند و دره‌های بسیار عریض به علت نیروی ناشی از قوس (بستگی به شعاع انحناء دارد) محل مناسبی برای سدهای قوسی نخواهند بود . لذا دو شرط عمده و اساسی یکی تنگ بودن دره و دیگری سالم بودن بستر سنگی دو طرف از شرایط عمده و اساسی احداث سدهای قوسی است[۱].

در سدهای قوسی می‌توان آب سیلاب را از روی سد به صورت پرش اسکی عبور داد که خود موجب صرفه جویی زیادی در هزینه(بابت احداث سرریز جدا گانه) می‌کند. سد قوسی در محل تکیه‌گاه باید عمود بر خطوط میزان نقشه پیاده شود[۱].

۲ انتخاب سد وزنی:

سد وزنی را در دره‌های عریض‌تر ($c/h>2.5$)[۱] احداث می‌کنند. ابعاد زیاد مقطع سد مسئله زیر فشار را درحد خطرناک مطرح می‌کند؛ لذا باید امکان این باشد که سد وزنی در پهلو های دو طرف در عمق کافی (عمق و طول هر دو) در داخل صخره‌های سنگی جای گیرد تا خطر دور زدن نیروی زیر فشار وجود نداشته باشد. سرریز را در سد های وزنی می‌توان در طول سد هر جا که مناسب باشد احداث نمود. در حقیقت از طول سد به عنوان سرریز استفاده می‌شود، در صورتی که در سدهای خاکی این مسئله خود مشکلی ایجاد می‌کند. برق آبی در سدهای وزنی به مقدار زیاد و در نمونه‌های کافی امروزه در دنیا تهیه شده است[۱].

۳ انتخاب سد پایه‌دار:

در صورتی که طول سد وزنی زیاد شود آنرا به سد پایه دار به منظور صرفه جویی در حجم عملیات بتن ریزی تبدیل می‌کنند و به طور خلاصه به ترتیب که دهنه رودخانه در محل احداث سد زیاد می‌شود واریانتهای سدهای قوسی، وزنی، پایه‌دار، و خاکی مورد بررسی قرار می‌گیرند[۱].

بدین لحاظ سد پایه دار از سد وزنی سبک‌تر است ولی محل پایه‌ها به علت تمرکز عکس العمل ممکن است سنگین‌تر سد وزنی باشد لذا زیر فشار در سد های پایه دار در صورتی که سد به شکل نامناسب روی پی گسترده ساخته شده باشد، می‌تواند خطر مهمی به وجود آورد ولی این خطر را می‌توان با جدا ساختن شالوده‌ها (شالوده‌ها پایه‌ها از سایر قسمت‌ها) و یا با گذاردن حوضچه و یا سوراخ های زهکش بر طرف نمود. مقاومت این نوع سدها در برابر زمین لرزه خوب نیست لذا در مناطق لرزه‌خیز باید پایه‌ها را توسط تیرهای طولی به هم مرتبط نمود. سرریز را می‌توان در طول سد جای داد منتها باید آن را در یک طرف ساحل رود خانه و یا سد جای داد[۱].

---

[۱] c : عرض درزه در بالاترین تراز محتمل برای احداث سد، h: ارتفاع حداکثر محتمل سد در دره

۴ انتخاب سد خاکی:

با زیاد شدن عرض رودخانه در محل گلوگاه به ترتیب از سدهای قوسی به وزنی، از وزنی به پایدار و بالاخره خاکی و سنگی می‌رسیم، سدهای خاکی معمولا ارزان‌تر از سدهای بتنی تمام می‌شود و به همین دلیل در جایی که عرض رودخانه (طول سد) زیاد باشد سدهای خاکی در شرایط یکسان اقتصادی‌تر به نظر می‌رسند. یکی از شرایط عمده برای احداث سدهای خاکی وجود مصالح خاکی مناسب در محل سد است که از اهم این مصالح، مواد با نفوذپزیری پایین مانند رس وسیلت است، سایر مصالح از قبیل شن و ماسه نیز باید در محل و یا فاصله معقولی از کارگاه وجود داشته باشد[۱].

