



دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
دانشکده عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد گرایش خاک و پی

«مدل سازی نتایج آزمایش شکست هیدرولیکی برای تعیین تنش های برجا»

استاد راهنما

آقای دکتر حسن قاسم زاده

استاد مشاور

استاد دکتر سید امیرالدین صدرنژاد

دانشجو

ناصر ولی نژاد

شهریور ۸۸



تقدیم بہ دو مہبت الہی در زندگی بشر

پدر و مادر

تشکر و قدردانی

بر خود لازم می‌دانم که از زحمات بی‌دریغ استاد ارجمند آقای دکتر قاسم زاده تشکر کنم. بی‌تردید فراهم سازی بستری آزاد در انتخاب شیوه و موضوع تحقیق و کمک و پشتیبانی ایشان در محطات دشوار، همواره قوت قلبی برای نگارنده بوده است. همچنین پاس فراوان خود را نسبت به کلیه اعضای محترم هیات علمی دانشکده عمران دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی به ویژه استاد دکتر صدرنژاد که زحمت مشاوره این پژوهش را بر عهده داشتند، صمیمانه ابراز می‌دارم.

در مسیر پژوهش حاضر توفیق بهره‌گیری از کمک‌های ارزشمند مدیر عامل محترم شرکت مهندسین مشاور گمانه‌کاو، جناب آقای دکتر پهلوان در جهت فراهم آوردن بستر لازم برای انجام تست-های مورد نیاز و امکان بهره‌بردن از نتایج بدست آمده در ساختگاه سد گتوند علیا، همواره رفیق راه نگارنده بود. همچنین دوست عزیزم آقای مهندس رمضان پور در مراحل برنامه نویسی این تحقیق کمک بسیار نمودند. توفیق روزافزون این عزیزان را از خداوند منان خواستارم.

همچنین لطف بی اندازه خانواده عزیزم و دعای خیرایشان تسکین دشواری ها و درد سختی ها بود. قلمم
صمیمانه برایشان می تپد و آرزویم قدردانی دهنه ای از محبت آن هاست.

در پایان با استنانت از خداوند و امید به حل مشکلی از مسائل پیش روی خود کفایتی میهن عزیزمان
، ایران اسلامی، برای تمامی دوستان آرزوی موفقیت و سربلندی دارم.

ناصرولی نژاد

شهریور ۸۸

چکیده

چگونگی وضعیت تنش موجود در توده سنگ قبل و پس از حفر بناهای زیرزمینی، به حالت و چگونگی تنش برجای اولیه مربوط می‌شود. تنش‌های القایی ناشی از اجرای سازه زیرزمینی متأثر از حالت تنش-های اولیه حاکم بر منطقه است. عوامل متعددی در وضعیت تنش برجا مؤثرند. اطلاع از چگونگی وضعیت تنش برجا در پوسته زمین در بسیاری از مسائل در ارتباط با سنگ و زمینه‌های مهندسی عمران، معدن، نفت و همچنین در زمینه‌های ژئوفیزیک و زمین‌شناسی بسیار مهم می‌باشد. برای اندازه-گیری تنش‌های برجا روش‌های مختلفی ارائه شده است. از میان این روش‌ها روش شکست هیدرولیکی به لحاظ مبانی تئوری و انطباق با نتایج آزمایشگاهی و نیز امکان اجرا در اعماق زیاد و درجه حرارت‌های بالا و همچنین اجرا در زیر سطح آب، نسبت به دیگر روش‌ها دارای امتیاز است.

در پژوهش حاضر پس از ساخت تجهیزات لازم برای انجام تست شکست هیدرولیکی و انجام موفقیت-آمیز این آزمایشات برای اولین بار توسط دانش بومی در ساختگاه سد گتوند علیا، به بررسی تفصیلی روابط موجود برای تحلیل نتایج بدست آمده از آزمایشات برجا پرداخته شد. با ارائه روشی ریاضی تحت عنوان روش معکوس داده‌ها به حل رابطه غیرخطی حاکم برای تحلیل تنش از روش تست هیدرولیکی روی درزه‌های موجود HTPF در راستای تعیین مقدار و جهت تنش‌های برجا پرداخته شد. برنامه نوشته شده پس از صحت‌سنجی برای نتایج تست‌های سایت سد گتوند علیا استفاده و نتایج گزارش گردید. در ادامه و با هدف مدل‌سازی تست هیدرولیکی روی درزه‌های موجود روابط توام جریان سیال-تغییر شکل بلوک سنگی به روش تحلیل تغییرشکل‌های گسسته به تفصیل بیان شد. روابط نیروی گره‌ای معادل ناشی از فشار سیال وارد بر بلوک سنگی ارائه شد. از آنجا که فشار سیال با توجه به مقدار هد در گره‌ها محاسبه می‌شود، برای تعیین هد در تقاطع بلوک‌های سنگی از روش فشار توسعه یافته برای تعیین

مکان سطح تراز ایستابی استفاده شده است. معادلات حاکم به روش تفاضل محدود حل شد. با استفاده از نرم افزار تحلیل مکانیک سنگ به روش تحلیل تغییرشکل های گسسته، کد موجود برای در نظر گرفتن اثر سیال گسترش داده شد. پس از صحت سنجی برنامه نوشته شده، با آنالیز بازگشتی نمودارهای فشار-زمان بدست آمده از آزمایشات، به برآورد تنش برجا در عمق مورد نظر پرداخته شد که با نتایج بدست آمده از روش معکوس داده ها تطابق دارد.

