بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مکانیک سنگ

تحلیل پایداری تونل مترو خط ۲ قطار شهری مشهد با کمک نتایج ابزاربندی با MPBX

نگارنده: سعید شمشیرزن

استاد راهنما:

دکتر سید رحمان ترابی

تیر ۱۳۹۶

شماره: ۰-۴۶۹۶/۱۹۶۵
تاریخ: ۹۶/۴/۱۹

باسمه تعالی

دانشگاه صنعتی شاهرود
مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای سعید شمشیرزن با شماره دانشجویی ۹۲۰۸۶۰۴ رشته مهندسی معدن گرایش مکانیک سنگ **تحلیل پایداری تونل مترو خط ۲ قطار شهری مشهد با کمک نتایج ابزاربندی با MPBX** که در تاریخ ۱۳۹۶/۴/۱۸ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با امتیاز ۱۸٫۷۵ درجه عالی) ☐ مردود ☐

نوع تحقیق: نظری ☑ عملی ☐

عضو هیات داوران	نام ونام خانوادگی	مرتبهٔ علمی	امضاء
۱ـ استادراهنمای اول	دکتر سید رحمان ترابی	استاد	
۲- استادراهنمای دوم	—	—	—
۳- استاد مشاور	—	—	—
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر رامین رفیعی	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر شکرا... زارع	دانشیار	
۶ـ استاد ممتحن دوم	دکتر مجید نیکخواه	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر علیرضا عرب امیری

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده: ۹۶/۴/۱۹

تبصره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

تعهد نامه

اینجانب سعید شمشیرزن دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی معدن گرایش مکانیک سنگ دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده رساله " **تحلیل پایداری تونل مترو خط ۲ قطار شهری مشهد با کمک نتایج ابزاربندی با MPBX** " تحت راهنمائی آقای دکتر سید رحمان ترابی متعهد می شوم.

- تحقیقات در این رساله توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در رساله تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنـــوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهــرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشـگاه صنعتـی شاهـرود » و یا « Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از رساله رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این رساله ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این رساله، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تـاریـخ
امـضـای دانـشجو

مـالـکیت نـتـایـج و حق نـشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در رساله بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

طراحی و احداث سازه‌های زیرزمینی در بیش‌تر موارد با آگاهی تقریبی از پارامترهای ژئومکانیکی محیط دربرگیرنده انجام می‌شود. با توجه به دشواری برآورد پارامترهای زمین، رفتارسنجی و به کارگیری تحلیل برگشتی روشی سودمند است. رفتارسنجی در حین و بعد از اجرای پروژه نه تنها برای کنترل پایداری سازه‌ها بلکه برای تخمین مجدد داده‌های ورودی مربوط به پارامترهای ژئومکانیکی استفاده می‌شود که در تحلیل طراحی این تخمین باید به صورتی انجام شود که فاصله مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده برای محیط مورد بررسی به حداقل ممکن کاهش یابد.

هدف اصلی رفتارسنجی، تعیین شرایط پایداری در یک سازه زیرزمینی به کمک تهیه اطلاعات کمی بر اساس رفتارسنجی زمین و سیستم نگهدارنده تونل است. در تحلیل برگشتی، صرفا تعیین هویت مدل مکانیکی یا مقادیر ثابت مکانیکی و نیروهای خارجی آن مورد نظر نیست، بلکه هدف نهایی آن ارزیابی روش طراحی در طی ساخت و ساز است.

در این پژوهش پارامترهای ژئومکانیکی خاک توسط تحلیل برگشتی به روش تک متغیره‌ی جایگزین و بر پایه داده‌های ابزار دقیق برای تونل خط ۲ متروی مشهد برآورد شده است. داده‌های آزمایشگاهی، به عنوان پارامترهای ژئومکانیکی معادل در مدل‌سازی با نرم افزار FLAC 3D استفاده شده است. پس از انجام تحلیل برگشتی مقادیر مدول تغییر شکل (E) و نسبت تنش افقی به قائم (K) به ترتیب ۱۹۹ مگا پاسکال و ۰/۴۸ محاسبه شده است. با تصحیح مقادیر اولیه پارامترهای ژئومکانیکی، تحلیل پایداری تونل خط ۲ متروی مشهد در مقطع مورد مطالعه با استفاده از روش کرنش مستقیم انجام گردید و مشخص شد با توجه به نگهداری در نظر گرفته شده، تونل پایدار خواهد بود.

کلمات کلیدی: رفتارسنجی، تحلیل برگشتی، ابزار دقیق، خط ۲ قطار شهری مشهد

تقدیم به

ای پدر از تو هر چه می گویم باز هم کم می آورم

خورشیدی شدی و از روشنایی ات جان گرفتم و در ناامیدی ها نازم را

کشیدی و لبریزم کردی از شوق

اکنون حاصل دستان خسته ات رمز موفقیتم شد

به خودم تبریک می گویم که تو را دارم و دنیا با همه بزرگیش مثل تو را ندارد. . . . .

و تو ای مادر، ای شوق زیبایی نفس کشیدن

ای روح مهربان، هستی ام

تو رنگ شادی هایم شدی و لحظه ها را با تمام وجود از من دور کردی و

عمری خستگی ها را به جان خریدی تا اکنون توانستی طعم خوش

پیروزی را به من بچشانی

تقدیر و تشکر

به مصداق «من لم یشکر المخلوق لم یشکر الخالق » بسی شایسته است از استاد فرهیخته و فرزانه جناب آقای دکتر سید رحمان ترابی که با کرامتی چون خورشید، سرزمین دل را روشنی بخشیدند و گلشن سرای علم و دانش را با راهنمایی های کار ساز و سازنده بارور ساختند، تقدیر و تشکر نمایم.

فهرست مطالب

Contents

فصل اول ۱

کلیات تحقیق ۱

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- ضرورت انجام تحقیق ۳

۱-۳- اهداف تحقیق ۴

۱-۴- روش تحقیق ۴

۱-۵- سوابق مطالعات انجام‌شده ۵

۱-۶- ساختار تحقیق ۶

۱-۷- نتیجه گیری ۸

فصل دوم ۹

مطالعات رفتارسنجی خط ۲ مترو مشهد ۹

۲-۱- مقدمه ۱۰

۲-۲- اهداف رفتارسنجی ۱۱

۲-۳- ویژگی های یک طرح ابزاربندی مناسب ۱۲

۲-۴- انواع روش های اندازه گیری در تونل ۱۳

۲-۵- اندازه گیری تغییر مکان با کشیدگی سنج ۱۴

۲-۵-۱- کشیدگی سنج گمانه ای ۱۴

۲-۵-۲- کشیدگی سنج مدفون ۲۷

۲-۶- مشخصات کشیدگی سنج مورد استفاده در تونل خط ۲ مترو مشهد ۲۸
۲-۷- مراحل مختلف عملیات نصب تا قرائت ۳۰
۲-۷-۱- کنترل کشیدگی سنج قبل از نصب ۳۱
۲-۷-۲- برنامه قرائت کشیدگی سنج ۳۱
۲-۸- تفسیر نتایج داده های کشیدگی سنج ۳۲
۲-۸-۱- کشیدگی سنج تاج تونل ۳۲
۲-۹-۲- کشیدگی سنج های اطراف تونل ۳۴
۲-۱۰- نتیجه گیری ۳۷
فصل سوم ۳۹
تحلیل برگشتی خط ۲ مترو مشهد ۳۹
۳-۱- مقدمه ۴۰
۳-۲- روش تحلیل برگشتی ۴۱
۳-۳- سابقه علمی تحلیل برگشتی ۴۳
۳-۴- تحلیل برگشتی و تحلیل معمولی ۴۵
۳-۵- فرضیه های متداول در تحلیل برگشتی ۵۰
۳-۵-۱- انتخاب روش عددی مناسب ۵۲
۳-۵-۲- قسمت های مدل شده ۵۲
۳-۵-۳- شرایط مرزی در مدل ۵۲
۳-۵-۴- تعیین پارامترهای مجهول ۵۳
۳-۵-۵- مدل رفتاری ۵۳
۳-۵-۶- انتخاب نرم افزار برای تحلیل برگشتی ۵۳

۳-۶- انواع روش های تحلیل برگشتی ۵۳
۳-۶-۱- تحلیل برگشتی معکوس ۵۴
۳-۶-۲- تحلیل برگشتی مستقیم ۵۷
۳-۶-۳- تحلیل برگشتی به روش قطعی و احتمالاتی ۵۹
۳-۶-۴- تحلیل برگشتی جستجو مستقیم با به کارگیری روش بهینه سازی ۶۱
۳-۶-۵- تحلیل برگشتی هوشمند ۶۶
۳-۷- تحلیل برگشتی جابجایی ها برای دست یابی به مدول تغییر شکل و نسبت تنش ها ۶۸
۳-۷-۱- روند تحلیل برگشتی ۶۹
۳-۸- نتیجه گیری ۷۴
فصل چهارم ۷۷
تحلیل پایداری تونل خط ۲ مترو مشهد ۷۷
۴-۱- مقدمه ۷۸
۴-۲- مدل سازی ۷۸
۴-۳- انتخاب مناسب ترین روش عددی ۷۹
۴-۴- مدل سازی دو بعدی یا سه بعدی ۷۹
۴-۵- نرم افزار FLAC3D ۸۰
۴-۶- مراحل مدل سازی در مکانیک خاک ۸۱
۴-۸- مدل سازی تونل خط ۲ مترو مشهد با استفاده از نرم افزار FLAC 3D ۸۲
۴-۸-۱- هندسه مدل ۸۲
۴-۸-۲- تعیین مدل رفتاری و تخصیص خواص مواد ۸۳
۴-۸-۳- شرایط مرزی و اولیه ۸۳

۴-۸-۴- ایجاد تعادل اولیه در مدل ۸۴
۴-۸-۴- حفر تونل ۸۵
۴-۹- بررسی پایداری تونل خط دو مترو مشهد در مقطع مورد نظر ۸۶
۴-۹-۱- کنترل پایداری با کرنش بحرانی ۸۶
۴-۱۰- نتیجه گیری ۸۹
فصل پنجم ۹۱
نتیجه گیری و پیشنهادها ۹۱
۵-۱- نتیجه گیری ۹۲
۵-۲- پیشنهادها ۹۲
منابع: ۹۵

فهرست شکل ها

شکل ۲-۱- کشیدگی سنج کاوشگر با کاوه ی مغناطیسی Soil Instruments ۱۵
شکل ۲-۲- نحوه قرارگیری کشیدگی سنج درون گمانه ۱۶
شکل ۲-۳- طرح شماتیک کشیدگی سنج ثابت درون گمانه ای تک نقطه ای ۱۸
شکل ۲-۴- طرح شماتیکی از شیوه های اتصال با پوسته منبسط شونده در نقاط اندازه گیری ۲۰
شکل ۲-۵- شیوه اتصال دوغابی نقاط اندازه گیری ۲۱
شکل ۲-۶- سیستم هیدرولیکی برای گیرداری نقاط اندازه گیری ۲۲
شکل ۲-۷- کشیدگی سنج مدفون با نقاط گیردار صفحه مدفون ساخت Sisgeo ۲۲
شکل ۲-۸- کشیدگی سنج میله ای با نقاط گیرداری بالنی ساخت شرکت Interfels ۲۳
شکل ۲-۹- انواع کشیدگی سنج میله ای با نقاط درگیری مختلف ساخت شرکت Geokon ۲۴
شکل ۲-۱۰- انواع کشیدگی سنج سیمی ۲۶
شکل ۲-۱۱- طرح شماتیک کشیدگی سنج سطح شیبدار ۲۷
شکل ۲-۱۲- کشیدگی سنج مدل EDS_70V ۲۸
شکل ۲-۱۳- موقعیت نصب کشیدگی سنج نسبت به تونل ۳۰
شکل ۲-۱۵- تغییرات کشیدگی سنج MUR2- MPBX 00+649C بر حسب کیلومتراژ حفاری ۳۴
شکل ۲-۱۶- تغییرات کشیدگی سنج MUR2- MPBX 00+649R ۳۵
شکل ۲-۱۷- تغییرات کشیدگی سنج MUR2- MPBX 00+649R برحسب کیلومتراژ حفاری ۳۶
شکل ۲-۱۸- تغییرات کشیدگی سنج MUR2- MPBX 00+649L ۳۶
شکل ۲-۱۹- تغییرات کشیدگی سنج MUR2- MPBX 00+649L برحسب کیلومتراژ حفاری ۳۷
شکل ۳-۱- ارتباط بین تحلیل معمولی و برگشتی ۴۶
شکل۳-۲- مقایسه بین تحلیل عادی و برگشتی ۴۷

شکل ۳-۳- مراحل طراحی و اجرای یک ساختار ۴۹
شکل ۳-۴- طرح کلی روش بهینه سازی تکرار ۶۲
شکل۳-۵- فرایند جستجو نقطه بهینه ۶۳
شکل ۳-۶- طرح اولیه از روش جستجوی الگویی ۶۴
شکل ۳-۷- روش مورد استفاده در برنامه BMP90 ۶۷
شکل ۳-۹- فرایند جستجو نقطه بهینه در روش جستجوی تک متغیره جایگزین به ازای تغییراتE و K ۷۱
شکل ۳-۱۰- تحلیل برگشتی پارامتر مدول تغییر شکل پذیری ۷۱
شکل ۳-۱۱- تحلیل برگشتی پارامتر نسبت تنش ها ۷۲
شکل ۳-۱۲- نمودار تابع خطا به ازای تعداد گام تکرار ۷۲
شکل ۳-۱۳- تغییرات تابع خطا در برابر نسبت تنش ها ۷۳
شکل ۳-۱۴- تغییرات تابع خطا در برابر مدول تغییر شکل پذیری ۷۳
شکل ۴-۱- هندسه تونل متروی خط ۲ مشهد ۸۲
شکل ۴-۲- نمودار نیروهای نامتعادل کننده پس از تعادل اولیه ۸۵
شکل ۴-۳- تونل حفر شده تا مقطع مورد نظر ۸۶
شکل ۴-۴- مقادیر کرنش برشی تونل در مقطع مورد مطالعه ۸۸

فهرست جدول ها

جدول ۲-۱- مشخصات کشیدگی سنجه ای نصب شده در خط ۲ مترو مشهد..... ۲۹

جدول ۳-۱- پارامترهای معلوم تحلیل برگشتی..... ۶۹

جدول ۳-۲- مراحل تعیین پارامترهای E و K در فرایند جستجوی تک متغیره جایگزین..... ۷۰

جدول ۳-۳- مقایسه مقادیر اندازه گیری شده با مقادیر مدل شده..... ۷۰

فصل اول

کلیات تحقیق

۱-۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر، تحلیل‌های پایداری فضاهای زیرزمینی، پی[1] سدها، شیروانی‌های سنگی و دیگر پروژه‌های با استفاده از روش‌های عددی از قبیل روش المان محدود[2] روش المان مرزی[3] و روش المان مجزا[4] توسعه قابل توجهی یافته است. ولی کارایی این روش‌ها به تنهایی با وجود دقت فراوانی که در محاسبه جابجایی‌ها و توزیع تنش دارند به دلیل غیر قابل اعتماد بودن داده‌های ورودی که همان پارامترهای ژئومکانیکی و ساختار زمین‌شناسی زمین است، در پیش‌بینی رفتار مکانیکی زمین و ارزیابی پایداری مورد تردید قرار می‌گیرند. به عبارت دیگر اعتبار پیش‌بینی‌ها و ارزیابی‌های انجام شده به کمک روش‌های عددی بستگی به دقت داده‌های ورودی پارامترهای ژئومکانیکی زمین و اینکه این پارامترها تا چه حد رفتار واقعی زمان است، دارد. اندازه‌گیری کمی و دقیق پارامترهای ژئومکانیکی و ساختار زمین‌شناسی خاک، حالت اولیه تنش‌ها در منطقه، وضعیت آب زیرزمینی و ... بسیار دشوار است (امامی تبریزی، ۱۳۷۶).

برای غلبه بر این مشکلات، رفتارسنجی[5] در حین و بعد از اجرای پروژه انجام می‌شود و این نه تنها به خاطر کنترل پایداری سازه بلکه برای تخمین مجدد داده‌های ورودی مربوط به پارامترهای زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی است که در تحلیل طراحی مورد استفاده قرار می‌گیرند؛ یعنی پارامترهای اولیه مورد استفاده در طراحی سازه‌ها با استفاده از نتایج حاصل از رفتارسنجی مجدد ارزیابی می‌شوند و اگر لازم باشد روش ساخت یا حفاری تونل اصلاح می‌شود (بلیغ، ۱۳۷۹).