۵ انتخاب سد سنگی:

سد سنگی را می‌توان در محلی که سنگ مناسب به وفور و یا با فاصله معقولی از کارگاه باشد احداث نمود که در این صورت به علت مقاومت بسیار خوب آن در مقابل زمین لرزه در مناطق زلزله خیز بسیار مناسبند. در صورت وقوع زمین لرزه مواد سنگی فوق بر روی هم می غلتند و ضایعه بزرگی ببار نمی‌آورند. سدهای سنگی در ایران به علت وجود مدار زمین لرزه و همچنین مواد سنگی مناسب می‌توانند مطرح شوند. سد قشلان در کردستان یکی از انواع سدهای سنگی است[۱].

۲-۳ انواع سدهای قوسی

سد قوسی سدی است که در پلان دارای انحنا بوده و قسمت اعظم بارها ناشی از آب را به صورت افقی توسط عملکرد قوسی به تکیه‌گاه‌های کناری منتقل می کند و مابقی بار را بوسیله عملکرد کنسول به پی منتقل می‌کند. چگونگی عملکرد قوسی سازه سد و میزان مشارکت جناحین در تحمل بار بستگی کامل به شکل انحنای سد و دره دارد. همچنین جنس سنگ و میزان تحمل نهایی آن در این موضوع شریک است. سد های قوسی را از نظر ضخامت بر اساس نسبت ضخامت پایه کنسول مرکزی به ارتفاع سازه‌ای مطابق با جدول ۲-۱ تقسیم می‌کنند. همچنین سدهای قوسی را از نقطه نظر طراحی و شکل سد می‌توان به سه گروه سدهای قوسی تک انحنایی[1]، سدهای قوسی دو انحنایی[2] و سدهای قوسی وزنی[3] تقسیم کرد. این تقسیم بندی در ادامه شرح داده شده است[۴].

جدول ۲-۱: دسته بندی سد های قوسی از نظر ضخامت

نام	نسبت ضخامت به ارتفاع
سد قوسی لاغر	کمتر از ۰/۲
سد قوسی نیمه ضخیم	بین ۰/۲ تا ۰/۳
سد قوسی ضخیم	بین ۰/۳ تا ۰/۵
سد قوسی وزنی	بیش از ۰/۵

[1] Arch Dams
[2] Double Arch Dams
[3] Gravity Arch Dams

۲–۳–۱ سد قوسی تک انحنایی (سد یک قوسی)

این گروه از سدها به سدهایی اطلاق می‌شوند که دارای یک قوس در پلان می‌باشند. سدهای قوسی تک انحنایی به سه نوع شعاع ثابت، شعاع متغیر و زاویه ثابت تقسیم می‌شوند[۴].

۲–۳–۲ سدهای قوسی دو انحنایی

سدهای قوسی دو انحنایی هم در پلان و هم در مقطع دارای انحنا هستند در مجموع نسبت به سایر سدهای قوسی به طور قابل ملاحظه‌ای حجم بتن‌ریزی کمتری دارند و اگر چه بدلیل شکل خاص از نظر اجرایی هزینه‌های بیشتری را می‌طلبند از نظر مجموع هزینه‌های ساخت اقتصادی‌ترند. این گروه از سدها با نام سدهای قوسی پوسته‌ای نیز شناخته می‌شوند[۴]. سد کارون ۴ از این نوع سد قوسی می‌باشدکه در فصل ۳ به طور کامل معرفی شده است.

۲–۳–۳ سد قوسی وزنی

سدهای قوسی وزنی ترکیبی از سدهای قوسی و سدهای وزنی هستند و اختلاف کمی در صرفه جویی مصالح نسبت به سدهای وزنی دارند. معمولا به دلیل انحنای کم قوس‌ها و زیاد بودن نسبی شعاع آنها در ترازهای پایین‌تر ضخامت سد به طور محسوسی افزایش می‌یابد[۴].