کلمات کلیدی: شکست هیدرولیکی، تنش برجا، تست هیدرولیکی روی درزه های موجود، آزمایشات برجا، روش تحلیل تغییرشکل های گسسته، فشار توسعه یافته، سطح آزاد آب، تفاضل محدود

فهرست مطالب

۱	مقدمه و کلیات
۱-۱	تنش در سنگ
۱-۱-۱	طبقه بندی تنش های سنگ
۲-۱	برآورد تنش های برجا
۳-۱	اندازه گیری تنش های برجا
۴-۱	اهداف پایان نامه
۵-۱	روش تحقیق
۶-۱	ساختار پایان نامه
۲	مروری بر ادبیات موضوع
۱-۲	تاریخچه روش شکست هیدرولیکی
۲-۲	مروری بر تحقیقات اخیر
۱-۲-۲	ایتو و همکاران، ۱۹۹۹
۲-۲-۲	رتکوویست، تسانگ و استفانسون، ۲۰۰۰
۳-۲-۲	لی و همکاران، ۲۰۰۹
۳-۲	روش شکست هیدرولیکی Hydraulic Fracturing Method
۱-۳-۲	استاندارد اجرا آزمایش

۲۲	۲-۳-۲- روش اجرا.....
۲۵	۲-۴-۲- مروری بر روش‌های استخراج داده‌های آزمایش شکست هیدرولیکی.....
۲۷	۲-۴-۱- فشار گسیختگی ترک P_c
۲۷	۲-۴-۲- فشار انسداد P_{si}
۳۶	۲-۵- تاریخچه روش تحلیل تغییرشکل‌های گسسته.....
۳۷	۲-۶- روش‌های مدل‌سازی جریان سیال.....
۴۱	۳- اندازه‌گیری تنش‌های برجا بوسیله روش شکست هیدرولیکی.....
۴۱	۳-۱- مقدمه.....
۴۲	۳-۲- تئوری روش شکست هیدرولیکی HF.....
۴۸	۳-۳- تئوری روش تست هیدرولیکی روی درزه‌های موجود HTPF.....
۵۳	۳-۴- مطالعه موردی، ساختگاه سد گتوند علیا.....
۵۳	۳-۴-۱- مقدمه.....
۵۵	۳-۴-۲- زمین‌شناسی منطقه.....
۵۶	۳-۴-۳- اجرای آزمایشات.....
۵۹	۳-۴-۴- تجهیزات آزمایش.....
۶۱	۳-۴-۵- تفسیر و تحلیل نتایج.....
۷۳	۴- رابطه‌سازی جریان سیال در توده سنگ درزه دار به روش تحلیل تغییرشکل‌های مجزا.....
۷۳	۴-۱- مقدمه.....
۷۴	۴-۲- معادلات حاکم بر جریان سیال.....

۷۵.....	۴-۲-۱- معادله پیوستگی جریان سیال در محیط متخلخل
۷۸.....	۴-۲-۲- معادلات حرکت سیال
۸۱.....	۴-۳- معادله جریان سیال در ترک‌های نرم
۸۳.....	۴-۳-۱- گذردهی ترک‌های نرم غیرموازی
۸۵.....	۴-۴- کوپل فشار سیال و حرکت/تغییر شکل بلوک
۸۷.....	۴-۵- تحلیل تغییر شکل‌های گسسته (دی‌دی‌ای)
۸۸.....	۴-۵-۱- مقایسه روش اجزای محدود با روش المان مجزا
۹۰.....	۴-۵-۲- تئوری روش دی‌دی‌ای
۹۱.....	۴-۵-۳- حداقل‌سازی انرژی و معادلات تعادل کل
۹۲.....	۴-۵-۴- روش فشار توسعه یافته برای تعیین سطح تراز ایستابی
۹۳.....	۴-۵-۱- رابطه‌سازی تراوش در مسائل جریان محصور
۹۴.....	۴-۵-۲- روابط تفاضل محدود برای بدست آوردن سطح آزاد مسائل نامحصور
۹۷.....	۴-۵-۵- جریان سیال و تحلیل کوپل هیدرومکانیکی در تحلیل تغییر شکل‌های گسسته
۹۸.....	۴-۵-۱- رابطه‌سازی کوپل فشار سیال - تغییر شکل بلوک در دی‌دی‌ای
۱۰۳.....	۴-۵-۶- حل تکراری محاسبات زوج جریان - تنش
۱۰۴.....	۵ توسعه نرم‌افزار و صحت‌سنجی آن
۱۰۴.....	۵-۱- مقدمه
۱۰۵.....	۵-۲- تعیین سطح تراز ایستابی
۱۰۷.....	۵-۳- اعمال نیروی ناشی از فشار سیال

۱۱۰	۵-۴- صحت‌سنجی برنامه
۱۱۰	۵-۴-۱- مدل‌سازی سیال
۱۱۲	۵-۵- کاربرد برنامه
۱۱۳	۵-۵-۱- آماده سازی اطلاعات ورودی
۱۱۴	۵-۵-۲- معرفی هندسه بلوک‌ها به برنامه
۱۱۶	۵-۵-۳- اثر توزیع فشار سیال بر رفتار مکانیکی بلوک
۱۱۶	۵-۵-۳-۱- محاسبه نیروی عکس‌العمل تکیه‌گاهی
۱۱۹	۵-۵-۳-۲- بررسی سقوط آزاد بلوک در عمق سیال
۱۲۱	۵-۵-۳-۳- تست هیدرولیکی روی درزه موجود
۱۲۵	۶ نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات
۱۲۵	۶-۱- نتیجه‌گیری
۱۲۸	۶-۲- موضوعات پیشنهادی
۱۲۸	۷ مراجع