[1] Foundation
[2] Finite Element Method
[3] Boundary Element Method
[4] Distinct Element Method
[5] Monitoring

۱-۲- ضرورت انجام تحقیق

یکی از مشکلات ساخت فضاهای زیرزمینی، پیش‌بینی رفتار پیچیده خاک اطراف آن است که با تئوری‌ها و مدل‌های موجود از قبیل المان محدود و المان مجزا و ... قابل‌بیان نیست و از طرف دیگر ویژگی‌های خاص این توده‌ها است؛ زیرا خاک اولا یک محیط کاملا غیرهمسان است، ثانیا رفتار خاک یک رفتار کاملا غیرخطی است. اگرچه امروزه رفتارهای غیر خطی زیادی برای خاک تعریف شده، ولی در واقع نمی‌توانند رفتار واقعی غیر خطی تنش و کرنش را در خاک پیش‌بینی کنند. همچنین پارامترهای ژئوتکنیکی به دست آمده از آزمایش‌های آزمایشگاهی و برجا با توجه به تغییرات طبیعی خواص توده‌ها در اطراف حفاری‌ها دارای پراکندگی محسوسی می‌باشند. همچنین رفتار خاک باید با توجه به شکل و ابعاد مقطع حفاری بررسی شوند. این بدان معناست که نتایج حاصل از آزمایش‌های برجا با قطعیت نمی‌تواند به طور مستقیم به عنوان داده‌های ورودی طراحی مورد استفاده قرار گیرد. نیاز به آزمایش‌ها و اندازه‌گیری‌های همزمان با حفاری ما را به‌سوی رفتارسنجی و استفاده از ابزار دقیق و تحلیل برگشتی[1] سوق می‌دهد (قدیری،۱۳۸۹).

اگرچه قبل از حفر یک سازه زیرزمینی اطلاعات نسبتا مناسبی ممکن است برای طراحی روش اجرا و سیستم نگه‌دارنده در دست باشد اما معمولا این اطلاعات کافی نیست و بنابراین با استفاده از روش تحلیل برگشتی، می‌توان پارامترهای ژئومکانیکی پیش‌بینی شده را ارزیابی کرد و پس از جمع‌آوری اطلاعات لازم آن را برای کل سازه زیرزمینی تعمیم داد. در بسیاری از طرح‌ها با انجام رفتارسنجی مناسب می‌توان از وقوع مشکلات احتمالی جلوگیری کرد؛ بنابراین بررسی تغییرات در وضعیت زمین با استفاده از ابزار دقیق[2] و تحلیل برگشتی داده‌های ابزار دقیق اطلاعات لازم را در این مورد فراهم می‌سازد.

[1] Back Analysis
[2] Instrument

به دلیل ایجاد نشست در پروژه خط یک مترو مشهد و خسارت‌های به بار آورده بر ساختمان‌ها و خیابان‌ها در بعضی نقاط پروژه تصمیم بر آن شد برای به حداقل رساندن این خسارت‌ها در پروژه خط دو مترو مشهد از ابزار دقیق استفاده شود. هزینه انجام یک برنامه رفتارنگاری حدود یک درصد کل هزینه اجرای پروژه است ولی صرف این هزینه می‌تواند از تحمیل هزینه‌های هنگفت ناشی از تخریب و شکست ناگهانی پروژه و همچنین آسیب به پروژه‌های در حال بهره‌برداری مجاور جلوگیری کند. همچنین با رسیدن به اندرکنش واقعی زمین و تونل می‌توانیم مناسب‌ترین روش طراحی و ساخت را استفاده کنیم.

۱-۳- اهداف تحقیق

اطمینان از صحت انتخاب پارامترهای مقاومتی خاک به دست آمده از مطالعات ژئوتکنیکی یکی از موضوعات مهم در طرح‌های عمرانی به خصوص در حفر تونل است. بررسی رفتار خاک در حین حفاری و اجرای طرح به خصوص در زمین‌های ضعیف از روش‌های جدید در اجرای تونل است. هدف از انجام این تحقیق آشنایی با انواع روش‌های تحلیل برگشتی به منظور تعیین پارامترهای ژئومکانیکی خاک با استفاده از نتایج حاصل از رفتارسنجی و مقایسه آن با نتایج روش‌های عددی به منظور بازنگری در پارامترهای ورودی است.

۱-۴- روش تحقیق

تحلیل و بررسی پایداری یکی از اصول مهندسی مکانیک خاک در پروژه‌های زیرزمینی و یا هر سازه احداث شده در خاک است. ارائه روش مناسب حفاری، نوع و سرعت مجاز حفاری و همچنین به کارگیری سیستم نگهداری اقتصادی‌تر در عین حفظ ایمنی از مسائل مورد بررسی در تحلیل پایداری است.

در این تحقیق از روش تحلیل برگشتی مستقیم که بر اساس کاهش مقدار اختلاف بین مقدار جابجایی اندازه‌گیری شده با فرض پارامترهای مجهول استوار است. تحلیل برگشتی مستقیم سه الگوریتم دارد که در این تحقیق از الگوریتم تک متغیره جایگزین استفاده می‌شود که در این الگوریتم در زمان واحد چند پارامتر مجهول می‌تواند تغییر کند. این مقدار تا زمانی که تابع خطا به مقادیر حدی خود برسد ادامه پیدا می‌کند. تحلیل برگشتی بر روی جابجایی‌های حاصل از کشیدگی سنج[1] که توسط شرکت سنگ آزمای ساوند برداشت شده انجام می‌شود.

برای تحلیل پایداری و طراحی سیستم از روش‌های عددی استفاده می‌شود که با توجه به پیوسته بودن محیط از نرم‌افزار FLAC3D بر مبنای روش عددی تفاضل محدود و روش ارائه شده توسط ساکورای[2] استفاده می‌شود. در اینجا تحلیل مدل به‌صورت الاستیک انجام می‌شود و همچنین برای مدل‌سازی رفتار الاستیک مصالح خاک از مدل موهر-کولمب[3] استفاده می‌شود. با شبیه‌سازی کردن محیط بر روی نرم‌افزار FLAC3D و اعمال تنش‌ها، با استفاده از معیار شکست‌های موجود پایداری تونل تحلیل می‌شود.

۱-۵- سوابق مطالعات انجام‌شده

طی سال‌های متمادی محققان زیادی در نقاط مختلف دنیا مطالعاتی را به منظور رفتارسنجی در نقاط مختلف انجام داده‌اند. به دلیل گستردگی بحث رفتارسنجی تنها به چند نمونه در زیر اشاره شده است و موارد مهم در فهرست منابع در انتهای این پایان‌نامه آورده شده است:

[1] Extensometer
[2] Sakurai
[3] Mohr-Coulomb Model

۱- ذکریا قدیری (۱۳۸۹)، تحلیل پایداری مترو خط ۲ قطار شهری کرج را با استفاده از نتایج رفتارسنجی و تحلیل برگشتی داده‌های همگرایی سنج[1] و نشست سنج[2]را به کمک نرم افزار FLAC 2D انجام داده است.

۲- فرشاسب جمشاسب (۱۳۸۵)، تحلیل پایداری تونل‌های دوقلوی قطعه اول جنوبی متروی اصفهان با پارامترهای ژئومکانیکی که از آزمایش‌های ژئوتکنیکی بر روی مغزه‌ها به دست آمده بود را به روش تجربی و عددی انجام داده است. سرانجام صحت مطالعات انجام‌گرفته با استفاده از تحلیل برگشتی داده‌های رفتارسنجی کنترل شده است.

۳- سعید فطورچی (۱۳۸۲)، رفتار نگاری و تحلیل پایداری تونل خماری را با استفاده از روش‌های تجربی، مشاهده‌ای و عددی انجام داده است.

۴- ژانگ[3] و همکاران در سال ۲۰۰۵ روش تحلیل برگشتی برای اندازه‌گیری مدول تغییر شکل توده سنگ و تنش برجای افقی در تونل را ارائه داده‌اند.

۵- اورسته[4]در سال ۲۰۰۵ روش تحلیل برگشتی برای بهبود فهم رفتار سنگ در ساخت‌گاه‌های زیرزمینی را ارائه داده است.

۶- محمود بلیغ (۱۳۷۹)، تحلیل پایداری تونل تالون با استفاده از تحلیل برگشتی داده‌های همگرایی‌سنج و به‌کارگیری روش تحلیل برگشتی مستقیم انجام داده است.

۱-۶- ساختار تحقیق

تحقیق حاضر مشتمل بر پنج فصل است که محتویات هر فصل در زیر به اختصار توضیح داده می‌شود:

فصل حاضر که شامل کلیاتی از روند تحقیق، اهداف تحقیق و ضروریات تحقیق است.

[1] Convergence Gage
[2] Settlement Meter
[3] Zhang
[4] Oreste

فصل دوم تحت عنوان مطالعات رفتارسنجی به بررسی رفتارسنجی و پارامترهای اصلی که در یک طرح مورد اندازه‌گیری قرار می‌گیرد، پرداخته می‌شود. در این فصل مقطع ابزار دقیقی که در تونل خط ۲ مترو مشهد جهت تحلیل برگشتی مورد استفاده قرار گرفته، بررسی و تفسیر شده است.

فصل سوم تحت عنوان تحلیل برگشتی خط ۲ مترو مشهد به تعریف تحلیل برگشتی، مقایسه آن با تحلیل عادی و با استفاده از مدل‌سازی سه بعدی تونل خط ۲ مترو مشهد با استفاده از نرم افزار Flac 3D، تحلیل برگشتی سه بعدی جابجایی‌ها با استفاده از روش بهینه‌سازی تک متغیره متناوب، انجام گرفته و مقدار مدول تغییر شکل پذیری (E) و نسبت تنش افقی به قائم (K) محاسبه شده است (در این پایان‌نامه برای مدول تغییر شکل از E استفاده شده است).

فصل چهارم تحت عنوان تحلیل پایداری تونل خط ۲ مترو مشهد با استفاده از روش کنترل مستقیم کرنش به عنوان یک روش مشاهده‌ای که به طور مستقیم از نتایج جابجایی‌ها استفاده می‌نماید، به منظور تحلیل پایداری تونل خط ۲ مترو مشهد استفاده شده است.

فصل پنجم تحت عنوان نتیجه‌گیری و پیشنهادها، تحقیق انجام شده را مورد نتیجه‌گیری قرار می‌دهد و پیشنهادهای کاربردی را ارائه می‌دهد.

۱-۷- نتیجه گیری

به دلیل آنکه ارزیابی کمی پارامترهای زمین با دقت کافی بسیار مشکل است، با استفاده از رفتارسنجی و تحلیل برگشتی سعی در یافتن مقادیر واقعی پارامترهای زمین داریم. در بسیاری از طرح‌ها با انجام رفتارسنجی مناسب می توان از وقوع مشکلات احتمالی جلوگیری کرد. از سوی دیگر در مواردی که اجرای یک طرح زیرزمینی با مشکلات پیش‌بینی نشده‌ای مثل ناپایداری مواجهه می‌شود، با رفتارسنجی می توان به علت آن پی برد.

در این فصل مطالعات کلی در مورد این تحقیق، اهداف تحقیق، ضروریات تحقیق، روش انجام تحقیق و ساختار کلی تحقیق مورد مطالعه قرارگرفته است.

در فصل دوم به معرفی رفتارسنجی، معرفی ابزار دقیق و تعریف شرایط و نوع ابزار دقیق استفاده شده در مقطع مورد مطالعه در خط ۲ مترو مشهد می‌پردازیم.

فصل دوم

مطالعات رفتارسنجی خط ۲ مترو مشهد

۲-۱- مقدمه

در طراحی یک فضای زیرزمینی بسیاری از مجهولات به وسلیه خصوصیات زمین‌شناسی و ژئومکانیکی زمین مشخص می‌شود و این با طراحی یک سازه مثل پل که در آن بارها و خصوصیات مکانیکی مواد کاملا مشخص است، بسیار متفاوت است. در طراحی فضاهای زیرزمینی پس از در نظر گرفتن یک مدل مکانیکی با توجه به تست‌های برجا و آزمایشگاهی، خصوصیات مکانیکی زمین از قبیل مدول یانگ[۱]، ضریب پواسون[۲]، چسبندگی[۳] و زاویه اصطکاک داخلی[۴] تعیین می‌شود. سپس با توجه به این داده‌های ورودی تحلیل طراحی توسط روش اجزاء محدود، المان مجزا، المان مرزی یا روش‌های دیگر انجام می‌شود ولی رفتار واقعی فضاهای زیرزمینی با آنچه که روش‌های عددی نشان می‌دهد کاملا متفاوت است، بنابراین با انجام رفتارسنجی و توجه به رفتار واقعی زمین باید خصوصیات مکانیکی زمین در مدل تصحیح شود.

داده‌های پردازش شده رفتارسنجی اطلاعات با ارزشی در ارتباط با وضعیت تنش و محدودهٔ خاک در اطراف فضای زیرزمینی و زمین پیرامون آن در شرایط اجرایی است، بدون تردید با تحلیل برگشتی این داده‌ها می‌توان پارامترهای ژئومکانیکی واقعی زمین را ارزیابی نموده و این واقع بینی مهمترین مزیت روش‌های تحلیل برگشتی داده‌های رفتارسنجی است.

در این فصل ابتدا به اهداف و فواید رفتارسنجی و ویژگی‌های یک طرح ابزاربندی مناسب پرداخته شده سپس انواع کشیدگی‌سنج و روش‌های اندازه‌گیری به کمک کشیدگی‌سنج شرح داده می‌شود.

[1] Young Modulus
[2] Poison Ratio
[3] Cohesion
[4] Friction

۲-۲- اهداف رفتارسنجی

هدف اصلی رفتارسنجی، تعیین شرایط پایداری در یک سازه زیرزمینی به کمک تهیه اطلاعات کمی بر اساس رفتارسنجی زمین و سیستم نگهدارنده تونل است. مهمترین اهداف رفتارسنجی در تونل‌ها عبارتند از (بلیغ، ۱۳۷۹):

۱. تامین ایمنی در طی عملیات با دادن اخطار به موقع در مورد حرکت بیش از حد زمین، فشار آب زیرزمینی یا بارهای وارده بر عناصر نگهداری.
۲. ثبت مقادیر طبیعی و نیز تغییرات ایجاد شده در پارامترهای ژئومکانیکی.
۳. کنترل صحت فرضیات، مدل‌های فرضی و خواص خاک استفاده شده در محاسبات طراحی
۴. بررسی عملکرد سیستم نگهداری.
۵. بررسی تاثیر عملیات اجرایی در محیط اطراف.
۶. پیش‌بینی رفتار زمین.
۷. طراحی و تحلیل پایداری تونل.

از نظر زمان رفتارسنجی نیز می‌توان اهداف رفتارسنجی را به شرح زیر تقسیم‌بندی کرد:

الف) قبل از اجرا:

هدف از اقدامات این مرحله، تعیین اطلاعات مورد نیاز برای طراحی فضای زیرزمینی است که از آن جمله می‌توان به ویژگی‌هایی همچون مدول تغییر شکل زمین و وضعیت تنش‌های برجا اشاره کرد.

ب) در حین اجرا

- سنجش و ارزیابی آن دسته از فرضیات طراحی که در هنگام طراحی، ساده‌سازی شده و طراحی را محافظه‌کارانه نموده است.

- ارزیابی عملکرد و کنترل کیفیت.
- کمینه نمودن خسارت‌های وارد به تاسیسات و سازه‌های مجاور.
- کنترل پیشرفت بهینه طرح.
- انتخاب روش مناسب اصلاح و بهسازی.

ج) بعد از اجرا

پس از اتمام هر طرح ژئوتکنیکی لازم است، رفتار آن تا زمان حصول اطمینان از عدم توسعه دراز مدت ناپایداری کنترل شود. به منظور کنترل رفتار کلی سازه در طول بهره‌برداری، اندازه‌گیری و مراقبت بر واکنش و پاسخ سازه و عملیات‌های مجاور سازه مورد نظر ضرورت می‌یابد.

همچنین هدف از تحلیل داده‌های پردازش شده ابزاردقیق، شناخت رفتار و عکس‌العمل زمین در شرایط حاضر و نیز کمک به پیش‌بینی رفتار احتمالی آن در آینده است. این رفتارسنجی می‌تواند اطلاعات با ارزشی در زمینه‌های زیر را فراهم سازد:

۱- ارزیابی پایداری یا ناپایداری توده خاک پیرامون تونل.

۲- تعیین میزان و آهنگ جابجایی یا تغییرشکل در توده خاک پیرامون تونل.

۳- تعیین فشار وارده از طرف توده خاک بر سیستم نگهداری تونل.

۴- تخمین جهت و نسبت تنش‌های موجود در محل.

۵- تخمین پارامترهای رفتاری خاک در شرایط واقعی ساخت‌گاه با استفاده از تحلیل برگشتی.

۲-۳- ویژگی های یک طرح ابزاربندی مناسب

به طور کلی یک طرح ابزاربندی و رفتارسنجی باید دارای شرایط زیر باشد:

۱. نتایج به دست آمده باید معرف رفتار کامل و واقعی سازه مورد نظر و محیط درون‌گیر آن باشد.

۲. نقاط اندازه‌گیری باید توزیع مناسبی در محیط داشته باشند.

۳. تعداد اندازه‌گیری‌ها باید به حد کافی زیاد باشد تا تجزیه و تحلیل نتایج بر مبنای اطلاعات کامل صورت گیرد.

۴. هزینه‌های مربوطه در حد معقول و منطقی باشد(بلیغ، ۱۳۷۹).

برای اینکه یک سیستم ابزاربندی بتواند تمامی وظایف خود را به طور اقتصادی و قابل اطمینان انجام دهد باید شرایط زیر را در حد قابل قبولی دارا باشد:

۱. نصب آسان، حتی در شرایط نامناسب یا در شرایطی که کارهای دیگر نیز در حال انجام است.

۲. برخوردار بودن از مقاومت و استحکام کافی به گونه‌ای که دستگاه بتواند در دوره زمانی که در طی پروژه به آن نیاز است کیفیت کار خود را حفظ کند.