۲–۴ درزهای سازه ای

تشکیل ترک در سدهای بتنی نامطلوب است و بروز ترک درنقاط مختلف می‌تواند یکپارچگی سازه را از بین برده و باعث زوال و خرابی سد گردد. درزهای سازه‌ای سدهای بتنی در واقع یک ترک از پیش طراحی شده می‌باشند و درمناطقی واقع می‌شوند که لازم باشد و اثرات نامطلوب درز در آن مناطق حداقل باشد. سه گونه اصلی درز در سازه سدهای بتنی مرسوم است که به درز انقباض، درز انبساط و درز ساختمانی مشهور می‌باشد[۱].

۲–۴–۱ درز انقباض

به منظور کنترل ترک‌های بوجود آمده در بتن‌های حجیم، روش معمول، احداث سد در چند بلوک که توسط درزهای عرضی جدا شده‌اند می‌باشد. درزهای انقباض قائم بوده و معمولا از پی سد تا تاج ادامه می‌یابند. بسته به ابعاد سازه ممکن است احداث درزهای طولی انقباض نیز صورت پذیرد. در صورتی که درزهای انقباض طولی احداث گردند، ساخت سد مشتمل بر بتن ریزی تعدادی بلوک ستونی خواهد بود، هر بلوک مستقل از بلوک مجاور عمل خواهد کرد. درزهای طولی قائم بوده و موازی با محور سد اجرا می‌شود چنانچه این درزها با سطح بالادست سد و یا پایین دست سد برخورد نمایند لازم است که امتداد درز عمود بر سطوح خارجی باشد[۱].

۲-۴-۲ درز انبساط

درزهای انبساط به منظور اجازه دادن به افزایش حجم سازه در اثر افزایش درجه حرارت و اغلب برای جلوگیری از انتقال تنش از سازه به سازه های مجاور آن احداث می شود. به عنوان مثال سازه های نیروگاهی که در پنجه سد احداث می‌گردد. همانند درزهای انقباض این درزها نبایستی دارای چسبندگی بوده و معمولا توسط مصالحی نظیر چوب پنبه، لاستیک و ... که قابل تراکم بوده و تنش را منتقل نمی‌کنند پُر می‌شوند[۱].

۲-۴-۳ درزهای ساختمانی (اجرایی)

از این درزها جهت ایجاد سهولت در بتن ریزی سد استفاده می شود. در این نوع درزها سطح بتن جدید در محل درز کاملا به بتن قبلی چسبیده و سخت می شود. معمولا از این درزها جهت ایجاد تاخیر بتن ریزی قسمت های مختلف سد استفاده می شود[22].

۲-۵ کلیدها

از کلیدهای به منظور افزایش مقاومت برشی در درزهای اجرایی قائم استفاده می‌شود، این کلیدها عبارتند از برآمدگی ها و فرورفتگی‌هایی که دو قطعه مجاور را به یکدیگر قفل و بست می‌کند بنابر این در هنگامی که درزها کلید شده و تزریق می‌گردند یکپارچگی سازه تامین می‌شود. همچنین کلیدها در کاهش مقدار تراوش آب از درزهای طولی موثرند[22].

در سدهای وزنی احداث کلید بدلیل افزایش هزینه معمولا انجام نمی‌شود ولی در سدهای قوسی کلیدها در افزایش عملکرد قوس‌ها بسیار حائز اهمیت هستند و باعث انتقال تنش برشی بین بلوک‌ها در درزهای طولی شده و انتقال نیروها از طریق قوس را افزایش می‌دهند[22].

۲-۶ تعاریف اولیه سدهای دو قوسی

به منظور سادگی و تفهیم راحت تر مطالب در فصل های آتی برخی تعاریف مورد نیاز در این بخش ارائه می شوند.