فهرست اشکال

شکل ۱-۱ طبقه بندی تنش ها در پوسته زمین	۳
شکل ۲-۱ حرکت صفحات تکتونیکی پوسته زمین، عاملی برای ایجاد تنش های برجا	۴
شکل ۳-۱ حالت تنش در نقطه ای از توده سنگ	۵
شکل ۴-۱؛ (الف) ترسیم تنش عمودی در مقابل عمق Z زیر سطح، (ب) تغییرات نسبت تنش متوسط افقی به تنش عمودی با رفتن به عمق Z زیر سطح زمین	۷
شکل ۱-۲ نخستین دیاگرام ایده آل تعیین تنش بوسیله شکست هیدرولیکی، دو حالت ممکن وضعیت فشار حین عملیات شکست که به شرایط مختلف زیرسطحی وابسته است.	۱۵
شکل ۲-۲ الگوی کلی سیستم شکست هیدرولیکی استفاده شده در سد گتوند علیا	۲۳
شکل ۳-۲ مراحل آزمایش شکست هیدرولیکی، ثبت فشار و دبی درون گمانه نسبت به زمان، سد گتوند علیا	۲۴
شکل ۴-۲ روند آزمایشات شکست هیدرولیکی و HTPF در عمق گمانه	۲۵
شکل ۵-۲ تجهیزات اندازه گیری تنش در سنگ به وسیله شکست هیدرولیکی و HTPF	۲۵
شکل ۶-۲ منحنی ایده آل آزمایش شکست هیدرولیکی	۲۶
شکل ۷-۲ نمونه ای از پکر دارای پوسته شکل پذیر- سایت سد گتوند	۲۶
شکل ۸-۲ برآورد فشار گسیختگی سنگ از نمودار نتایج آزمایش شکست هیدرولیکی، سایت سد گتوند علیا	۲۷
شکل ۹-۲ سیکل کامل بازشدگی مجدد ترک برای تعیین فشار انسداد، سد گتوند علیا	۲۸
شکل ۱۰-۲ برداشت فشار انسداد با استفاده از نتایج افت فشار؛ (الف) فشار در مقابل زمان؛ (ب) فشار نسبت به لگاریتم زمان؛ (ج) لگاریتم فشار نسبت به لگاریتم زمان (کلاسن ۱۹۸۹)	۳۰
شکل ۱۱-۲ تعیین فشار انسداد P_s از نتایج افت فشار؛ الف: روش افت توانی فشار؛ ب: روش مک لنان و روجرز؛ ج: روش نرخ دوخطی افت فشار	۳۳
شکل ۱۲-۲ تعیین فشار انسداد از نتایج فشار در مقابل زمان شکست هیدرولیکی؛ الف: روش تلاقی مماس ها؛ ب: روش نرخ دوخطی افت فشار	۳۴
شکل ۱۳-۲ الف؛ المان بندی بخشی از محیط، روش اصلاح شبکه ب؛ المان بندی کل محیط، روش شبکه ثابت	۳۸
شکل ۱-۳ نمودار معمول فشار در مقابل زمان - عملیات شکست هیدرولیکی در سازند سنگی متخلخل الاستیک	۴۲
شکل ۲-۳ مقطع عرضی گمانه قائم تحت تاثیر تنش های برجا حداقل S_H ، حداکثر S_H و فشار گمانه P	۴۳
شکل ۳-۳ تست هیدرولیکی روی درزه موجود، HTPF	۴۹
شکل ۴-۳ هندسه شماتیک مدل محاسبات تنش	۵۰
شکل ۵-۳ موقعیت سایت پروژه	۵۵
شکل ۶-۳ نمایی از مقطع سد و لایه بندی منطقه	۵۶
شکل ۷-۳ موقعیت فرازبند سد گتوند علیا	۵۷
شکل ۸-۳ شبیه سازی آزمایش شکست هیدرولیکی در بیرون گمانه برای کنترل مسیر تست، سد گتوند علیا	۵۸

- شکل ۳-۹ پکر دوپل و پمپ هیدرولیکی در حال کنترل‌های قبل از آزمایش، سد گتوند علیا ۶۰
- شکل ۳-۱۰ الف: پکر شکل‌پذیر و ابزار تعبیه‌شده در انتهای آن که محتوی دوربین و قطب‌نما است، ب: تصویر دوربین تعبیه‌شده برای برداشت دقیق راستای گمانه، سد گتوند علیا ۶۰
- شکل ۳-۱۱ دیاگرام شماتیک ابزار آزمایش HTPF ۶۱
- شکل ۳-۱۲ الف: فشار شکست سنگ نسبت به عمق، ب: فشار بازشدگی ترک نسبت به عمق، ج: فشار انسداد نسبت به عمق، سد گتوند علیا ۶۳
- شکل ۳-۱۳ تغییرات تنش‌های برجا به روش کلاسیک نسبت به عمق، سد گتوند علیا ۶۵
- شکل ۳-۱۴ فلوچارت برنامه محاسبه تنش برجا بوسیله روش معکوس داده‌ها ۶۶
- شکل ۳-۱۵ الف: نتایج سایت فورسمارک، ب: نتایج کد برنامه نویسی شده در MATLAB به روش معکوس داده‌ها ۶۸
- شکل ۳-۱۶ نمودار اختلاف مقادیر محاسباتی و اندازه‌گیری شده برای فشار انسداد نسبت به آزمون تنش حداکثر ۶۹
- شکل ۳-۱۷ نقشه جهانی تنش، منطقه فلات ایران ۷۰
- شکل ۳-۱۸ تغییرات تنش نسبت به عمق به روش معکوس داده‌ها، سایت سد گتوند علیا ۷۱
- شکل ۳-۱۹ مقایسه نتایج روش کلاسیک با روش معکوس داده‌ها، سایت سد گتوند علیا ۷۱
- شکل ۴-۱ المان واحد برای مشتق‌گیری از معادله پیوستگی ۷۶
- شکل ۴-۲ توزیع سهموی سرعت جریان در یک تک درزه ۸۲
- شکل ۴-۳ ترک گوه‌ای شکل؛ ۸۴
- شکل ۴-۴ فشار هیدرولیک در مرزهای بلوک - وضعیت دوبعدی (الف) بلوک صلب؛ (ب) بلوک شکل‌پذیر با شبکه FEM ۸۶
- شکل ۴-۵ جابجایی و تغییر شکل بلوک ۹۰
- شکل ۴-۶ هندسه شبکه مورد استفاده برای روابط تفاضل محدود ۹۳
- شکل ۴-۷ مسئله جامع تراوش با سطح آزاد ۹۵
- شکل ۴-۸ فشار سیال موثر بر (الف) المان چهارضلعی، (ب) المان مثلثی، (ج) بلوک صلب ۱۰۰
- شکل ۵-۱ نمایش سطح تراز ایستایی عبوری از بلوک ۱۰۷
- شکل ۵-۲ فلوچارت زیربرنامه تعیین تراز سطح آزاد سیال ۱۰۷
- شکل ۵-۳ فلوچارت زیربرنامه اعمال نیروی ناشی از سیال ۱۰۸
- شکل ۵-۴ مدل هیدرولیکی شبکه درزه، آزمایشات الوس ۱۱۰
- شکل ۵-۵ نمایش نتایج آزمایشات الوس در مقایسه با مقادیر محاسبه شده هد در گرہ‌ها در برنامه ۱۱۱
- شکل ۵-۶ نمودار میله‌ای تغییرات هد تقاطع درزه‌ها و مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده توسط الوس ۱۱۲
- شکل ۵-۷ شبکه درزه یکنواخت برای تعیین تراز سطح آزاد سیال ۱۱۳
- شکل ۵-۸ شماره‌گذاری گرہ‌های مدل استفاده شده در برنامه، (فرض اولیه اندازه دهانه درزه‌ها ۲/۵ میلیمتر است) ۱۱۴
- شکل ۵-۹ ترسیم تراز سطح ایستایی به روش EP و مقایسه با تراز باربوسا ۱۱۵
- شکل ۵-۱۰ نمایش چهار بلوک به ابعاد سه متر با درزه ۲/۵ میلیمتری ۱۱۷
- شکل ۵-۱۱ برابری اندازه نیروهای عکسالعمل تکیه‌گاهی بلوک B3 ۱۱۷
- شکل ۵-۱۲ اعمال فشار سیال و اثر آن بر نیروی تکیه‌گاهی ۱۱۸
- شکل ۵-۱۳ جابجایی بلوک‌ها با ابعاد ۳۰ متری پس از ۴۰۰ تکرار ۱۱۹
- شکل ۵-۱۴ جابجایی بلوک‌ها با مقیاس ۱ به ۱۰ (ابعاد ۳ متری) پس از ۴۰۰ تکرار ۱۱۹
- شکل ۵-۱۵ سقوط آزاد بلوک B3 در شرایط وجود سیال در محیط ۱۲۰