۳. برخوردار بودن از دقت و حساسیت کافی برای اهداف و مقاصد مورد نظر و همچنین امکان اندازه‌گیری مکرر.

۴. قابل اغماض بودن اثرات متقابل که بین سیستم ابزاربندی و فعالیت‌های دیگر به وجود می-آید(بلیغ،۱۳۷۹).

۲-۴- انواع روش های اندازه گیری در تونل

مهم‌ترین اندازه‌گیری‌هایی که در تونل انجام می‌شود عبارتند از:

۱. اندازه‌گیری تغییر مکان نقاط درون دیواره با کشیدگی‌سنج

۲. اندازه‌گیری همگرایی با همگرایی‌سنج

۳. اندازه‌گیری نشست

۴. اندازه‌گیری بار به وسیله بارسنج[1]

۵. اندازه‌گیری تنش

[1] Load Cell

اکنون با توجه به نوع اندازه‌گیری‌های انجام شده در تونل خط دو متروی مشهد، اندازه‌گیری تغییر مکان با کشیدگی‌سنج شرح داده می‌شود.

۲-۵- اندازه گیری تغییر مکان با کشیدگی سنج

کشیدگی‌سنج ابزاری است که برای اندازه‌گیری جابجایی‌های سطحی و عمقی توده‌ای از مصالح استفاده می‌گردد. کشیدگی‌سنج‌ها برحسب نوع قرارگیری در توده مصالح، به دو دسته کشیدگی‌سنج گمانه‌ای[۱] و کشیدگی‌سنج مدفون[۲]، تقسیم بندی می‌شوند. کشیدگی سنج‌ها بسته به تعداد نقاط اندازه‌گیری (نقاط نشانه)، به انواع تک نقطه‌ای[۳] (SP) و چند نقطه‌ای[۴] (MP) تقسیم می‌شوند (احمدی و شاهوردیلو ۱۳۸۹).

انتخاب نوع کشیدگی‌سنج، پس از بررسی‌های فنی و اقتصادی کارشناسان خبره ابزار دقیق صورت می‌پذیرد. انتخاب مکان، راستا، طول و تعداد نقاط اندازه‌گیری برای کشیدگی‌سنج، بستگی به ملزومات ساختمانی و ژئوتکنیکی طرح دارد. در طراحی کشیدگی‌سنج عواملی چون: جهت و مقدار حرکات پیش‌بینی شده، موقعیت ابزار، علت نصب سایر ابزارهای دقیق، روش‌های اجرا و زمان اجرای عملیات های ساختمانی قبل، حین و بعد از نصب ابزار تاثیر می‌گذارند.

۲-۵-۱- کشیدگی سنج گمانه ای

کشیدگی‌سنج گمانه‌ای که درون گمانه حفاری شده در سازه ژئوتکنیکی قرار می‌گیرد به دو گروه تقسیم می‌شوند (احمدی و شاهوردیلو ۱۳۸۹):

۱. کشیدگی‌سنج‌های کاوشگر[۵]
۲. کشیدگی‌سنج‌های ثابت درون گمانه‌ای[۱]

[1] Borehole Extensometer
[2] Embedded Extensometer
[3] Single Point
[4] Multi Point
[5] Prob Extensometer

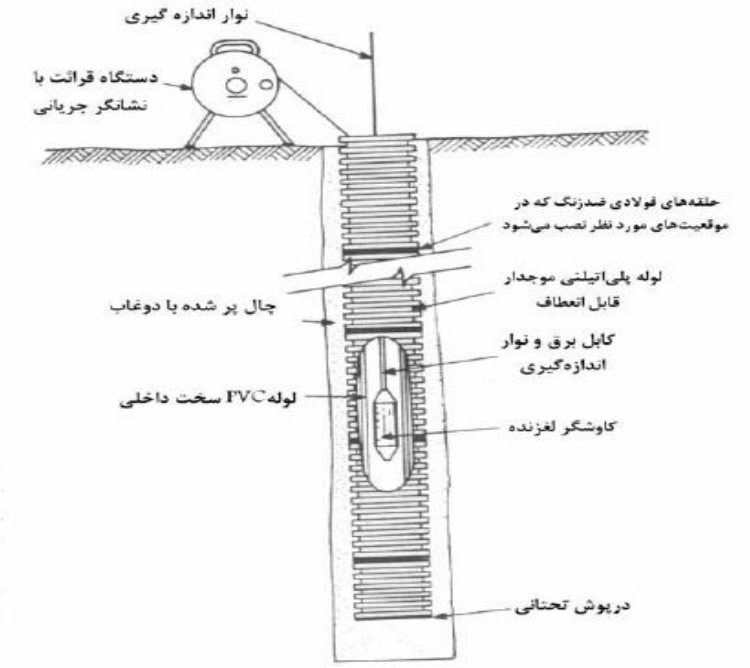
۲-۵-۱-۱- کشیدگی سنج های کاوشگر

کشیدگی‌سنج کاوشگر ابزاری است که تغییرات فاصله بین دو یا چند نقطه در طول محور مشترک گمانه با استفاده از کاوه رفتارنگاری می‌کند (شکل ۲-۱).

شکل ۲-۱- کشیدگی سنج کاوشگر با کاوه‌ی مغناطیسی Soil Instruments.

نقاط اندازه‌گیری در طول لوله راهنما با شاخصه‌های مکانیکی، الکتریکی یا مغناطیسی، توسط کاوشگر شناخته می‌شوند (شکل۲-۲) و فاصله بین آن‌ها با اندازه‌گیری موقعیت کاوشگر تعیین می-گردد (Dunnicliff, 1993).

[1] Fixed Borehole Extensometer



شکل ۲-۲- نحوه قرارگیری کشیدگی‌سنج درون گمانه (Dunnicliff, 1993).

برای تعیین اطلاعات تغییر مکان مطلق، بایست یکی از نقاط اندازه‌گیری در مکانی باشد که تحت تاثیر تغییر مکان قرار نگیرد یا مکان آن با استفاده از یک نقطه مبنا با روش نقشه‌برداری قابل اندازه-گیری باشد. نکته قابل توجه آن‌که در صورت استفاده از روش نقشه‌برداری برای تعیین تغییر مکان مطلق به دقت روش نقشه‌برداری بستگی پیدا خواهد کرد.

لوله راهنما ممکن است برای اندازه‌گیری نشست یا بالاآمدگی، بطور قائم و یا برای اندازه‌گیری تغییر مکان‌های ثانویه، افقی یا مایل نصب شود.

از کاربردهای رایج کشیدگی‌سنج کاوشگر رفتارنگاری فشردگی قائم در داخل توده‌های خاکی، نشست در طول حفاری‌های زیرزمینی، بالاآمدگی در کف حفاری‌های روباز و تغییر شکل‌های ثانویه در خاکریزها است. در شرایطی که محدودیت تعداد نقاط اندازه‌گیری در کشیدگی‌سنج درون گمانه‌ای ثابت وجود داشته باشد کشیدگی‌سنج کاوشگر توصیه می‌شود. در این روش مجموع هزینه‌های نصب

و قرائت در طولانی مدت، کمینه می‌شود اما معمولا اندازه‌گیری از دقت کمتری نسبت به اندازه‌گیری-های ثابت درون گمانه‌ای برخوردار است.

کشیدگی‌سنج‌های کاوشگر الکتریکی و مکانیکی انواع مختلفی دارند که هر یک مزایا و محدودیت‌های خاصی دارند که با توجه به منبع (Dunnicliff, 1993) می‌توان اطلاعات جامع‌تری در مورد آن‌ها بدست آورد.

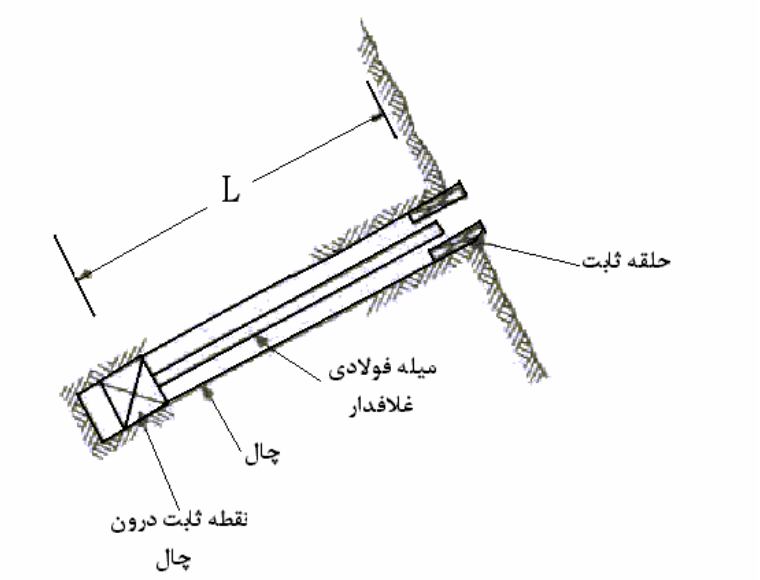
۲-۵-۱-۲- کشیدگی سنج ثابت درون گمانه ای

این کشیدگی‌سنج غالبا درون گمانه‌ای در خاک نصب می‌گردد تا تغییر فاصله نصبی بین دو یا چند نقطه در طول محور گمانه را بدون استفاده از کاوشگر اندازه‌گیری نماید. هر گاه موقعیت یکی از نقاط اندازه‌گیری نسبت به یک نقطه مبنا معین باشد می‌توان تغییر مکان مطلق را نیز با استفاده از این ابزار بدست آورد (احمدی و شاهوردیلو ۱۳۸۹).

در فضاهای زیرزمینی‌کشیدگی‌سنج را می‌توان از سطح زمین (اگر روباره فضای زیرزمینی کم باشد)، از تونل‌های دسترسی، سایر فضاهای زیرزمینی مجاور یا از داخل خود فضای زیرزمینی نصب کرد. اگر ابزار قبل از حفر فضای زیرزمینی نصب شود، می‌توان کل جابجایی حاصل از حفر فضای زیرزمینی (تغییر مکان مطلق) را اندازه‌گیری کرد. به این ترتیب امکان اندازه‌گیری بخش همگرایی حاصل از گذشتن سینه‌کار بیشتر فراهم می‌گردد و امکان مقایسه مناسب‌تر نتایج تحلیل عددی با مقادیر واقعی فراهم است.

از مهم‌ترین کاربردهای این ابزار، رفتارنگاری تغییر مکان‌های زمین پیرامون فضاهای زیرزمینی و سطوح شیب‌دار است. به علاوه این ابزار برای رفتارنگاری نشست‌های ناشی از متراکم شدن خاک، بالاآمدگی کف در حفاری‌های روباز و کرنش در سازه‌های بتنی نیز استفاده می‌شود.

اساس عملکرد کشیدگی‌سنج‌های ثابت درون گمانه‌ای در شکل (۲-۳) نشان داده شده است.



شکل ۲-۳- طرح شماتیک کشیدگی‌سنج ثابت درون گمانه‌ای تک نقطه‌ای (Dunnicliff, 1993).

تغییر فاصله نقاط اندازه‌گیری از سر کشیدگی‌سنج با یک رابط که یک سر آن‌ها به نقاط ثابت و سر دیگر آن‌ها در نزدیکی سر ابزار است با استفاده از ابزارهای مکانیکی یا انتقال دهنده‌های الکتریکی اندازه‌گیری می‌شود. می‌توان چندین نقطه درگیر در یک گمانه تعبیه کرد که هر یک به وسیله رابطی به قسمت سر گمانه ارتباط پیدا می‌کنند. در این حالت یک کشیدگی‌سنج چند نقطه‌ای به وجود می-آید. کشیدگی‌سنج‌های چند نقطه‌ای برای رفتارنگاری تغییر مکان یا الگوی کرنش در طول محور گمانه به کار می‌رود. یک کشیدگی‌سنج چند نقطه‌ای معادل چند کشیدگی‌سنج تک نقطه‌ای است که در نزدیکی همدیگر نصب شده‌اند.

کشیدگی‌سنج‌های ثابت درون گمانه‌ای از نظر نوع وسیله انتقال دهنده[1] جابجایی از نقاط ثابت به سر کشیدگی‌سنج به دو گروه میله‌ای و سیمی تقسیم می‌شوند. این ابزار از نقطه نظر نوع گیرداری نقاط ثابت به شش گروه: پوسته منبسط شونده، دوغابی، هیدرولیکی، فنری، صفحه مدفون و بالنی تقسیم‌بندی می‌شود (احمدی و شاهوردیلو ۱۳۸۹).

[1] Transducer

۲-۵-۱-۲-۱- انواع گیرداری نقاط اندازه گیری

از لحاظ نوع اتصال نقاط اندازه‌گیری می‌توان کشیدگی‌سنج‌های ثابت درون گمانه‌ای را به شش گروه زیر تقسیم‌بندی کرد:

الف) پوسته منبسط شونده

ب) دوغابی یا رزینی

ج) هیدرولیکی

د) حلقه فنری

ه) صفحه مدفون

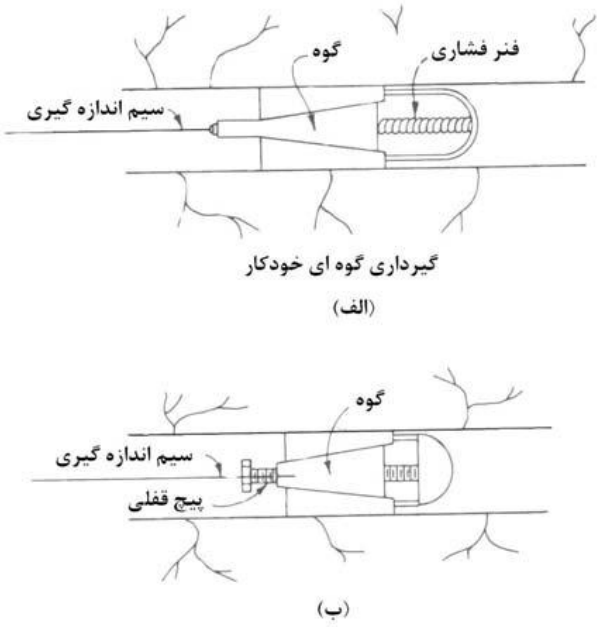
و) بالنی

انتخاب نوع و کیفیت اتصال نقاط درگیر بستگی به خصوصیات مصالح محصور کننده و نحوه حرکت‌های آتی مصالح پیرامون کشیدگی‌سنج دارد. نکته مهم آن‌که شیوه اتصال نقاط درگیر بایست به گونه‌ای باشد که کم‌ترین تاثیر را در تغییر خواص مصالح پیرامون چال ایجاد نماید به عبارت دیگر شیوه اتصال نقاط درگیری نبایستی موجب تغییر قابل توجهی در خصوصیات زمین شود. در چنین شرایطی مقادیر ثبت شده توسط ابزار، معرف رفتار زمین می‌باشند.

الف) پوسته منبسط شونده

این شیوه گیرداری جزو روش‌های مکانیکی است که بیشتر در گیرداری کوتاه مدت سنگ‌های سخت استفاده می‌شود (شکل ۲-۴). لازم به ذکر است که اگر پوسته منبسط شونده در محلی که تحت تاثیر لرزش‌های ناشی از نیروهای لحظه‌ای مانند لرزش ناشی از انفجار باشد، ممکن است پوسته در چال بلغزد یا با حرکت گوه، پوسته در داخل نشست نماید. محدودیت دیگر آن‌که در صورت استفاده از پوسته منبسط شونده دیگر هیچ پوشش محافظی برای وسیله انتقال دهنده جابجایی (میله

یا سیم) وجود نخواهد داشت و این موضوع احتمال صدمه از طرف آب یا سنگ‌های لق و سست را افزایش می‌دهد.



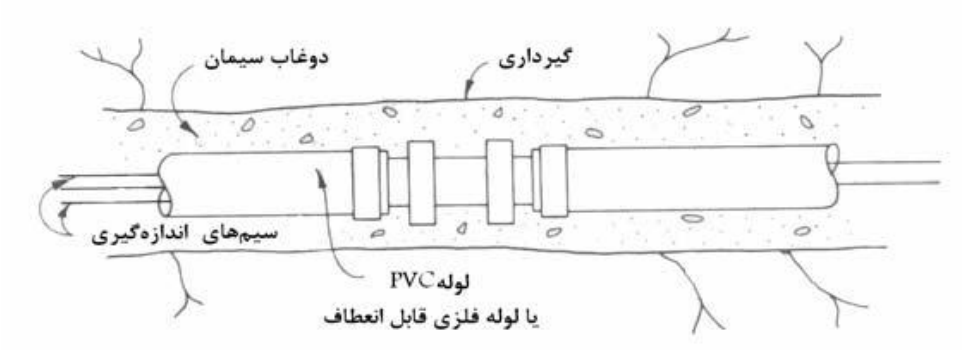
شکل ۲-۴- طرح شماتیکی از شیوه‌های اتصال با پوسته منبسط شونده در نقاط اندازه‌گیری (ASTM,1996).