- **ارتفاع سازه ای:** ارتفاع سازه ای در یک سد بتنی قوسی عبارت است از اختلاف بین رقوم بالای سد و رقوم پایین ترین نقطه در منطقه حفاری شده برای فنداسیون (بدون در نظر گرفتن باریکه هایی که به دلیل ضعف مقاومت سنگ کف حفر شده اند و گسل هایی که تزریق شده اند).
- **تاج سد:** به سطح جاده‌ای که از بالاترین رقوم سد می‌گذرد تاج سد گویند.
- **ارتفاع هیدرولیکی:** ارتفاع هیدرولیکی ارتفاعی است که آب در پشت سازه سد بالا می‌آید و عبارت است از

اختلاف بین تراز پایین‌ترین نقطه بستر رودخانه در محل احداث سد و در امتداد محور آن تا حداکثر تراز آب قابل کنترل.

- **طول سد:** فاصله بین دو طرف دره در تراز بالای سد و در امتداد محور سد را طول سد نامند، طول سرریزهای جانبی جزو طول سد در نظر گرفته نمی‌شوند.
- **صفحه مبنا:** صفحه قائم که از کنسول مرکزی و مرکز قوس محور سد می‌گذرد به صفحه مرجع مرسوم است.
- **محور سد:** محور سد عبارت است از یک خط روی صفحه مبنا که معمولا از لبه بالادست تاج سد می‌گذرد.
- **سطح بالا دست سد:** سطح بالا دست سد عبارت است از پوسته سد که درتماس با مخزن قرار دارد.
- **سطح پایین دست سد:** سطح بیرونی سد که در تماس با هوا قرار دارد.

۲-۷ مکانیک شکست بتن

در واقع شروع مکانیک شکست را می‌توان همزمان با شروع مباحث مقاومت مصالح دانست چرا که با در نظر گرفتن ضریب اطمینان در حل مسائل مربوط به مقاومت مصالح در واقع به نوعی از وقوع گسیختگی در مصالح جلوگیری می‌شود. ولی تئوری مکانیک شکست نوین در اوایل دهه ۱۹۲۰ ارائه شد، اولین تحقیقات آزمایشگاهی آن در حوزه علم عمران در سال ۱۹۶۱ صورت پذیرفت روش ارائه شده برای مواد فلزی شکننده موفقیت آمیز بود ولی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی بتن اختلاف زیادی نشان می‌داد، تا اینکه در سال ۱۹۷۰ پژوهش‌ها در رابطه با مکانیک شکست در بتن از سرگرفته شد و نهایتا در سال ۱۹۷۹ مدل‌های غیرخطی شکست ارائه شد که در آنها رفتار بتن و ساختار آن به خوبی مدل می‌شد و نتایج مطلوبی را ارائه می‌داند. در دهه ۱۹۸۰ تحقیقات گسترده‌ای در زمینه مدلسازی بتن انجام شد و کاربرد مکانیک شکست در سازه‌های بتنی افزایش بسیاری یافت[22].

در پایان دهه ۱۹۸۰ و در طی دهه ۱۹۹۰ تحقیقات زیادی در رابطه با چگونگی پیدایش ترک و گسترش آن انجام پذیرفت هر چند این تحقیقات عمدتاً در حوزه علم مواد صورت گرفت ولی بازتاب عمده‌ای در دیگر علوم ازجمله مهندسی عمران داشت. مانند آنچه در سال ۱۹۹۹ توسط مالا و ویلند[1] انجام شد[38] که در آن مشخص گردید شکست در بتن با مقاومت پایین به علت چسبندگی پایین ملات-ملات و ملات- سنگدانه رخ می دهد و همچنین تأثیر ریزترک‌ها در پیدایش ترک اثبات شد.

در سال ۱۹۹۹، فرانگوپل[2]، باند[3] و کپلر[4] روشی مبتنی بر توموگرافی ارائه کردند[35]. که در آن می توان گسترش تنش

[1] Malla & Wieland
[2] Frangopol
[3] Bond
[4] Kepler