۱۲۰.....	شکل ۵-۱۶ اثر افزایش فشار همه‌جانبه بر سقوط آزاد بلوک B3
۱۲۲.....	شکل ۵-۱۷ هد پیزومتری اعمالی به عنوان فشار بازشدگی ترک
۱۲۲.....	شکل ۵-۱۸ بازشدگی درزه در اثر فشار سیال نسبت به زمان (نمودار لگاریتمی)
۱۲۳.....	شکل ۵-۱۹ بازشدگی درزه در اثر فشار سیال نسبت به زمان
۱۲۴.....	شکل ۵-۲۰ نیروی تکیه‌گاه در اثر فشار بازشدگی

فهرست جداول

جدول ۱-۱	دسته‌بندی روش‌های اندازه‌گیری تنش برجا	۹
جدول ۱-۲	فشار انسداد بدست آمده از تست‌های شکست هیدرولیکی آزمایشگاهی	۳۵
جدول ۱-۳	داده‌های بدست آمده از آزمایشات شکست هیدرولیکی	۶۳
جدول ۲-۳	مقادیر تنش‌های برجا به روش کلاسیک هوپرت و ویلیس	۶۵
جدول ۳-۳	داده‌های ورودی برای صحت سنجی برنامه، آزمایشات HTPF، سایت فورسمارک	۶۷
جدول ۴-۳	مقادیر محاسبه شده برای مجهولات رابطه ۳-۱۰	۶۹
جدول ۱-۵	مقایسه مقادیر هد محاسبه شده با نتایج آزمایشات الوس	۱۱۱
جدول ۲-۵	هد نقاط واقع بر تراز سطح ایستابی، مقایسه با تز باربوسا	۱۱۵

فصل اول

۱

مقدمه

۱-۱- تنش در سنگ

توده‌های سنگی در حالت طبیعی خود تحت تنش قرار دارند. اطلاع از تنش‌های برجا در کنار دیگر خصوصیات توده سنگ، در زمینه‌های مختلفی از جمله تشکیل ساختارهای زمین‌شناسی (چین-خوردگی‌ها، گسل‌ها، توده‌های نفوذی و ...)، پایداری سازه‌های ساخته دست بشر (تونل‌ها، حفره‌های زیرزمینی، معادن، حفاری‌های سطحی و غیره) و پایداری گمانه‌ها ضروری است. از این اطلاعات در برآورد پاسخ توده‌های سنگ به اختلال ناشی از سازه‌های فوق استفاده می‌شود. از طرفی تنش‌ها در

سنگ مستقیماً قابل اندازه‌گیری نبوده و تنها با استفاده از ایجاد اختلال در سنگ استنتاج می‌شوند. بعلاوه به علت ماهیت پیچیده سنگ‌ها و توده‌های سنگی نمی‌توان تنش‌های سنگ را به دقت تعیین کرد. در طول نیم قرن گذشته پیشرفت قابل توجهی در اطلاعات مهندسين در خصوص تنش سنگ اتفاق افتاده است، بطوری‌که در حال حاضر داده‌های فراوانی در خصوص حالت تنش نزدیک سطح پوسته زمین (۳ تا ۴ کیلومتری فوقانی) موجود است. تکنیک‌های تعیین تنش در ظرف این سال‌ها رشد گسترده‌ای داشته است. روش‌های آزادسازی سطحی^۱ در سال‌های آغازین ۱۹۳۰ و ۱۹۴۰، روش جک تخت^۲ در ۱۹۵۰، روش‌های آزادسازی گمانه^۳ در اوایل سال‌های ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰ و کاربردهای مهندسی روش شکست هیدرولیکی در دهه ۸۰ از جمله این پیشرفت‌هاست^۴. امروزه روش‌های نوینی برای اندازه‌گیری تنش‌های سنگ در اعماق پوسته زمین نیز ارائه شده است.