ب) دوغابی یا رزینی

اتصال دوغابی، یکی از روش‌های رایج برای گیردار کردن نقاط درگیر در انواع کشیدگی‌سنج‌های ثابت است. پیش از تزریق دوغاب بایستی فاصله بین نقاط اندازه‌گیری را با لوله پی وی سی[1] به گونه‌ای عایق کرد که دوغاب به میله یا سیم انتقال دهنده جابجایی نرسد (شکل ۲-۵). در چال‌های عمیق‌تر از ۷/۵ متر به علت فشار هیدرواستاتیک دوغاب امکان نفوذ دوغاب از محل اتصالات و یا حتی تخریب خود لوله وجود دارد، لذا باید از لوله‌های پی وی سی پر شده از روغن یا لوله‌های پلی اتیلنی (PE) مقاوم و همچنین ابزار خاصی برای ایزوله کردن اتصالات استفاده شود. گیردار کردن رزینی نیز در عمل بسیار موفقیت‌آمیز بوده است.

[1] Poly Vinyl Chloride

نکته قابل توجه در شیوه دوغابی و رزینی آن است که مقاومت و قابلیت تراکم دوغاب و رزین بایست تا اندازه‌ای با خاک پیرامونش همگن باشد (ASTM,1996).

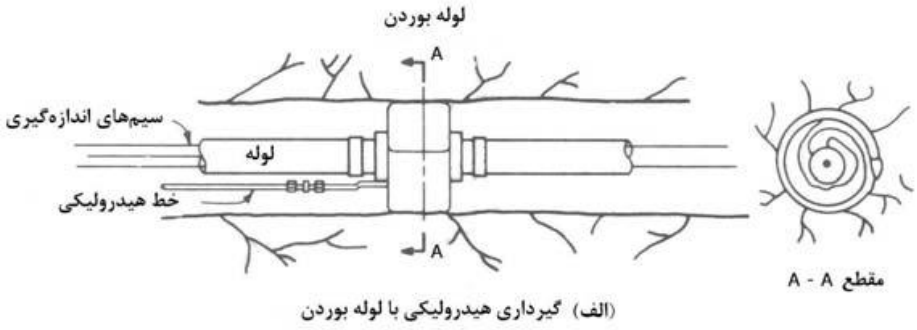


شکل ۲-۵- شیوه اتصال دوغابی نقاط اندازه‌گیری (ASTM,1996).

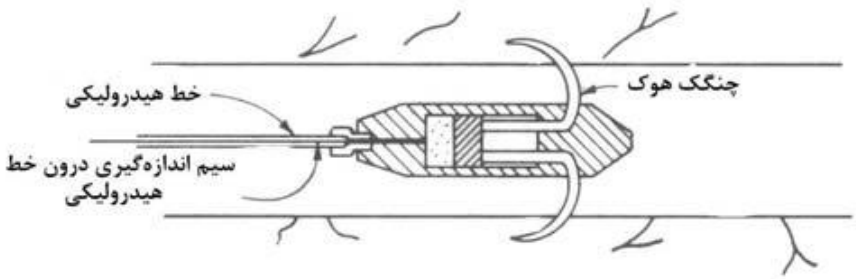
ج) سیستم هیدرولیکی

این شیوه گیرداری برای انواع خاک‌ها به طور موفقیت‌آمیزی استفاده شده است. در شکل(۲-۶) دو نوع از گیرداری هیدرولیکی نشان داده شده است.

نوع چنگکی مخصوص خاک است. مهم‌ترین عیب این روش هزینه نسبتا بالای آن است.



(الف) گیرداری هیدرولیکی با لوله بوردن



(ب) پیستون هیدرولیکی داخلی چنگک هوک را با اعمال نیرو به درون دیواره چال می‌راند

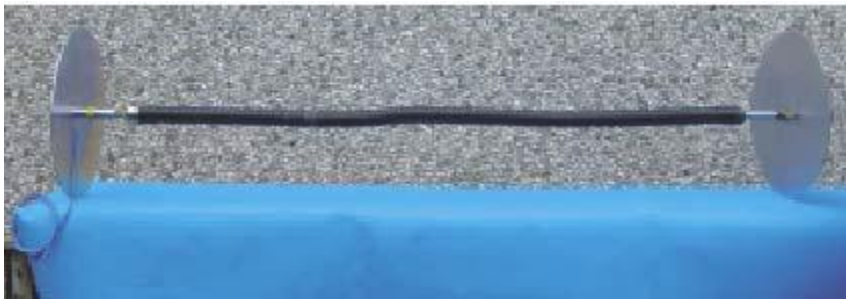
شکل ۲-۶- سیستم هیدرولیکی برای گیرداری نقاط اندازه‌گیری (ASTM,1996).

د) حلقه فنری

این روش از روش‌های مکانیکی است که برای سنگ‌های سخت استفاده می‌شود.

ه) صفحه مدفون

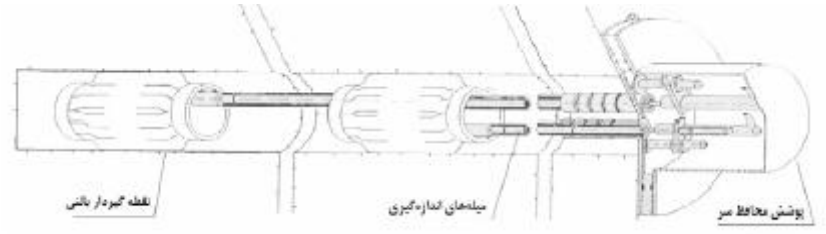
در این روش نقاط گیرداری به شکل یک صفحه نسبتاً بزرگ است که در موقعیت از پیش تعیین شده در زیر توده مصالح مدفون می‌شود. این روش در کشیدگی‌سنج‌های مدفون در زیر توده خاک‌ها کاربرد دارد (شکل ۲-۷).



شکل ۲-۷- کشیدگی‌سنج مدفون با نقاط گیردار صفحه مدفون ساخت Sisgeo

و) بالنی

این شیوه گیرداری، جزء روش‌های نسبتا جدید است که در آن برای گیرداری نقاط اندازه‌گیری از بالن‌های خاصی که در اثر ترزیق دوغاب منبسط و ثابت می‌شود استفاده شده است، (شکل ۲-۸).



شکل ۲-۸- کشیدگی‌سنج میله‌ای با نقاط گیرداری بالنی ساخت شرکت Interfels

دو مزیت عمده این روش در مقایسه با شیوه دوغابی عبارتند از:

۱. تاثیر منفی دوغاب بر روی مواد پیرامون چال تقریبا به صفر می‌رسد.
۲. عدم حساسیت به جابجایی‌های برشی، زیرا در این حالت فضای بین میله‌ها و چال با دوغاب پر نشده است.

۲-۵-۱-۲-۲- انواع رابط انتقال دهندهٔ جابجایی

کشیدگی‌سنج‌های ثابت درون گمانه‌ای بر حسب نوع سامانه انتقال دهنده جابجایی[1] به دو گروه میله‌ای[2] و سیمی[3] تقسیم‌بندی می‌شوند (Dunnicliff, 1993).

الف) کشیدگی‌سنج‌میله‌ای

در کشیدگی‌سنج میله‌ای، عضو انتقال دهنده جابجایی نقطه درگیر به سر کشیدگی‌سنج یک میله نازک است (شکل ۲-۹). قطر میله‌ها بین ۵ تا ۱۳ میلیمتر و جنس آن می‌تواند از فولاد معمولی، فولاد ضد زنگ، آلیاژ الومینیوم و فایبرگلاس[4] و مواد غیر قابل انبساط باشد (Dunnicliff, 1993).

[1] Transmitting System
[2] Rod Type
[3] Wires Type
[4] Fiber Glass

شکل ۲-۹- انواع کشیدگی‌سنج میله‌ای با نقاط درگیری مختلف ساخت شرکت Geokon.

در کشیدگی‌سنج‌های چند نقطه‌ای قطر میله‌ها نسبتا کمتر است. این کشیدگی‌سنج تا عمق ۴۵ متر عملکرد قابل قبولی داشته است. لازم به ذکر است که افزایش عمق چال مشکل انحراف آن را به همراه دارد، همچنین احتمال برخورد و اصطکاک با افزایش عمق و تعداد آن‌ها بیشتر می‌شود که این مهم از عوامل بروز خطا در استفاده از این ابزار است (ASTM,1996).

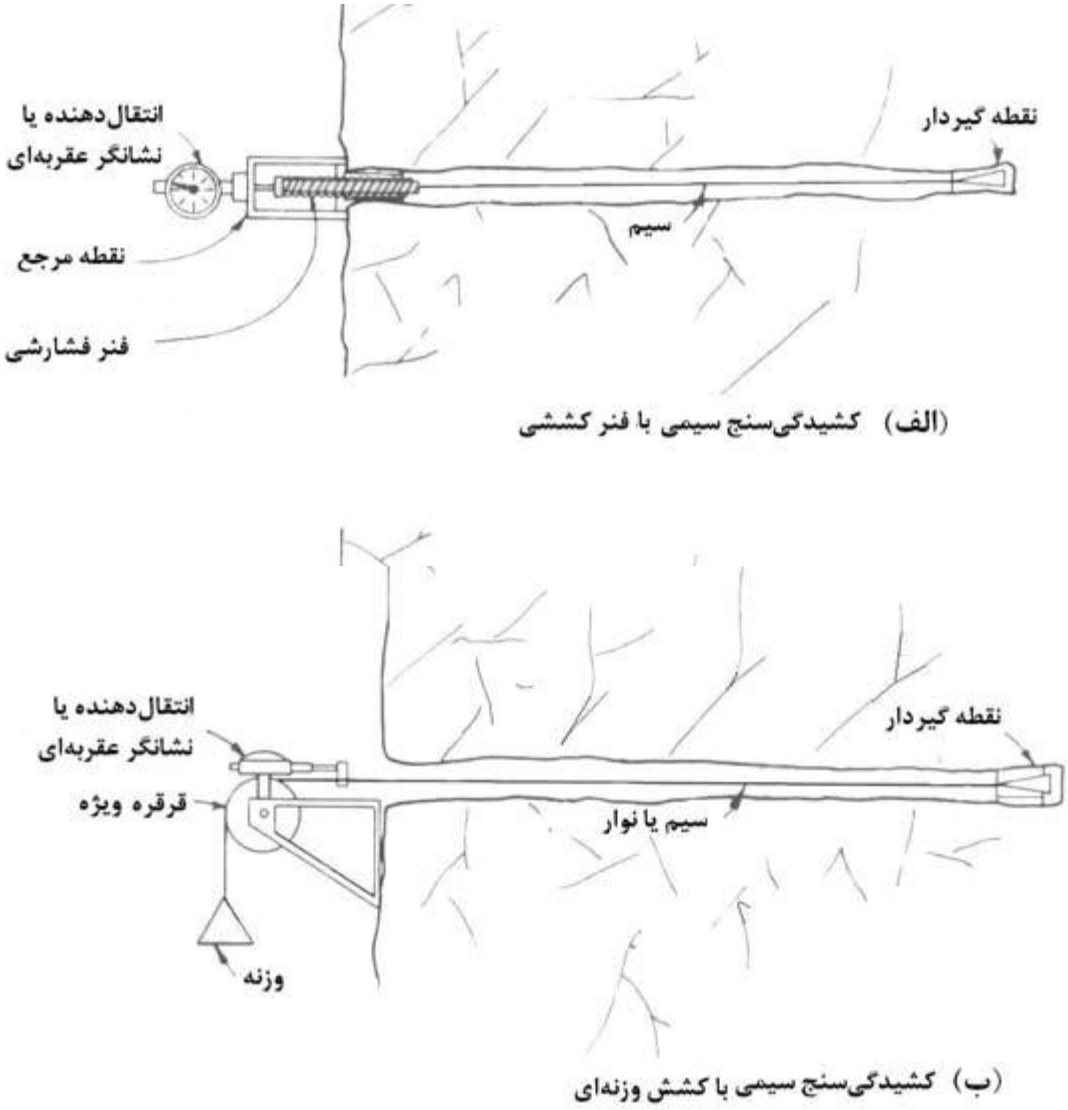
در ابتدا میله‌ها به صورت حلقه‌ای شکل داده شده و یا به شکل قطعه‌ای صاف و مستقیم ۳متری می‌باشند. انواع صاف معمولا به وسیله کوپلینگ رزوه‌ای به هم متصل می‌گردند. انواع حلقه‌ای فولادی و آلیاژ آلومینیومی ممکن است نیازمند صاف شدن پیش از اینکه در عمل استفاده شوند را داشته باشند. ولی این کار برای میله‌های حلقه‌ای فایبرگلاس ضرورتی ندارد. هر یک از میله‌ها باید درون پوششی پلاستیکی مجزایی قرار بگیرند، این کار برای کاهش اثر اصطکاک بین میله‌ها صورت می-پذیرد (Dunnicliff, 1993).

ب) کشیدگی‌سنج سیمی

در این کشیدگی‌سنج، عامل رابط جابجایی از نقاط اندازه‌گیری به سر کشیدگی‌سنج سیم است. معمولاً سیم‌ها کابل‌های فولادی مجزایی با ضخامت ۰/۵ تا ۱/۳ میلیمتر هستند. وقتی از سیم استفاده می‌شود ضرورتا بایستی با استفاده از ابزارهای خاصی پیش از سرهم کردن کشیدگی‌سنج، صاف و مستقیم شوند، در غیر این صورت دقت به طور چشم‌گیری کاهش می‌یابد.

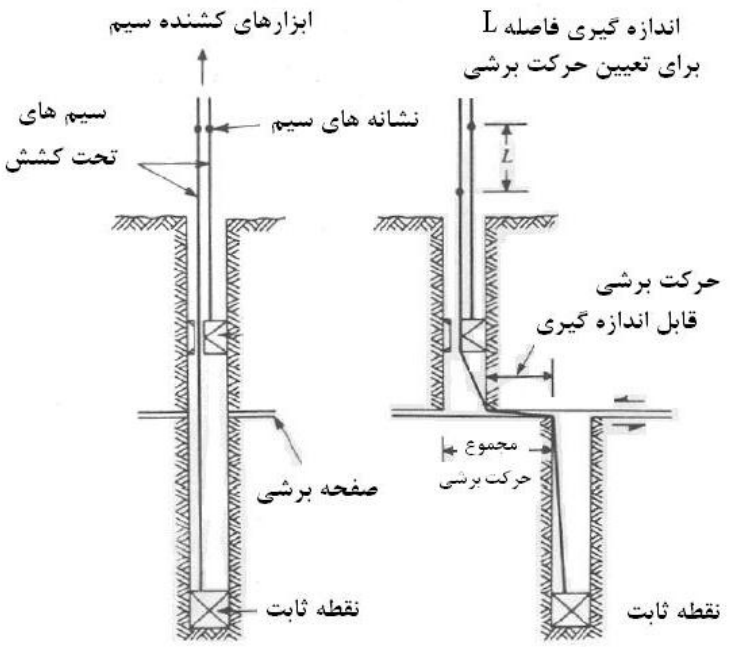
سیم‌ها به وسیله فنرها یا وزنه‌ها تحت کشش قرار می‌گیرند. از این ابزار برای اندازه‌گیری جابجایی‌های بزرگ در درون گمانه‌هایی تا عمق ۱۵۰ متر استفاده شده است. لازم به ذکر است که برای چال‌های عمیق‌تر از سیم‌های مقاوم‌تر و نیروی کششی بیشتر استفاده می‌شود. اگر محیط پیرامون چال استحکام لازم را نداشته باشد لازم است از پوشش لوله‌ای برای محافظت از سیم استفاده کرد (شکل ۲-۱۰).

استفاده از فنر برای اعمال یک نیروی کشش ثابت زمانی مناسب است که بازه اندازه‌گیری بسیار گسترده باشد، اما نبایستی از آن‌ها در کاربردهایی که نیازمند دقت بالا در یک بازه کوچک‌اند، استفاده کرد زیرا دقت در اثر خستگی محدود می‌شود. وزنه‌ها کشش کنترل شده مناسبی را تامین می‌کنند و انتخابی مناسب برای کشیدگی‌سنج‌های سیمی تحت کشش دائمی هستند، البته در صورتی که شکل ظاهری کشیدگی‌سنج برای کاربرد مورد نظر قابل قبول باشد (Dunnicliff, 1993).



شکل ۲-۱۰- انواع کشیدگی‌سنج سیمی با تامین کننده نیروی فنری(الف) و وزنه‌ای(ب) (ASTM,1996)

یکی از کاربردهای مهم کشیدگی‌سنج سیمی در اندازه‌گیری تغییر شکل در سطح شیبدار است. امکان نصب کشیدگی‌سنج‌هایی با ۱۰ نقطه ثابت در اعماق مختلف نیز وجود دارد. به علاوه برای افزایش دقت و سرعت می‌توان به جای خط‌کش مدرج از انتقال دهنده‌های الکتریکی برای قرائت استفاده نمود (شکل ۲-۱۱). از مزایای این کشیدگی‌سنج می‌توان به سادگی و قرائت سریع، امکان نصب آژیر اعلام خطر و امکان ثبت تغییر شکل‌های برشی زیاد اشاره نمود(Dunnicliff, 1993).



شکل ۲-۱۱- طرح شماتیک کشیدگی‌سنج سطح شیب‌دار (Dunnicliff, 1993).