۱-۱-۱- طبقه بندی تنش‌های سنگ

تنش‌ها در سنگ را می‌توان به تنش‌های برجا^۵ و تنش‌های ایجاد^۶ تقسیم کرد. تنش‌های برجا که با نام‌های تنش‌های طبیعی، اولیه یا بکر هم خوانده می‌شوند، تنش‌هایی هستند که پیش از هرگونه اختلالی در سنگ وجود دارند. اما تنش‌های ایجاد^۶ یا تهییج‌یافته، به علت اختلال‌های ساخته دست بشر (نظیر گودبرداری، حفاری، پمپاژ، بارگذاری و غیره) و یا تغییر در شرایط طبیعی (تورم، تراکم و غیره) بوجود می‌آیند. به طور کلی تنش‌های برجا فعلی در یک توده سنگ، حاصل تجمیع رخداد‌های مختلف در تاریخچه زمین‌شناسی آن است. یک توده سنگی ممکن است دوره‌های متعدد پروسه‌های زمین‌شناسی، فیزیوشیمیایی، حرارتی و مکانیکی را که همه در وضعیت تنش برجا فعلی دخالت دارند،

^۱ surface relief methods

^۲ flat jack

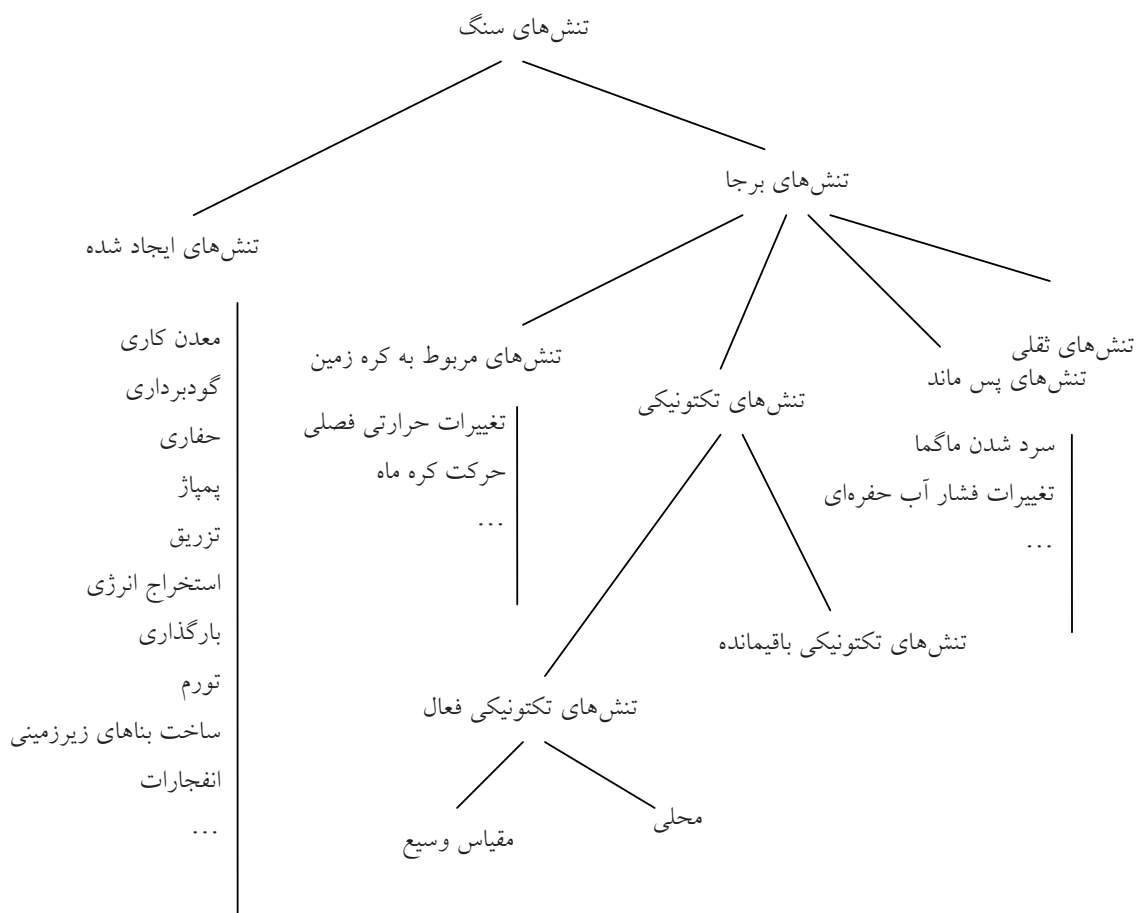
^۳ borehole relief methods

^۴ برای مطالعه بیشتر در این زمینه رج.ک [۷]

^۵ In situ stresses

^۶ Induced stresses

تجربه کرده باشد. مولفین متعدد طبقه بندی‌های متفاوتی برای تنش‌های برجا ارائه کرده‌اند. ویت^۷ تنش‌های برجا را به دو گروه طبقه‌بندی کرد؛ ثقلی و تکتونیک. تنش‌های تکتونیک نیز به مولفه‌های تنش فعلی و تنش‌های پس‌ماند تقسیم‌بندی می‌شوند. ابرت^۸ تنش‌های برجا را به تنش‌های خارجی شامل تنش‌های تکتونیک و ثقلی و تنش‌های داخلی متشکل از تنش‌های پس‌ماند تقسیم می‌کند. تنش‌های خارجی همچنین با نام تنش‌های محیطی هم خوانده می‌شوند.^۹ در شکل ۱-۱ تنش‌های سنگ به طور خلاصه طبقه‌بندی شده‌اند.



شکل ۱-۱ طبقه بندی تنش‌ها در پوسته زمین [1]

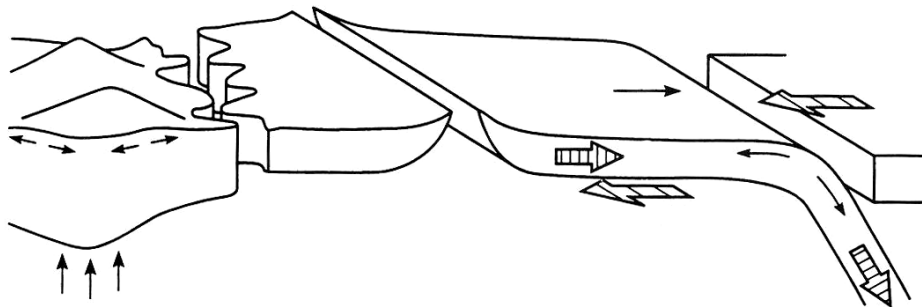
⁷ Voight, 1966

⁸ Obert, 1968

⁹ Fairhurst, 1968

۲-۱- برآورد تنش‌های برجا

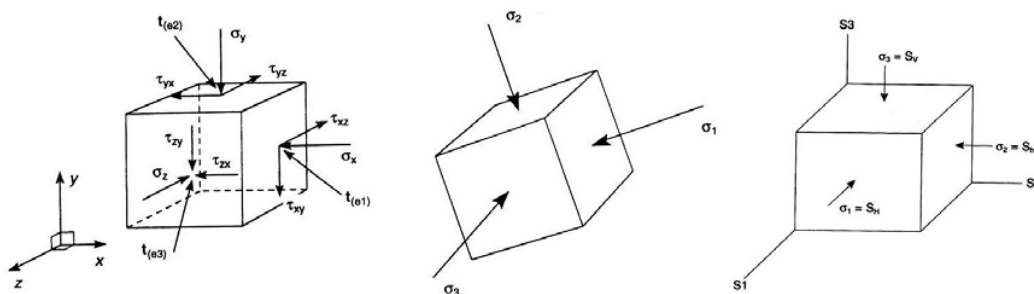
تعیین دقیق تنش برجا به صورت تئوری به دلیل وجود عوامل مختلف موثر بر آن هنوز میسر نمی‌باشد. لذا بایستی از روش‌های تجربی استفاده نمود. پیش از اندازه‌گیری تنش‌های برجا، برآوردی از تنش‌های برجا منطقه توسط روش‌های ارائه شده در متون مهندسی انجام می‌شود. این برآورد با توجه به مواردی نظیر روابط تنش نسبت به عمق و یا شواهد و نتایج بدست آمده از اندازه‌گیری‌های تنش که پیش از این در ناحیه موردنظر انجام شده و یا برون یابی از نتایج نواحی با زمین‌شناسی و خصوصیات مشابه بدست می‌آید. برآورد تنش‌های برجا، در مراحل اولیه طراحی‌های مهندسی، و در برنامه‌ریزی برای انتخاب روش و محل اندازه‌گیری تنش، می‌تواند مفید باشد. نکته قابل توجه این است که پروسه برآورد تنش-های برجا نباید به عنوان جایگزینی برای اندازه‌گیری این تنش‌ها در نظر گرفته شود.



شکل ۲-۱ حرکت صفحات تکتونیکی پوسته زمین، عاملی برای ایجاد تنش‌های برجا [1]

همانطور که پیش از این اشاره شد، حالت فعلی تنش، محصول نهایی مجموعه رخدادهای زمین‌شناسی و نیز حرکت صفحات تکتونیکی در پوسته زمین (شکل ۲-۱) و برهم‌نهی مولفه‌های تنش ناشی از آن-هاست. از این رو پیش‌بینی دقیق تنش‌های برجا در سنگ و تغییرات محیطی آن بسیار مشکل است. به علاوه از آنجا که توده‌های سنگ به ندرت همگن و پیوسته‌اند، تنش‌ها در توده سنگی از نقطه‌ای به نقطه دیگر تفاوت خواهند داشت. تنش‌های برجا نه تنها در محیط بلکه در اثر رخدادهای تکتونیکی، فرسایشی و نظیر آن، با زمان هم تغییر می‌یابند.

به طور کلی برآورد تنش‌های برجا نیاز به توصیف دقیق زمین‌شناسی سایت و قضاوت مهندسی دارد. معمولاً در عمل برای برآورد حالت تنش در عمق z در یک توده سنگ، دو فرض اولیه در نظر گرفته می‌شود؛ نخست اینکه حالت تنش با دو مولفه توصیف می‌شود: مولفه عمودی σ_v ناشی از وزن سنگ سربار در عمق موردنظر که برابر γz است ($\gamma = \rho g$) میانگین وزن مخصوص سنگ برحسب (N/m^3) و همچنین مولفه افقی یکسان $\sigma_h = \sigma_H$ که مساوی K برابر σ_v می‌باشد. فرض دوم این است که هر دو تنش σ_h و σ_v تنش‌های اصلی‌اند. این دو تنش، تنش‌های کل هستند^{۱۰}.



شکل ۳-۱ حالت تنش در نقطه‌ای از توده سنگ [1]

روابط متفاوتی در متون مهندسی برای ضریب K ارائه شده است. تالوبر^{۱۱} پیشنهاد کرد که K می‌تواند برابر واحد انتخاب شود، این پیشنهاد در نوشته‌ها با عنوان قانون هایم^{۱۲} شناخته می‌شود (بر اساس تحقیق منتشرشده توسط هایم، زمین‌شناس سوئیسی). از این رو حالتی از تنش که در آن سه مولفه اصلی تنش برابر γz باشند ($K=1$)، در نوشته‌ها اغلب با عنوان لیتواستاتیک^{۱۳} رجوع داده می‌شود. رابطه دیگری که اغلب در نوشته‌ها برای ضریب K استفاده می‌شود عبارت است از $K_0 = \frac{\nu}{1-\nu}$ که در آن ν ضریب پواسون سنگ است. این رابطه با فرضیات زیر بدست آمده است [1]؛

^{۱۰} در متن این پایان نامه، σ_v یا S_v معرف تنش عمودی، σ_H ، S_H یا $\sigma_{H\max}$ یا $S_{H\max}$ بیانگر تنش افقی حداکثر و σ_h ، S_h یا $\sigma_{h\min}$ یا $S_{h\min}$ نشانگر تنش افقی حداقل است. تنش‌های اصلی بزرگتر، میانی و کوچکتر به ترتیب با σ_1 ، σ_2 و σ_3 نشان داده می‌شوند.

^{۱۱} Talobre, 1967 مرجع ذکر شود

^{۱۲} Heim, 1878

^{۱۳} lithostatic

- توده سنگ، نیم فضایی پیوسته، ایده آل، همگن و همسانگرد خطی با سطحی افقی است.
- توده سنگ به تنهایی تحت اثر جاذبه قرار داشته به طوری که جابجایی های افقی به سمت صفر میل می کنند.

- تاریخچه بارگذاری اثری در چگونگی بوجود آمدن تنش های برجا ندارد.