۲-۵-۲- کشیدگی سنج مدفون

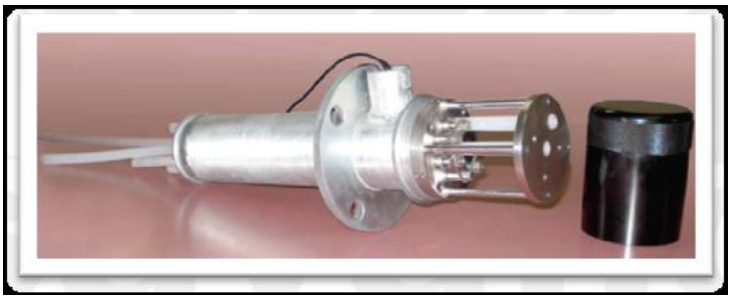
کشیدگی‌سنج مدفون، ابزاری است که در توده مصالح خاکی، سنگی و بتنی استفاده می‌شود. این ابزار بیشتر در سدهای خاکی یا سنگ‌ریزه‌ای و در حین پیشرفت کار و در برخی موارد، پس از اتمام قرار داده می‌شوند. این ابزار تغییرات فاصله بین دو یا چند نقطه در طول یک محور مشترک را بدون اینکه نیازی به کاوه کاوشگر باشد، رفتارنگاری می‌کند. کشیدگی‌سنج‌های مدفون برای رفتارنگاری نشست، تغییر شکل افقی یا کرنش مورد استفاده قرار می‌گیرد (احمدی و شاهوردیلو ۱۳۸۹).

آگاهی کامل از وضعیت تغییر شکل سد و پی آن در صورتی امکان‌پذیر است که اندازه‌گیری‌ها در جهات افقی و قایم به طور کامل انجام پذیرد. اندازه‌گیری‌های مربوط به نشست در یک سد معمولا در هسته سد و در محل تماس هسته با پوسته انجام می‌گیرد. در هنگام کوبیدن هسته و در اثر وزن لایه‌های فوقانی و تراکم‌پذیری مصالح هسته، این مصالح تمایل به نشست بیشتری نسبت به مصالح پوسته دارند، در نتیجه در محل تماس پوسته با هسته یک نیروی برشی به دلیل مقاومت نشست

آزادانه هسته ایجاد می‌شود که در این حالت، تنش کل در هسته از مقدار تنش سربار، کمتر خواهد شد. برای بررسی این پدیده (قوس زدگی) که می‌تواند منجر به وقوع ترک‌خوردگی در هسته شود، اندازه‌گیری نشست در مرز پوسته با هسته سد بسیار ضروری است. از جمله مهم‌ترین ابزارهای اندازه-گیری این نشست‌ها کشیدگی‌سنج مدفون است.

۲-۶- مشخصات کشیدگی سنج مورد استفاده در تونل خط ۲ مترو مشهد

کشیدگی‌سنج‌های مورد استفاده در تونل خط ۲ متروی مشهد برای تعیین جابجایی توده‌های خاک استفاده می‌شود. به منظور کنترل هر چه بیشتر سازه‌های سطحی مجاور طبق نظر کارفرما مقطع اصلی در کیلومتراژ 649+00 (در بلوار طبرسی حد فاصل خیابان طبرسی ۳۰ و ۳۲) برای نصب کشیدگی‌سنج‌ها در نظر گرفته شد.

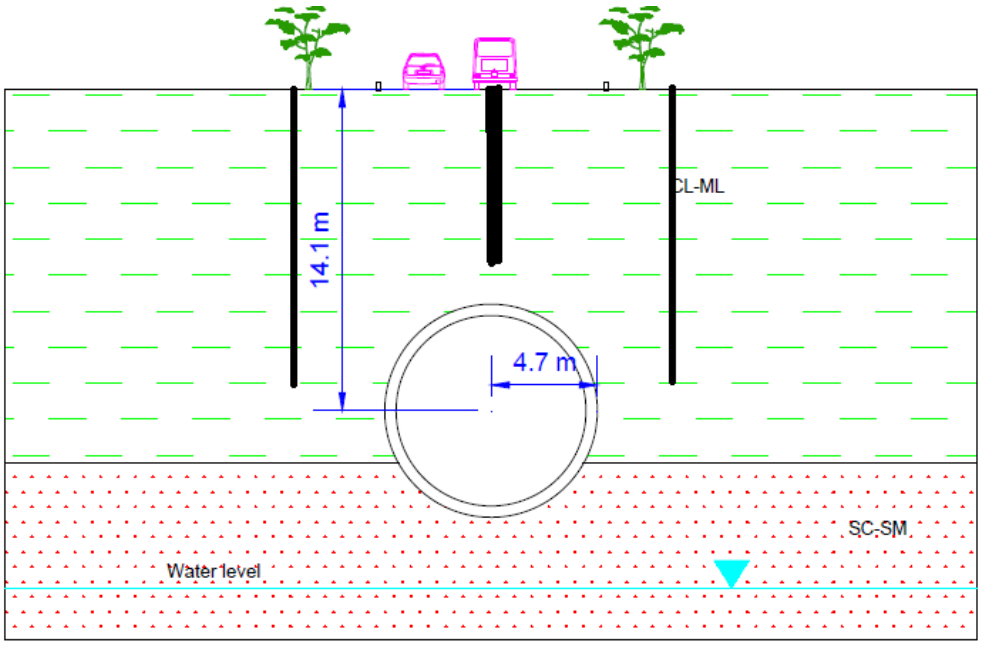


شکل ۲-۱۲- کشیدگی‌سنج مدل EDS_70V (گزارشات شرکت ساوند، ۱۳۹۱).

ایستگاه کشیدگی‌سنج شامل دو مجموعه کشیدگی‌سنج ۶ نقطه‌ای در دو طرف مسیر به طول رادهای ۲/۵، ۵، ۷/۵، ۱۰، ۱۲، ۱۳/۵ و یک مجموعه کشیدگی‌سنج ۴ نقطه‌ای در وسط مسیر (تاج تونل) با طول رادهای ۲/۵، ۴/۵، ۶/۵، ۸/۵ است. مشخصات و موقعیت کشیدگی‌سنج در جدول زیر آمده است (گزارشات شرکت ساوند، ۱۳۹۱).

جدول ۲-۱- مشخصات کشیدگی‌سنج‌های نصب شده در خط ۲ مترو مشهد (گزارشات شرکت ساوند، ۱۳۹۱).

ردیف	کد ابزار	موقعیت نصب	توضیحات
۱	MUR2- MPBX 00+649R	بلوار طبرسی، حدفاصل طبرسی۳۰ و ۳۲ مسیر پیاده‌رو	۶ نقطه‌ای
۲	MUR2- MPBX 00+649L	بلوار طبرسی، حدفاصل طبرسی۳۰ و ۳۲ گلکاری وسط بلوار	۶ نقطه‌ای
۳	MUR2- MPBX 00+649C	بلوار طبرسی، حدفاصل طبرسی۳۰ و ۳۲ وسط خیابان	۴ نقطه‌ای



شکل ۲-۱۳- موقعیت نصب کشیدگی سنج نسبت به تونل

۲-۷- مراحل مختلف عملیات نصب تا قرائت

صحت و دقت رفتارنگاری کشیدگی‌سنج به دقت بسیار زیاد در مونتاژ، مهارت در نصب، قرائت به موقع و دقیق و پردازش صحیح داده‌های کشیدگی‌سنج بستگی دارد. عملیات نصب، قرائت و پردازش داده‌های کشیدگی‌سنج‌ها به هفت مرحله زیر تقسیم می‌گردد:

۱- کنترل کردن کشیدگی‌سنج قبل از نصب

۲- بستن لوله‌های تزریق و تخلیه هوا روی کشیدگی‌سنج

۳- نصب کردن کشیدگی‌سنج داخل چال

۴- تزریق کردن چال کشیدگی‌سنج

۵- ساخت پد سیمانی بعد از تزریق چال

۶- قرائت کشیدگی‌سنج

۷- پردازش داده‌های کشیدگی‌سنج

شایان ذکر است که موارد فوق می‌بایست در همه کشیدگی‌سنج‌ها رعایت گردد و برای هر کشیدگی‌سنج باید با توجه به شرایط خاص پروژه‌ها و حل نصب، موارد دیگری را نیز در نظر گرفت.

۲-۷-۱- کنترل کشیدگی سنج قبل از نصب

بعد از آنکه کشیدگی‌سنج مونتاژ کلی شده و به محل نصب انتقال یافت، قبل از نصب موارد زیر کنترل می‌گردد:

- انکرها در اثر حمل در جای خود و در داخل لوله‌های پلی‌اتیلن نچرخیده باشند که می‌توان با توجه به خطوط راهنما که در دو طرف هر انکر و بر روی لوله‌های پلی‌اتیلن وجود دارد، عدم چرخش را کنترل نمود.

- کنترل شرایط آب بند بودن سطح تماس انکرها و لوله‌های پلی‌اتیلن ضروری است. اگر چه در هنگام مونتاژ، محل اتصال انکرها و لوله‌ها کاملا آب بندی می‌شود، اما بعضا به دلیل شرایط سخت حمل و نقل ممکن این آب بندی نقص پیدا می‌کند. بنابراین، بهتر است برای اطمینان بیشتر، در محل اتصال لوله با انکر از چسب پهن یا چسب براق و قابل کشش استفاده نمود.

هنگامی که محل نصب ابزار در حال حفاری می‌باشد، می‌توان بطور همزمان اقدام به مونتاژ نهایی دستگاه کشیدگی‌سنج با استفاده از روش پیشنهادی شرکت سازنده نمود.

۲-۷-۲- برنامه قرائت کشیدگی سنج

در زمان نصب، کیلومتراژ حفاری به طور تقریب ۴۵۸ متر بوده است که طبق نظر کارفرمای پروژه هفته‌ای دو مرتبه قرائت‌ها انجام گرفته است. با نزدیک شدن فاصله TBM به مقطع محل نصب، فاصله زمانی قرائت‌ها کاهش یافت و در فاصله ۲۵ متری محل نصب کشیدگی‌سنج‌ها قرائت ابزار در دو ساعت انجام گرفته است. با توجه به دقت بالای کشیدگی‌سنج‌های نصب شده در هنگام عبور TBM از محدوده کیلومتراژ 649+00 (محل نصب کشیدگی‌سنج‌ها) جابجایی‌های رخ داده به طور دقیق ثبت

گردیده است که در نمودارهای رفتارسنجی کاملا مشهود می‌باشد. پس از عبور TBM از محل نصب کشیدگی‌سنج‌ها براساس نظر کارفرما برنامه زمان‌بندی قرائت کشیدگی‌سنج‌ها کاهش یافته است (گزارشات شرکت ساوند، ۱۳۹۱).

۲-۸- تفسیر نتایج داده های کشیدگی سنج

نکته‌ای که باید بدان توجه نمود این است که قرائت‌های ابزار دقیق با گذشت زمان، روند تقریبا ثابتی را نشان می‌دهند. ثابت شدن روند جابجایی ها برای تفسیر سیستم مرکب زمین و سیستم نگهداری از اهمیت به سزایی برخوردار است، آن چنان که سینگ[1] معتقد به این است که پایداری و مناسب بودن سیستم نگهداری با تثبیت جابجایی‌ها با زمان تعیین می‌گردد، در غیر این صورت سیستم ناپایدار است. اهمیت ثابت شدن جابجایی با زمان را محققان دیگری از جمله ساکورایی نیز بررسی نموده‌اند. ساکورایی معتقد است که رفتارسنجی جابجایی‌ها با زمان، تا زمانی در فرآیند احداث سازه موثر است که به موقع توسط مهندس ناظر ثبت شود چرا که تاخیر در پردازش پس از گذشتن زمان منجر به پیچیدگی‌ها و قضاوت‌های مهندسی می‌شود.

با توجه به نمودارهای قسمت بعد جابجایی ها با گذشت زمان به مقدار ثابتی می‌رسند. به منظور مقایسه و استفاده از نتایج تحلیل عددی با داده های ابزار دقیق از جابجایی مطلق راد ها استفاده شده است.

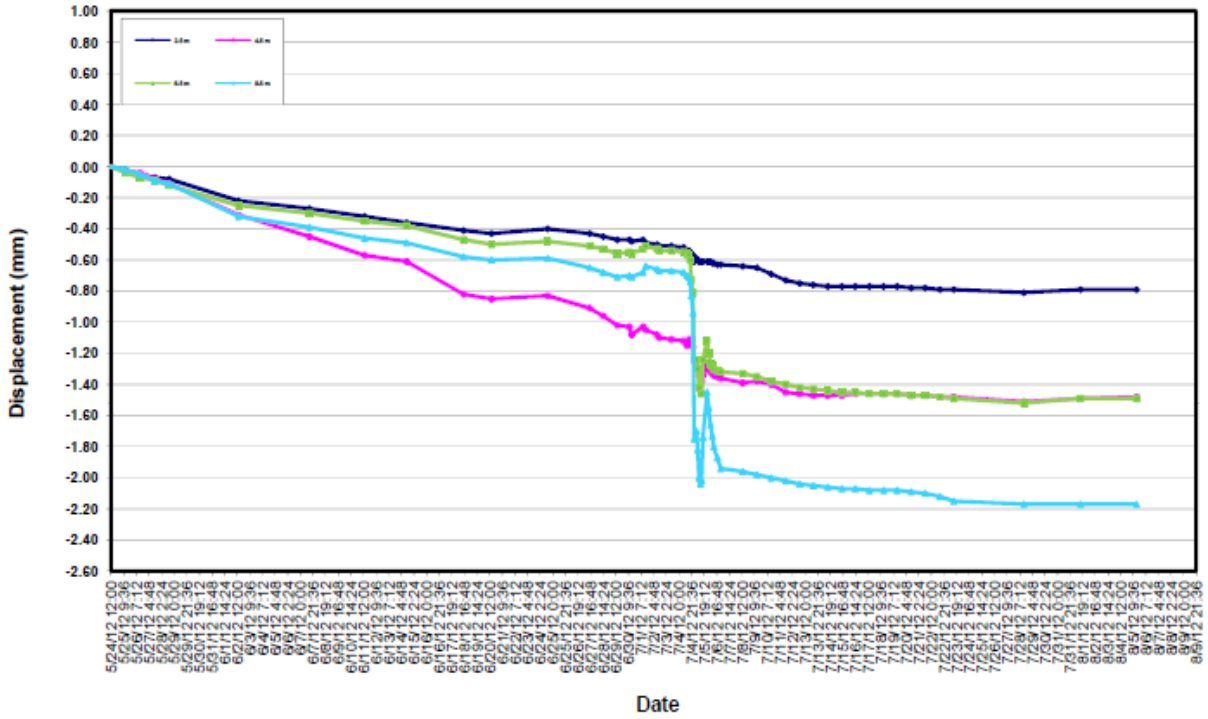
۲-۸-۱- کشیدگی سنج تاج تونل

در تاج تونل و در کیلومتر 649+00 یک عدد کشیدگی‌سنج ۴ نقطه ای به طور قائم نصب گردیده است. طول رادهای این کشیدگی‌سنج به ترتیب ۲/۵، ۴/۵، ۶/۵ و ۸/۵ متر است. با توجه به زاویه نصب ابزار فوق از آن می‌توان به منظور کنترل جابجایی‌های ثبت شده در سقف تونل استفاده کرد.

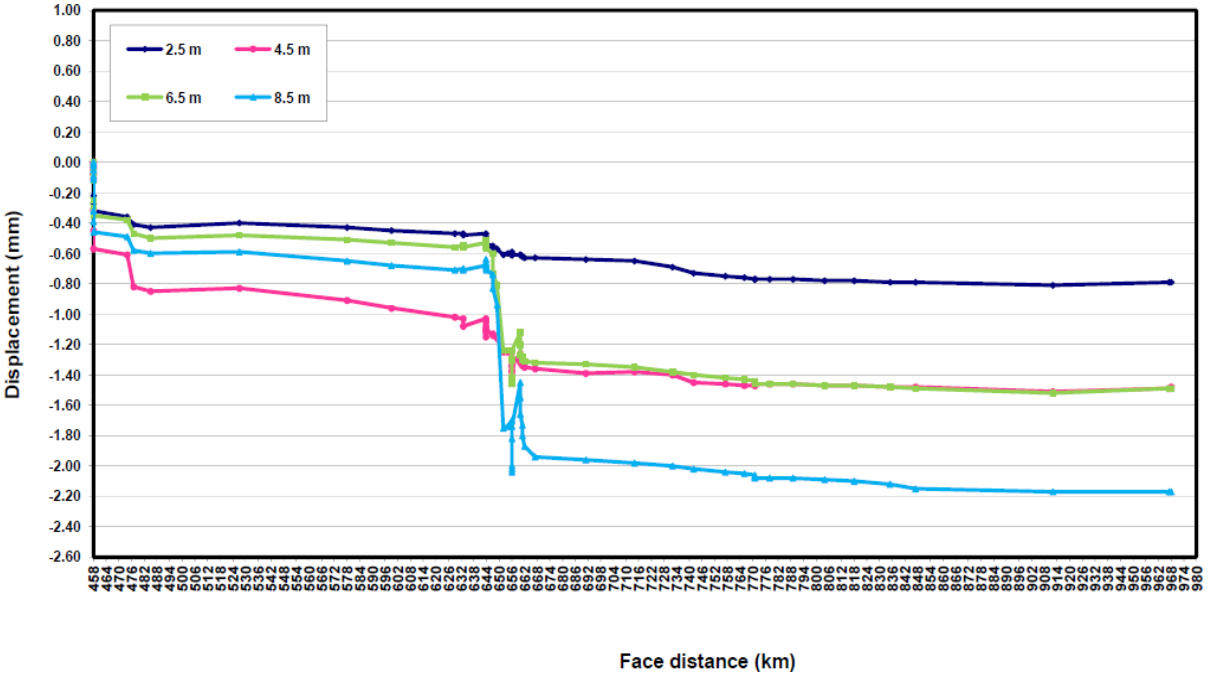
[1] Singh

در شکل (۲-۱۴) جابجایی‌های ثبت شده توسط کشیدگی‌سنج در سقف تونل در کیلومتر 00+649 با گذشت زمان به صورت نمودار ارائه شده است. داده‌های این ابزار در همه رادها روند یکسانی را نشان داده و پس از گذشت زمان به مقدار ثابتی می‌رسند.