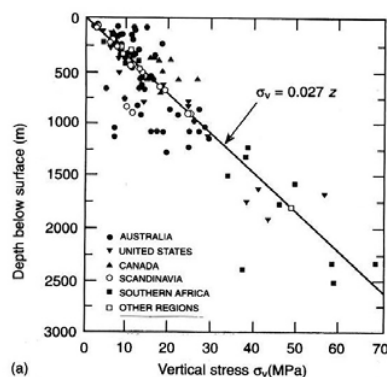
رابطه فوق ایجاب می کند که تنش های افقی و عمودی در سطح کره زمین به سمت صفر میل کنند.

ضریب K_0 در ادبیات ژئوتکنیک اغلب با نام ضریب فشار جانبی در حالت سکون خوانده می شود. از آنجا که ν بین مقادیر ۰ تا ۰/۵ تغییر می کند، لذا مقدار ضریب K_0 تنها می تواند بین مقادیر ۰ تا ۱ باشد. برای مثال با فرض نسبت پواسون $\nu = 0.25$ ، این ضریب برابر $K_0 = 1/3$ می شود.

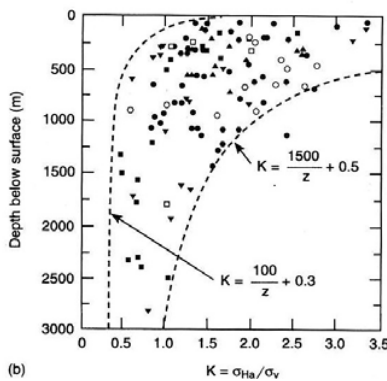
اندازه گیری های واقعی متعدد در سایت های مختلف نشان می دهد که فرضیات $K=I$ یا $K=K_0$ و این که K در صفحه افق یکنواخت است، برای توصیف درست تنش بر جای منطقه غیر دقیق می باشد [نظیر 2]. برای اغلب سنگ ها تنش های افقی اندازه گیری شده با آنچه بوسیله فرضیات مذکور تخمین زده می شود، تفاوت اساسی دارد. اولاً اندازه گیری های تنش انجام شده در بخش های مختلف جهان نشان می دهد که برای ۶۵ تا ۷۰٪ موارد، تنش های افقی بزرگتر از تنش عمودی است [3]. ثانیاً تنش های افقی در اغلب قسمت های جهان غیر یکنواخت ($\sigma_h \neq \sigma_H$) بدست آمده اند. برای مثال در ۷۰٪ اندازه گیری های تنش در چین، رنج تغییرات نسبت تنش افقی حداکثر به تنش افقی حداقل بین ۱/۴ تا ۳/۳ است [4]. این به معنای نامساوی بودن تنش های افقی است.

در آغاز تفاوت بین تنش های برآوردی و اندازه گیری شده، به تنش های تکتونیکی نسبت داده شد. لیکن اثر مربوط به رخدادهایی نظیر تنش های پس ماند حرارتی، فرسایش، توپوگرافی، کرنش های جانبی،

ناهمسانی، انجماد و ذوب، انحنا کره زمین و سایر خصیصه‌ها و پروسه‌های زمین‌شناسی فعال هم به همین اندازه مهم و تاثیرگذار است. با این حال محققین برای تغییرات اندازه تنش‌های برجا افقی و عمودی نسبت به عمق در مناطق مختلف جهان و یا برای سایت‌های بخصوص، روابط مختلفی ارائه کرده‌اند. اغلب داده‌ها برای اعماق کمتر از ۳۰۰۰ متر است. رومل ادبیات موضوع را به طور گسترده برای اندازه‌گیری‌های عمیق تنش توسط روش شکست هیدرولیکی در مناطق مختلف جهان ارائه کرده است [5]. براون و هوک پس از جمع‌آوری داده‌های مختلف بدست آمده در نقاط مختلف جهان، تغییرات تنش عمودی نسبت به عمق را به ترتیب در شکل‌های ۴-۱ الف و ۴-۱ ب نشان داده‌اند [6].



(a)



(b)

شکل ۴-۱؛ (الف) ترسیم تنش عمودی در مقابل عمق Z زیر سطح، (ب) تغییرات نسبت تنش متوسط افقی به تنش عمودی با رفتن به عمق Z زیر سطح زمین [6]

وزن مخصوص $\gamma = \rho g$ برای سنگ‌ها به طور کلی بین 0.25 تا 0.33 MN/m^3 تغییر می‌کند [1]. بنابراین تنش عمودی ثقلی γz می‌بایست به طور خطی نسبت به عمق با شیب بین 0.25 تا 0.33 MN/m^3 افزایش یابد. اغلب برای وزن مخصوص سنگ مقدار متوسط 0.27 فرض می‌شود که شیب تنش عمودی 0.27 MPa/m را نتیجه می‌دهد (شکل ۱-۴الف). بنابراین به عنوان یک تخمین، با برقراری فرضیات رابطه K_0 ، اگر $\nu = 0.25$ باشد، تنش افقی نیز با شیب $0.09 \frac{\text{MPa}}{\text{m}}$ افزایش خواهد یافت.

۱-۳- اندازه‌گیری تنش‌های برجا

در طی نیم قرن گذشته، روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری تنش‌های برجا ایجاد و گسترش یافته‌اند. از این روش‌ها می‌توان به روش‌های هیدرولیکی^{۱۴}، روش‌های آزادسازی تنش^{۱۵}، روش‌های جکینگ^{۱۶}، روش‌های احیا کرنش^{۱۷}، روش‌های گسیختگی گمانه^{۱۸} و سایر روش‌ها اشاره کرد (جدول ۱-۱).

به طور کلی روش‌های اندازه‌گیری تنش برجا را می‌توان در دودسته اصلی قرار داد؛ دسته اول شامل روش‌هایی است که موجب ایجاد اختلال در شرایط سنگ بکر می‌شوند. ایجاد کرنش، تغییر شکل یا گشودگی ترک از جمله آن است. دسته دوم شامل روش‌هایی است که در آن به برداشت پاسخ محیط و رفتار سنگ پرداخته می‌شود. معمولاً این روش‌ها تاثیر قابل توجهی بر نحوه و روش اندازه‌گیری ندارند. به عبارت دیگر بدون ایجاد اثرات مخرب بر ساختار محیط اندازه‌گیری تنش‌ها انجام می‌شود. در شرایطی که در آن سنگ الاستیک خطی و همگن می‌باشد، تنش‌های سنگ را می‌توان برای بزرگی و همچنین راستای آن به ترتیب با خطای $\pm 10-20\%$ و $\pm 10-20^\circ$ تعیین کرد [1].

¹⁴ Hydraulic methods

¹⁵ Relief methods

¹⁶ Jacking methods

¹⁷ Strain recovery methods

¹⁸ Borehole breakout methods

جدول ۱-۱ : دسته‌بندی روش‌های اندازه‌گیری تنش برجا [1]

روش انجام	حجم تحت تاثیر (مترمکعب)
روشهای هیدرولیکی	
شکست هیدرولیکی <i>Hydraulic Fracturing</i>	$0.5 - 50$
شکست استوانه ای <i>Sleeve Fracturing</i>	10^{-2}
روش <i>HTPF</i> (تست هیدرولیکی روی درزه های موجود)	$1 - 10$
روشهای آزادسازی	
روشهای آزادسازی سطحی	$1 - 2$
کم مغزه گیری	10^{-3}
روشهای آزادسازی گمانه ای (بیش مغزه گیری، شیارزدن در گمانه و غیره)	$10^{-3} - 10^{-2}$
آزادسازی احجام بزرگ سنگ (روش تراش اطراف یک برآمدگی، تکنیک زیر-حفاری)	$10^2 - 10^3$
روشهای جک زدن	
روش جک تخت	$0.5 - 2$
روش جک خمیده	10^{-2}
روشهای احیاء کرنش	
احیاء کرنش غیر الاستیک (<i>ASR</i>)	10^{-3}
تحلیل دیفرانسیلی منحنی کرنش (<i>DSCA</i>)	10^{-4}
روش گسیختگی گمانه	
تحلیل کالیپر و قطر	$10^{-2} - 10^2$
تحلیل مشاهده گر گمانه ای	$10^2 - 10^2$
سایر روشها	
تحلیل اطلاعات لغزش گسل	10^8
مکانیزم های کانونی زلزله	10^9
روشهای غیر مستقیم	$10^{-4} - 10^{-3}$
ملاحظات در سنگ دارای رفتار وابسته به زمان	$10^{-2} - 1$
اندازه گیری تنشهای پسماند	$10^{-5} - 10^{-3}$

از معمول‌ترین روش‌های مستقیم اندازه‌گیری تنش در سنگ، روش‌های هیدرولیکی هستند. دلیل فراوانی استفاده از این روش‌ها، تئوری قوی و نتایج قابل قبول بدست آمده از تفسیر این آزمایشات است.^{۱۹} در عمل و به طور عمده دو روش اندازه‌گیری تنش وجود دارد که از هیدرولیک سیال به عنوان روشی موثر در تحریک توده سنگ اطراف گمانه و در نتیجه تعیین تنش منطقه بهره می‌برند. این روش‌ها عبارتند از شکست هیدرولیکی^{۲۰} و تست هیدرولیکی روی ترک‌های موجود (HTPF)^{۲۱}. (البته روش دیگری تحت عنوان شکست استوانه‌ای^{۲۲} توسط استفانسون در ۱۹۸۳ ارائه شد [1] اما به دلیل ایرادات

^{۱۹} خواننده برای مطالعه سایر روش‌ها می‌تواند به مرجع [۷] مراجعه کند.

^{۲۰} Hydraulic Fracturing

^{۲۱} Hydraulic Tests on Pre-existing Fractures

^{۲۲} Sleeve Fracturing

محاسباتی^{۲۳} که به این روش وارد بود، در عمل توفیق چندانی نیافت [۷]. هر دو روش از تجهیزات یکسانی شامل پکرهای منبسط‌شونده، پکر شکل‌پذیر و پمپ‌های فشار قوی (برای تولید جریان سیال با فشار بالا هنگام هر یک از فرآیندهای تشکیل ترک‌های جدید و یا گشودن دوباره درزه‌های موجود)، استفاده می‌کنند.

به طور کلی شکست هیدرولیکی روشی موثر برای تعیین تنش دوبعدی منطقه (معمولا در صفحه‌ای افقی) است و بنابراین در مراحل اولیه پروژه‌ها و زمانی که هیچ دسترسی به فضاهای زیر سطح زمین موجود نیست، بسیار مفید خواهد بود. قابلیت‌های این روش، آن را بخصوص در اندازه‌گیری‌های تنش در اعماق زیاد کارآمد می‌سازد^{۲۴}. همچنین این روش تحت تاثیر پروسه‌های حفاری قرار نمی‌گیرد. از سوی دیگر شکست هیدرولیکی به طور معمول شامل تجهیزات بسیاری است و نیاز به فضای زیادی دارد. از این رو این روش در مواردی که در سطح اقدام به اندازه‌گیری تنش در گمانه‌های تقریبا قائم می‌شود، بسیار مناسب خواهد بود.

۱-۴- اهداف پایان‌نامه

بیش از ۴۰ سال است که در دنیا از تکنیک شکست هیدرولیکی برای تعیین تنش‌های برجا استفاده می‌شود. اما در کشور ما به تازگی استفاده محدودی از این روش آغاز شده که از آن جمله تا پیش از مطالعه حاضر، می‌توان به مطالعات سد سیمره اشاره کرد. اما به دلیل عدم وجود تجهیزات نیمه پیشرفته این آزمایش در داخل کشور، پیش از این، آزمایشات مذکور به شرکت‌های آلمانی و سوئیسی نظیر مسی^{۲۵} و سویل اکسپرت^{۲۶} واگذار می‌شد. در سال ۱۳۸۵ اجرای آزمایشات سد گتوند علیا برای اولین

^{۲۳} عدم وضوح فشار گسیختگی سنگ و نیز عدم گسترش ترک نسبت به فاصله از گمانه

^{۲۴} طبق تحقیقات نگارنده بیشترین عمق اندازه‌گیری تنش با روش شکست هیدرولیکی در ایالت تکزاس و در عمق ۶۰ کیلومتری انجام شده است [21].