در شکل (۲-۱۵) جابجایی‌های کشیدگی‌سنج برحسب کیلومتراژ حفاری به صورت نمودار ارائه شده است. با توجه به این نمودارها بیشترین میزان جابجایی در عمق ۸/۵ متری حدود ۲/۱۷ میلیمتر ثبت شده است.



شکل ۲-۱۴- تغییرات کشیدگی‌سنج MUR2- MPBX 00+649C (گزارشات شرکت ساوند،۱۳۹۱).



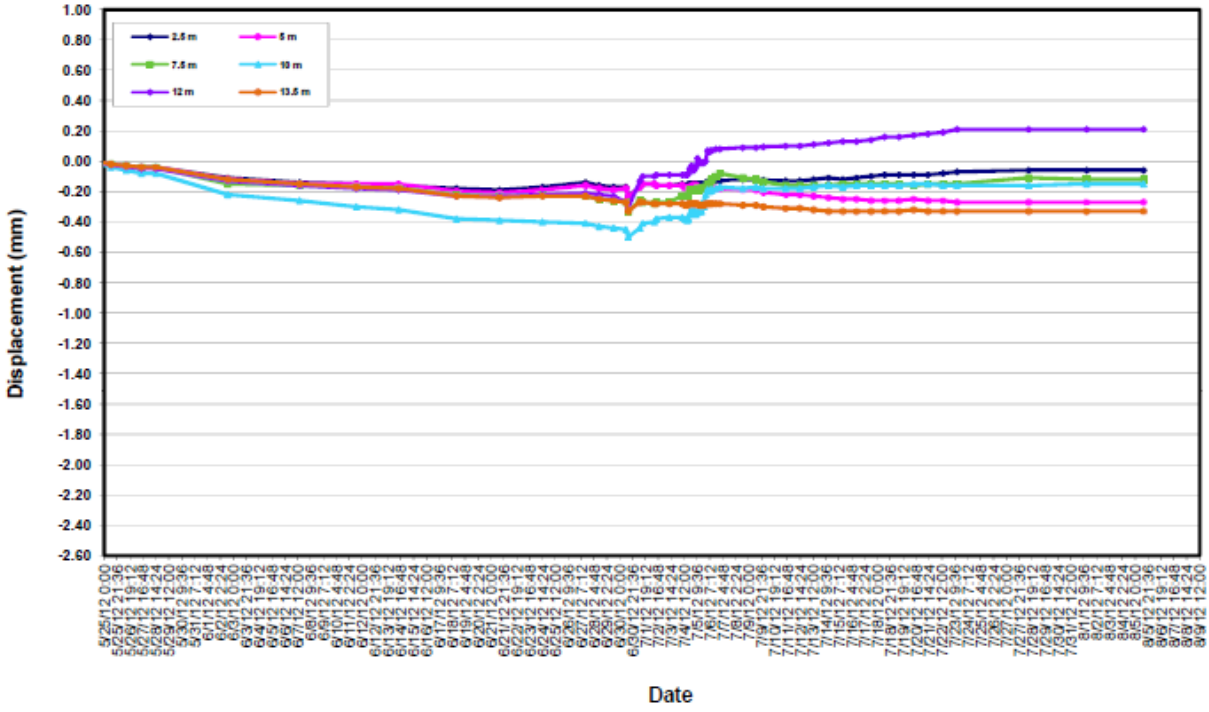
شکل ۲-۱۵- تغییرات کشیدگی‌سنج MUR2- MPBX 00+649C بر حسب کیلومتراژ حفاری (گزارشات شرکت ساوند،۱۳۹۱).

۲-۹-۲- کشیدگی سنج های اطراف تونل

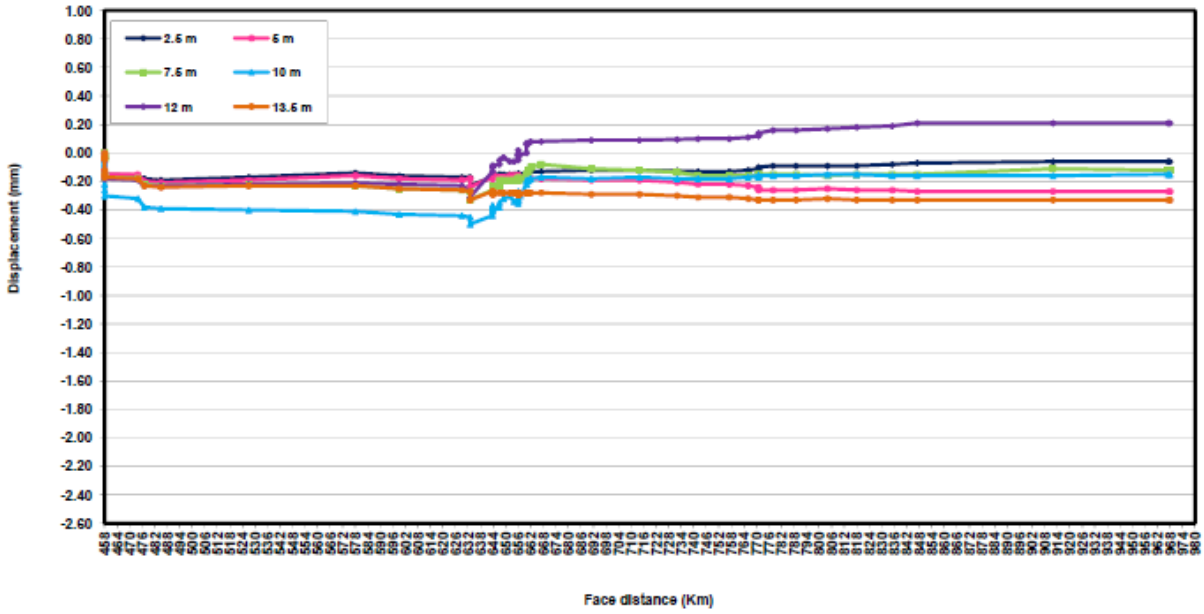
در دو طرف تونل و در کیلومتر 00+649 دو کشیدگی‌سنج ۶ نقطه‌ای با طول رادهای ۲/۵، ۵، ۷/۵، ۱۰، ۱۲ و ۱۳/۵ متر نصب شده است.

در شکل (۲-۱۶) جابجایی‌های ثبت شده توسط کشیدگی‌سنج سمت راست تونل در کیلومتر 00+649 با گذشت زمان و در شکل (۲-۱۷) جابجایی‌های کشیدگی‌سنج بر حسب کیلومتراژ حفاری به صورت نمودار ارائه شده است. در ادامه نیز نمودار جابجایی‌های کشیدگی‌سنج سمت چپ تونل با گذشت زمان (شکل ۲-۱۸) و نمودار جابجایی‌های کشیدگی‌سنج بر حسب کیلومتراژ حفاری (شکل ۲-۱۹) ارائه شده است.

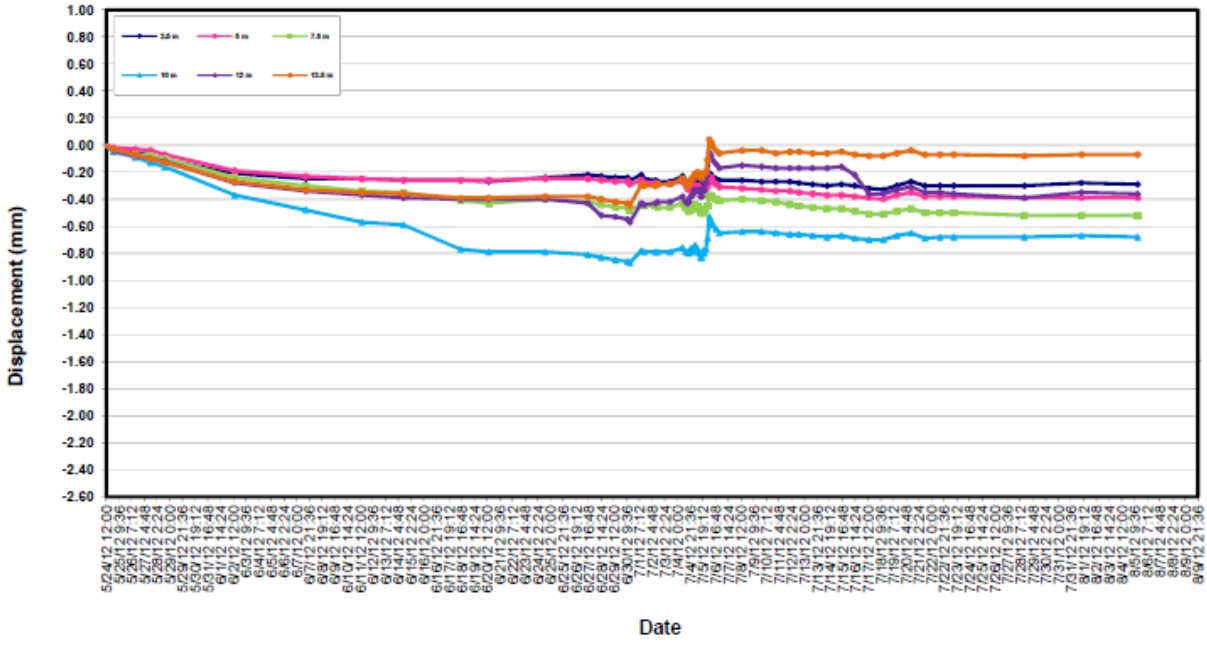
با بررسی این نمودار ها بیشترین جابجایی در کشیدگی‌سنج سمت راست در عمق ۱۰ متری و حدود ۰/۵ میلیمتر بوده است و برای کشیدگی‌سنج سمت چپ این مقدار در عمق ۱۰ متری و حدود ۰/۸۳ بوده است.



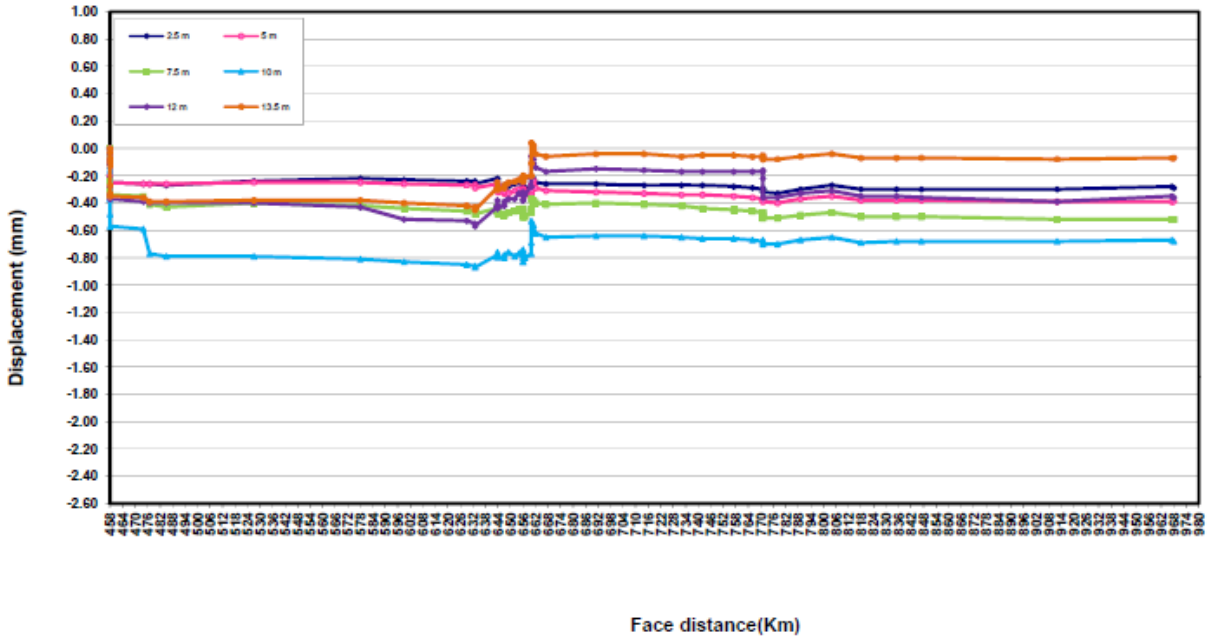
شکل ۲-۱۶- تغییرات کشیدگی‌سنج MUR2- MPBX 00+649R (گزارشات شرکت ساوند، ۱۳۹۱).



شکل ۲-۱۷- تغییرات کشیدگی‌سنج MUR2- MPBX 00+649R برحسب کیلومتراژ حفاری (گزارشات شرکت ساوند، ۱۳۹۱).



شکل ۲-۱۸- تغییرات کشیدگی‌سنج MUR2- MPBX 00+649L (گزارشات شرکت ساوند، ۱۳۹۱).



شکل ۲-۱۹- تغییرات کشیدگی‌سنج MUR2- MPBX 00+649L برحسب کیلومتراژ حفاری (گزارشات شرکت ساوند، ۱۳۹۱).

۲-۱۰- نتیجه گیری

در این فصل توضیحاتی در مورد رفتارنگاری و نقش آن در پروژه‌های عمرانی داده شد و سپس به تشریح کامل انواع کشیدگی‌سنج پرداخته شد و کارکرد انواع کشیدگی‌سنج در شرایط مختلف مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه شرایط نصب تا قرائت ابزار استفاده شده در تونل خط ۲ مترو مشهد تشریح شده است. با توجه به استفاده مستقیم از داده‌های کشیدگی‌سنج، اندازه‌گیری‌های انجام گرفته توسط این ابزار مورد بررسی و تفسیر قرار گرفت. در نهایت داده‌های کشیدگی‌سنج به عنوان ابزار مناسب جهت بررسی و کنترل نتایج مدل‌سازی عددی در فصل بعد مورد استفاده قرار گرفته است.

در فصل بعد به معرفی روش تحلیل برگشتی و انواع آن می‌پردازیم و با استفاده از داده‌های کشیدگی‌سنج نصب شده در طرح رفتارنگاری تونل خط ۲ مترو مشهد تحلیل برگشتی انجام می‌گیرد.

فصل سوم

تحلیل برگشتی خط ۲ مترو مشهد

۳-۱- مقدمه

آغاز استفاده از روش تحلیل برگشتی در مسائل مختلف مهندسی خاک را می‌توان از دهه ۱۹۷۰ دانست. در بسیاری از موارد، تحقیق درباره طراحی و اجرای سازه‌های زیرزمینی منحصرا با تخمین پارامترهای ژئومکانیکی توده خاک انجام می‌شود. بیان کمی و کیفی این پارامترها همانند حالت اولیه تنش، سطح آب زیرزمینی و نفوذپذیری و ... بسیار مشکل است. برای رفع چنین مشکلی از پژوهش-های صحرایی و تکنیک‌های تحلیل برگشتی استفاده می‌شود. هدف این روش صرفا تعیین مدل مکانیکی یا مقادیر ثابت مکانیکی و نیروهای خارجی نبوده بلکه اندازه‌گیری جابجایی‌های پیرامون سازه‌های زیرزمینی با ابزارهای رفتار نگاری و تعیین بارها بر روی نگه‌دارنده‌ها و نهایتا ارزیابی روش-های طراحی پروژه موردنظر در طی اجرای آن است (دهقان و همکاران، ۱۳۸۸).

طراحی سازه در خاک به دو طریق انجام می‌گیرد که در عملکرد با هم تفاوت دارند. درروش اول اطلاعات تجربی به‌دست‌آمده از آزمایش‌های صحرایی و آزمایش‌های انجام‌شده در آزمایشگاه به‌عنوان ویژگی‌های مکانیکی خاک در نظر گرفته می‌شود و سپس بر اساس این اطلاعات شروع به ساختن سازه می‌کنند، این روش از نظر زمانی برای به دست آوردن پارامترهای مکانیکی خاک دارای محدودیت است. در این روش فرض می‌شود که بعد از طراحی، خاک همان رفتاری را که در آزمایش نشان داده، از خود بروز می‌دهد و رفتار خاک منطبق بر همان چیزی است که در طرح آمده است و اگر هم تفاوتی در نوع رفتار موجود در حین ساخت سازه با رفتار خاک در طراحی دیده شد، تغییری در طرح داده نمی‌شود. به این طرح‌ریزی طراحی صلب می‌گویند، در این روش هیچ هم‌فکری بین اجراکننده قرارداد و مشاور و طراح پروژه وجود ندارد. با توجه به محدود بودن اطلاعات به‌دست‌آمده از آزمایش‌های برجا و آزمایش‌های انجام‌شده در آزمایشگاه ممکن است راه‌حل‌هایی در پیش بگیرند که می‌تواند به روش‌های زیر دسته‌بندی شوند (Sakurai & Takeuch, 1983):

یک فاکتور ایمنی بالا در نظر بگیرند.

شرایط فرضی را در طرح خود اضافه کنند که مشکلات احتمالی به وجود آمده در حین کار را در نظر گرفته باشد.

روش اولی باعث می‌شود که طرح از نظر اقتصادی دچار مشکل شود و روش دوم نیز غیر مطمئن است.

پس برای حل این مسائل باید چه اقدامی را در نظر گرفت؟ در حقیقت جزئیات زمین‌شناسی به‌راحتی می‌توانند روی رفتار خاک که نوع رفتار آن پیش‌بینی شده بود تأثیر بگذارند و رفتار آن را به سویی متفاوت از آن چیزی که انتظار می‌رود هدایت کند. برای جلوگیری از مواردی که گفته شد، روشی توسط ترزاقی[1] و پک[2] معرفی گردید. این راه‌حل به روش‌های مشاهده‌ای معروف گردید که در کارهای عظیم ژئوتکنیک و ساخت سدها و تونل‌ها به‌کاربرده می‌شود. این روش نیاز به همکاری نزدیک مشاور و اجراکننده طرح دارد و باید سیستم اندازه‌گیری در سازه برپا گردد. حال می‌توان با توجه به نصب این دستگاه‌ها رفتار خاک را در حین ساخت سازه و بعد از آن مشاهده کرد. می‌توان اطلاعات به دست آورده شده در حین ساخت را با داده‌های به دست آمده از آزمایش‌ها مقایسه کرد و هر نوع تفاوتی بین آن‌ها را تشخیص داد و پارامترهای مربوط به خاک را با توجه به این اختلافات تصحیح کرد. این امر باعث می‌شود که اندازه‌گیری و برداشت جدیدی از خاک به دست بیاید. این نوع روش طراحی را روش انعطاف‌پذیر می‌نامند.

۳-۲- روش تحلیل برگشتی

نیاز به انجام حفاری‌های بزرگ در زمین (تونل‌ها، مغارها، کارگاه‌های بزرگ استخراج و ...) ضرورت شناخت خواص و رفتار ژئومکانیکی هر چه بیشتر این ماده را در برابر نیروهای وارده ایجاد کرده است و تاکنون تلاش‌های گسترده‌ای در این زمینه صورت گرفته است. اما توده‌های خاکی در طبیعت توده‌های همگن و یکنواختی نیستند. این توده‌ها شامل عوارض گوناگونی هستند، و منشا به

[1] Terzaghi
[2] Peck

وجود آمدن این عوارض نیز متفاوت است. وجود این عوارض به میزان قابل توجهی رفتار خاک را تحت تاثیر قرار می‌دهد. به علت پیچیدگی و غیر قابل پیش‌بینی بودن رفتار و خواص خاک برای تحلیل و طراحی پروژه‌های مکانیک خاک با حاشیه اطمینان قابل قبول، مشاهدات دقیق و تفسیر آنچه در منطقه قابل اندازه‌گیری است، شرط لازم است. روش‌های مشاهداتی را می‌توان با طراحی تحلیل برگشتی بر اساس مبانی کامپیوتری به تکامل رساند. روش تحلیل برگشتی در حقیقت پلی بین واقعیت و پیش‌بینی است (حسنی و همکاران، ۱۳۸۵).

در حال حاضر استفاده از روش‌های عددی در تحلیل مسائل مختلف مهندسی گسترش زیادی پیداکرده است. هر چند که از این روش‌ها به طور گسترده‌ای برای طراحی سازه‌های سنگی نظیر تونل‌ها و مغارها و ارزیابی جابجایی‌ها در پایداری شیب معادن روباز و غیره استفاده می‌شود، ولی پیش‌بینی رفتار مکانیکی چنین سازه‌هایی با دقت کافی بسیار دشوار است. به عبارت دیگر اعتبار این پیش‌بینی‌ها به دقت اطلاعات ورودی و اینکه این اطلاعات تا چه حد بیانگر رفتار واقعی خاک است، بستگی دارد. برای رفع این مشکل در زمان ایجاد سازه مورد نظر اندازه‌گیری‌های صحرایی صورت می‌گیرد که علاوه بر بررسی پایداری سازه جهت ارزیابی مجدد اطلاعات زمین‌شناسی و پارامترهای ژئوتکنیکی ورودی طراحی نیز از آن‌ها استفاده می‌شود. بنابراین روش‌های تحلیل برگشتی اغلب در مهندسی خاک به منظور تصحیح اطلاعات طراحی به کار می‌روند (صائمی و همکاران، ۱۳۸۶).

تحلیل برگشتی عموما به عنوان روشی تعریف می‌شود که می‌تواند پارامترهای کنترل‌کننده سیستم را به کمک تحلیل رفتار خروجی آن تامین کند. این روش بیش از ۲۰ سال است که در زمینه مکانیک خاک استفاده می‌شود. هدف اصلی تحلیل برگشتی در زمینه خاک تعیین تنش‌های اولیه و ثابت‌های توده در برگیرنده از داده‌های میدانی اندازه‌گیری شده است (Jeon & Yang, 2004) و (Karakus & Fowell, 2005). در تحلیل برگشتی برای مسائل مهندسی خاک، شرایط نیرو و بارهای خارجی و خواص مکانیکی، با توجه به تغییر مکان، تنش و کرنش در طی مراحل اجرای پروژه و پس از

آن تعیین می‌شود .در تحلیل‌های عادی شرایط نیرو و خواص مکانیکی، اطلاعات ورودی برای تعیین تغییر مکان، تنش و کرنش هستند. موارد مهمی که در تحلیل برگشتی مورد بررسی قرار می‌گیرند، تعیین تنش‌های اولیه و خواص رفتاری خاک مورد حفاری با توجه به داده‌های حاصل از رفتار نگاری با ابزار دقیق است.

مهم‌ترین مطلب در بسط مشاهده‌ای ابزار تحلیل برگشتی، وجود روش‌های عددی است که می-توانند کرنش اندازه‌گیری شده را به واقعیت نزدیک سازد. پیشرفت‌های اخیر تحلیل برگشتی و روش-های عددی، فصل مشترکی است بین مبانی اقتصادی و عملکرد سریع کامپیوتر و تکنیک دقیق اندازه‌گیری، تکنیک‌هایی هستند که وظیفه تحلیل برگشتی را به نحو موفقیت آمیزی در چهارچوب روش‌های مشاهده‌ای انجام می‌دهند. در حقیقت هدف تحلیل برگشتی، صرفا تعیین هویت مدل مکانیکی یا مقادیر ثابت مکانیکی و نیروهای خارجی آن نیست، بلکه هدف نهایی آن ارزیابی روش طراحی در طی ساخت و ساز است. نتایج آن در درک صحیح شرایط حاکم بر سازه زیرزمینی و ملاحظات فنی و اقتصادی طرح بسیار با اهمیت است (حسنی و همکاران).

در تحلیل برگشتی ابتدا مقادیر جابجایی‌ها، کرنش و در صورت لزوم تنش توسط ابزار مورد نظر محاسبه شده و سپس در یک مدل مکانیکی فرضی قرار داده می‌شود؛ در نهایت پارامترهای تنش اولیه، خواص مکانیکی و شرایط مرزی تعیین می‌شود. این روش، معکوس یک روش تحلیل معمولی است که در آن وضعیت نیروها و خواص مکانیکی به‌صورت داده‌های ورودی وارد می‌شوند تا اینکه جابجایی، تنش یا کرنش تعیین شود (طاهری و فاروق حسینی، ۱۳۸۲).

۳-۳- سابقه علمی تحلیل برگشتی

کاوانژه[1] (۱۹۷۳) یک فرمول نویسی برگشتی بر اساس اجزا محدود پیشنهاد کرد که با استفاده از جابجایی و کرنش اندازه‌گیری شده، امکان محاسبه ثابت‌های مواد را برای هر نوع ماده اعم از همگن،

[1] Kavanagh

همسانگرد و ناهمسانگرد فراهم می‌سازد. مشکل عمده روش ازآنجا ناشی می‌شود که جابجایی‌ها و کرنش‌های اندازه‌گیری شده دارای پراکندگی باشند، در این صورت روش هرگز همگرا نمی‌شود.

گیدا[1] (۱۹۷۵) شکل اصلاح‌شده‌ای از الگوریتم کاوانژه را پیشنهاد نمود که در آن با استفاده از تراکم الاستیک و روش حداقل مربعات، می‌توان مدول حجمی و برشی را به‌صورت برگشتی محاسبه نمود. در این الگوریتم برای به دست آوردن ثابت‌های مواد نیز اندازه‌گیری جابجایی به تنهایی کافی است. با این وجود برای شناسایی شرایط بارگذاری به همراه ثابت‌های مواد علاوه بر جابجایی، اندازه-گیری مقادیر بارگذاری و فشار نیز ضروری خواهد بود. به همین منظور یک روش عمومی و منحصر به فرد توسط گیدا فرمول نویسی و ارائه شد.

تاکوچی[2] و ساکورایی (۱۹۷۷) یک الگوریتم تحلیل برگشتی را بر اساس روش برگشتی فرمول-بندی نمودند. این روابط با استناد به داده‌های حاصل از تعداد معدودی اندازه‌گیری جابجایی، با فرض موادی همگن و دارای رفتار الاستیک خطی قادر به تعیین توزیع کرنشی در اطراف تونل است.

در سال ۱۹۷۹ ساکورایی و آبه[3] یک روش طراحی را برای تعیین ابعاد بازکننده‌های زیرزمینی که بر پایه جابجایی‌های اندازه‌گیری شده در جریان حفاری پایلوت و تونل‌های آزمایشی حفر می‌شوند، ارائه نمودند.

سیویندیی[4] و همکارانش در سال ۱۹۸۱، روش‌هایی را برای تحلیل برگشتی بر اساس فرمول-بندی برگشتی و مستقیم ارائه دادند و این طور نتیجه‌گیری نمودند که روش مستقیم بر حداقل کردن توابع خطا استوار است و ممکن است روشی قابل ترجیح باشد. آن‌ها همچنین در سال ۱۹۸۵ اعلام کردند که با اندازه‌گیری همگرایی در مراحل مختلف احداث فضاهای زیرزمینی و نیز به کمک روش مستقیم می‌توان ثابت‌های تابع زمان مواد را تعیین کرد.

[1] Gioda
[2] Takeuchi
[3] Abe
[4] Civindi

در سال ۱۹۸۹، یانگ و استرلینگ[1] با استفاده از روش‌های المان مرزی یک روش تحلیل برگشتی منحصر به فرد برای تعیین تنش‌های برجا و خواص الاستیک توده سنگ پیشنهاد نمودند. تحلیل برگشتی تنش‌های برجا در یک ماده با رفتار غیرخطی نیز توسط ژانگ و همکارانش فرمول‌بندی شده است.

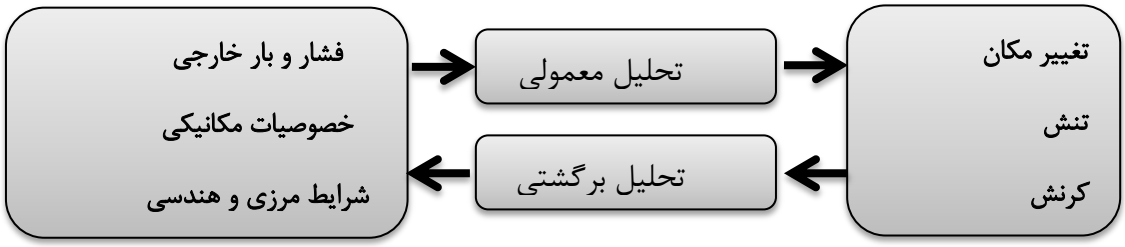
ساکورایی و همکارانش در سال ۱۹۹۸ مدل رفتاری کلی توده سنگ که برگرفته از آزمایش‌های برجا بود، را مطرح کردند. همچنین آن‌ها در سال ۲۰۰۳ مقایسه‌ای بین روش‌های مختلف تحلیل برگشتی با روش‌های موجود انجام داده و روش‌های مفید که از درجه اعتبار و دقت کافی در تحلیل برگشتی برخوردارند، را پیشنهاد نمودند. از جمله این روش‌ها که لی[2] (۲۰۰۲) نیز آن را مطرح کرد، استفاده از تحلیل برگشتی هوشمند در تخمین پارامترهای مکانیکی توده سنگ است.

۳-۴- تحلیل برگشتی و تحلیل معمولی

تحلیل برگشتی معمولا به عنوان روشی تعریف می‌شود که می‌تواند پارامترهای کنترل‌کننده یک سیستم را از تحلیل رفتار خارجی آن سیستم تعیین کند. در مسائل تحلیل برگشتی مربوط به مکانیک خاک، شرایط فشارها مانند بارهای خارجی و خصوصیات مکانیکی سنگ‌ها مثل مدول الاستیسیته، نسبت پواسون، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی از روی جابجایی‌ها، کرنش‌ها و فشارهای اندازه‌گیری شده در طول اجرای پروژه و پس از آن محاسبه می‌شوند.

این روند محاسبات در حقیقت عکس روند تحلیل معمولی است. زیرا در تحلیل معمولی شرایط تنش و خصوصیات مکانیکی محیط جزء داده‌های ورودی برای محاسبه جابجایی و تنش به شمار می‌روند. به همین دلیل این تحلیل را برگشتی می‌نامند. ارتباط بین تحلیل معمولی و برگشتی در شکل (۳-۱) نمایش داده شده است.

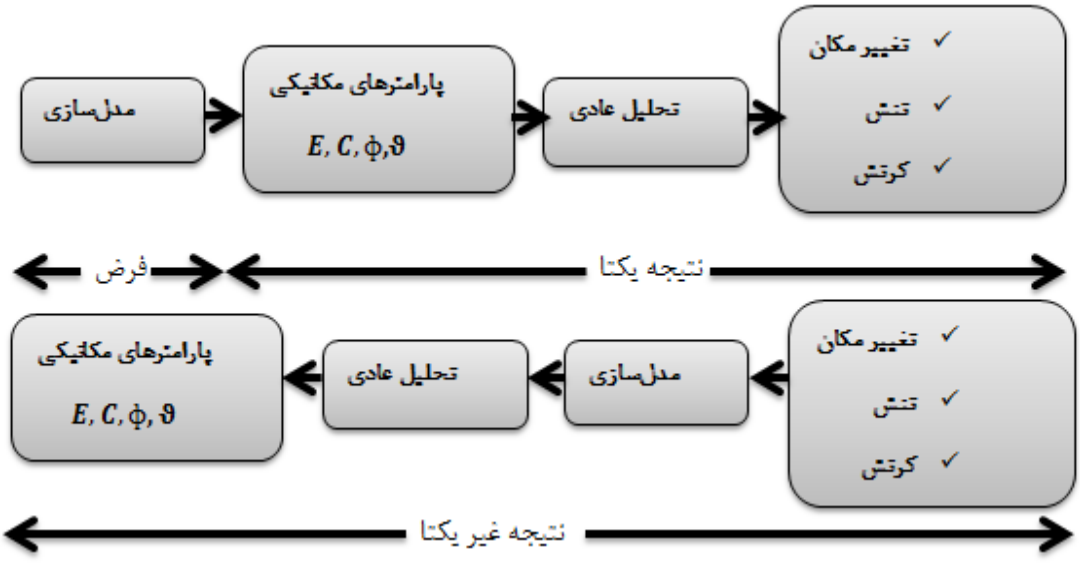
[1] Sterling
[2] Lee



شکل ۳-۱- ارتباط بین تحلیل معمولی و برگشتی (Sakurai,1993).

باید تاکید کرد که تحلیل برگشتی روند ساده‌ی عکس تحلیل معمولی نیست. زیرا به‌خصوص در مورد مدل کردن خاک فرضیات پایه ممکن است متفاوت باشند. این امر به‌خصوص در مدل‌سازی می‌تواند کاملا متفاوت باشد. در تحلیل معمولی یک مدل مکانیکی معمولا به طریقی که بتواند نماینده رفتار خاک باشد (مثل الاستیک، الاستوپلاستیک، ویسکوپلاستیک و ...) ساخته می‌شود. وقتی این مدل ساخته شد مقادیر ثابت‌های مکانیکی مدل را می‌توان از آزمایش‌های آزمایشگاهی و یا برجا تعیین کرد. این مقادیر به عنوان اطلاعات ورودی تحلیل معمولی برای محاسبه مقادیر جابجایی، تنش و کرنش مورد استفاده قرار می‌گیرد و باید توجه کرد که این روش منجر به دست آمدن جواب یگانه‌ای برای مدل فرض شده خواهد شد. از طرفی دیگر در تحلیل برگشتی جابجایی‌ها، کرنش‌ها و مقادیر فشار ابتدا از اندازه‌گیری برجا به دست می‌آیند و سپس یک مدل مکانیکی برای محیط فرض می‌شود. ثابت‌های مکانیکی مدل و نیروهای خارجی از روی مقادیر قرائت‌های صحرایی و به‌صورت برگشتی تعیین می‌شود. دیده می‌شود که مقادیر به دست‌آمده در این روش بستگی شدیدی به مدل فرض شده برای محیط دارد. به طور مثال اگر یک مدل الاستیک برای رفتار محیط حفاری در نظر گرفته شود، مقادیر مدول الاستیسیته و نسبت پواسون محاسبه خواهند شد. درصورتی‌که مدل الاستوپلاستیک فرض شده باشد، علاوه بر این دو، مقدار چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی توده خاک نیز محاسبه خواهد شد. بنابراین دیده می‌شود که با در نظر گرفتن مدل‌های متفاوت و به ازای مقادیر ورودی یکسان، نتایج مختلفی به دست خواهد آمد (Sakurai, 1993).

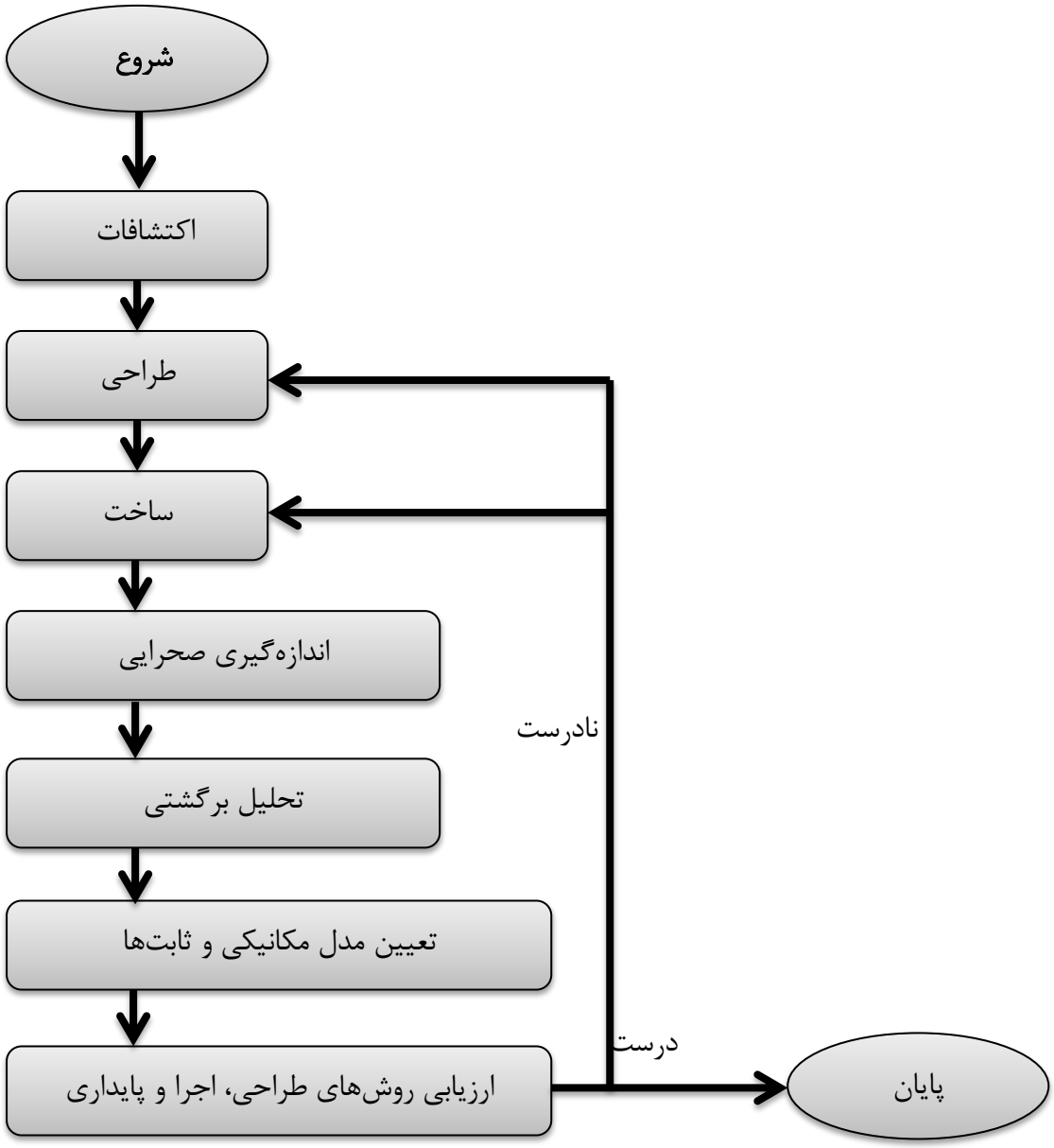
تفاوت بین تحلیل برگشتی و معمولی در شکل (۳-۲) نمایش داده‌شده است. در این شکل دیده می‌شود که در تحلیل معمولی، به دست آمدن نتایج واحد حتمی است و این حتی در حالتی که رفتار واقعی خاک و مدل یکسان نیستند نیز اتفاق خواهد افتاد، اما در مورد تحلیل برگشتی واحد بودن نتایج حتمی نیست و این به آن علت است که مدل پس از جمع‌آوری اطلاعات ورودی در نظر گرفته می‌شود.



شکل۳-۲- مقایسه بین تحلیل عادی و برگشتی (Sakurai,1993).

مشاهده می‌شود که در تحلیل عادی یگانگی و منحصر به فرد بودن نتایج حداقل برای داده‌های ورودی به مدل تضمین شده است، حتی اگر رفتار واقعی خاک رفتاری نباشد که مدل ارائه می‌دهد. اما در تحلیل برگشتی بخاطر اینکه مدل‌سازی بعد از به دست آوردن داده‌های ورودی انجام می‌شود یگانگی جواب‌ها تضمین نشده است. بنابراین برای تضمین یگانگی و درستی جواب‌ها در تحلیل برگشتی بایستی دقت زیادی صرف انتخاب مدل گردد. مدل انتخابی بایستی تا حد امکان دقیق باشد تا بتواند رفتار واقعی خاک را نمایش دهد. بنابراین واضح است که اهمیت مدل‌سازی در تحلیل برگشتی بیش از اهمیت آن در تحلیل عادی است. بایستی روی این نکته تاکید کرد که در تحلیل

برگشتی، در صورت امکان نباید مدل تنها به واسطه فرض انتخاب شود، بلکه در اینجا نیز بایستی از روی داده‌های واقعی اندازه‌گیری شده در صحرا مدل را به روش معکوس حدس زد. هدف تحلیل برگشتی تنها تشخیص مدل مکانیکی رفتار خاک و مقادیر ثابت‌های مکانیکی و نیروهای خارجی نیست. بلکه هدف نهایی تحلیل برگشتی ارزیابی روش‌های طراحی و اجرا در حین عملیات ساخت سازه است. به این معنی که نتایج حاصل از تحلیل برگشتی برای ارزیابی مجدد داده‌های ورودی استفاده شده در طراحی اولیه و ارزیابی جهت روش‌های طراحی و اجرای سازه از نظر ایمنی و اقتصادی استفاده می‌شوند. روند ارزیابی پایداری سازه‌ها و درستی روش‌های طراحی در شکل (۳-۳) بیان شده است. با در نظر گرفتن بحث فوق، به این نتیجه می‌رسیم که تحلیل برگشتی باید در حین عملیات ساختمانی مورد استفاده قرار گیرد. مفهوم تحلیل برگشتی در اینجا کاملا متفاوت از تحلیل عادی که قبل از شروع مراحل ساختمانی انجام می‌گیرد، می‌باشد (Sakurai, 1993).



شکل ۳-۳- مراحل طراحی و اجرای یک ساختار (Sakurai,1993).

۳-۵- فرضیه های متداول در تحلیل برگشتی

برای استفاده از روش تحلیل برگشتی که هدف آن، بررسی مجدد اطلاعات ورودی به مرحله طراحی و نیز بررسی کفایت روش‌های اولیه طراحی و ساخت از جنبه‌های اقتصادی و ایمنی است، توجه به نکات ذیل حائز اهمیت است (دهقان و همکاران، ۱۳۸۸):

- ✓ **انتخاب مدل رفتاری مناسب جهت مدل‌سازی طرح:** در تحلیل عادی، حداقل در مورد اطلاعات ورودی معین، نتیجه یکسانی به دست خواهد آمد. حتی در مواردی که رفتار واقعی خاک با روش پیش‌بینی شده مدل یکسان نباشد، باز هم یکسان بودن نتیجه قطعی است. از طرف دیگر در تحلیل برگشتی نتیجه به دست آمده یکسان نخواهد بود، چرا که عمل مدل‌سازی پس از تعیین اطلاعات ورودی صورت می‌گیرد.لذا عمل مدل-سازی در تحلیل برگشتی بسیار مشکل‌تر از مدل‌سازی در تحلیل عادی است. از این رو چنانچه مدل‌سازی فرض شده برای توده خاک متفاوت با واقعیت باشد، نتایج به دست‌آمده بر خلاف روش تحلیل عادی یکسان نخواهد بود.
- ✓ **توجه به خطاهای محاسباتی متداول در نرم‌افزارهای محاسبات عددی:** از آنجایی‌که خطاهای محاسباتی توسط نرم‌افزارهای عددی منجر به ایجاد خطا در خروجی‌ها خواهد شد، لذا در هر مدل‌سازی بایستی از نرم‌افزارهایی استفاده کرد تا پاسخ‌گوی نیازمندی-های طرح بوده و عدم دقت‌ها را کاهش دهد.
- ✓ **توجه به خطاهای ناشی از اندازه‌گیری ابزار دقیق:** از آنجا که روش تحلیل برگشتی بر پایه اطلاعات ابزار دقیق استوار است دقت در قرائت ابزارهای دقیق حائز اهمیت است. بنابراین در صورتی‌که اطلاعات انتشار یافته از طرف مشاور طرح دچار نقص و خطا باشد نتیجه آن مسلما چیزی به جز خطا در مراحل مختلف تحلیل برگشتی نخواهد بود در صورت عدم وجود خطا در داده‌های حاصل از ابزار دقیق، تحلیل برگشتی به درستی

انجام‌گرفته، که نتیجه آن برآورده شدن اهداف رفتار سنجی تونل، یعنی اصلاح و بهینه-سازی طرح حفاری‌ها و یا سیستم نگهداری موقت و دائم تونل خواهد بود.

برای طراحی و اجرای موفق یک تونل رعایت موارد زیر ضروری و اجتناب ناپذیر است:

- **پایداری:** انتخاب روش حفاری و احداث تونل باید با توجه به شرایط زمین در برگیرنده انجام شود. پایداری تونل در حین ساخت و تا قبل از اجرای پوشش دائم یکی از مهم‌ترین مسائل است (Saveur & Grantz, 1997).
- **جابجایی زمین و تأثیرات آن:** به دلیل مشکلات ناشی از نشست بر روی ساختمان‌های سطحی در شهرها لازم است. جابجایی‌ها پیش‌بینی و اثرات آن‌ها بر روی ساختمان‌ها موجود در مسیر تونل ارزیابی شود (Selby, 1999).
- **کارایی سامانه نگه‌دارنده:** پوشش موقت یا دائم تونل، باید در طول عمر خود توانایی تحمل بارهای وارده بر آن را داشته باشد. بنابراین لازم است که بارهای وارده بر آن پیش از طراحی پوشش تونل تخمین زده شود.

یافتن جابجایی مطلق نقاط مبنا در تحلیل کرنش و مقایسه کرنش موجود با کرنش حدی توده خاک اهمیت بسیاری دارد. همچنین مکان نصب ابزار دقیق و فاصله ایستگاه نصب از سینه کار و زمان قرائت ابزار دقیق پس از حفاری سینه کار اهمیت به سزایی دارد. چرا که تابع همگرایی فضای زیرزمینی یک تابع دو متغیره بوده که هم به گذشت زمان و هم به فاصله از سینه کار بستگی مستقیم دارد. معمولا ترتیب نصب ایستگاه‌های ابزار دقیق با توجه به محدودیت‌های اجرایی کارهای زیرزمینی به گونه‌ای است که مقداری از جابجایی‌ها اندازه‌گیری نمی‌شود. در موقع تحلیل کرنش و تحلیل برگشتی باید به ترتیبی از میزان کل جابجایی‌ها آگاهی یابیم تا بتوانیم تحلیل درستی از پایداری یا ناپایداری مقطع حفاری‌شده ارائه دهیم. این کار توسط روش‌های عددی تا حدودی قابل انجام است.

به هر حال بهترین و مطمئن‌ترین کار نصب ایستگاه تا حد ممکن نزدیک به سینه کار و قرائت جابجایی‌ها بلافاصله پس از حفاری است.

پس از اطمینان از میزان دقت جابجایی‌ها در نقاط مبنا به سراغ تحلیل برگشتی می‌رویم. با استفاده از نرم‌افزارهای موجود این کار با دقت مناسبی انجام می‌پذیرد. در تجزیه و تحلیل اطلاعات حاصل از تحلیل برگشتی از قضاوت مهندسی نباید غافل شد و تحلیل نتایج با توجه به جمیع جهات و در مقیاس زمین‌شناسی مناسب از محدوده‌ی طرح باید صورت پذیرد.

۳-۵-۱- انتخاب روش عددی مناسب

می‌توان گفت که در بسیاری از موارد مدل‌سازی، اهمیت شناخت محیط‌های پیوسته و ناپیوسته تأثیر بسیار زیادی در فرآیند تحلیل مسئله خواهد گذاشت.

۳-۵-۲- قسمت های مدل شده

در اکثر فضاهای زیرزمینی، کل فضا و اطراف آن اغلب شامل حفریات پیچیده‌ای است. به طوری که مدل‌سازی همه آن‌ها با در نظر گرفتن جزئیات، مشکل و اغلب موارد ناممکن است. پس آن قسمت از فضا که تأثیر قابل توجهی دارد مدل می‌شود.

۳-۵-۳- شرایط مرزی در مدل

میزان بارهای وارد شده به اطراف فضای زیرزمینی به صورت بارهایی بر مرز مدل اعمال می‌گردد و ابعاد مدل به گونه‌ای در نظر گرفته می‌شود که ناحیه تغییر شکل‌های اطراف تونل را در بر بگیرد.

۳-۵-۴- تعیین پارامترهای مجهول

برای اطمینان از یکتایی جواب تحلیل برگشتی و همچنین افزایش سرعت محاسبه، پارامترهای مجهول بر اساس قواعد زیر تعیین می‌شوند:

- پارامترهایی انتخاب می‌شوند که بیشترین تأثیر را در جابجایی مواد تشکیل‌دهنده اطراف فضای زیرزمینی دارند.
- پارامترهایی انتخاب می‌شوند که تعیین آن‌ها به کمک روش‌های دیگر مشکل است.
- تا آنجا که ممکن است پارامترهای مجهول کمتری انتخاب شود (Zhang, et al, 2006).

۳-۵-۵- مدل رفتاری

مدل رفتاری مناسب برای خاک باید مورد استفاده قرار گیرد.

۳-۵-۶- انتخاب نرم افزار برای تحلیل برگشتی

نرم افزارهای متعددی در زمینه تحلیل عددی تنش و کرنش در اطراف حفریات زیرزمینی وجود دارند. بعضی از این نرم‌افزارها قادر به تحلیل دو بعدی و سه بعدی می‌باشند. با توجه به نیاز مورد نظر و دقت مورد انتظار نرم افزار انتخاب می‌شود.

۳-۶- انواع روش های تحلیل برگشتی

در فرآیند مهندسی، با دو گروه از انتخاب‌ها مواجه هستیم، گروه اول مربوط به روش‌های مدل-سازی و گروه دوم مربوط به مقادیر عددی داده‌های ورودی است. با اینکه انتخاب‌های صورت گرفته در زمینه مدل‌سازی کاملا وابسته به تجربه و قضاوت مهندسی هستند، ولی انتخاب پارامترهای ورودی کاملا بستگی به اطلاعات موجود از سیستم حقیقی دارد. در برخی موارد این اطلاعات ضعیف-تر از آن هستند که بتوان داده‌های ورودی را به طور کامل و دقیق تعیین نمود. برای غلبه بر این مشکل می‌توان از اندازه‌گیری‌های صحرایی در طی مراحل اولیه ساخت با استفاده از تحلیل برگشتی بهره برد. روش‌های گوناگونی جهت تحلیل برگشتی در مهندسی خاک توسعه یافته که از مسائل الاستیک ساده تا مسائل پیچیده غیرخطی را شامل می‌شود (Mckinnon, 2001).

به طور کلی روش‌های تحلیل برگشتی را می‌توان به دو دسته معکوس[1] و مستقیم[2] تقسیم‌بندی نمود. تقسیم‌بندی دیگر در بین روش‌های تحلیل برگشتی را می‌توان به صورت روش‌های قطعی و روش‌های احتمالاتی بیان نمود.

۳-۶-۱- تحلیل برگشتی معکوس

در تحلیل برگشتی معکوس نیازی به فرمول‌بندی تحلیل تنش به حالت عکس وجود ندارد، بلکه معادلات حاکم بر مساله تحلیل تنش عکس می‌شوند تا کمیت‌های مجهول در آن که همان اندازه-گیری‌های موجود هستند به صورت داده‌های ورودی ظاهر گردند و در مقابل، مقادیری که در تحلیل تنش، معلوم در نظر گرفته می‌شوند، مثل مدول الاستیسیته به صورت گروه مجهولات ظاهر شوند. باید توجه داشت که تعداد سنجش‌های برجا باید بیشتر از تعداد پارامترهای مجهول باشد تا اینکه در دستگاه معادلات، تعداد مجهولات کمتر از تعداد معادلات شوند. لیکن مشکل عمده در روش معکوس، دستیابی به یک راه‌حل پایدار از لحاظ عددی برای مقادیر شدیدا پراکنده اندازه‌گیری شده (که در مسائل مهندسی خاک امری عادی است) می‌باشد. همچنین در صورت به کارگیری این روش در مسائل غیرخطی مشکلاتی بروز می‌نماید (Akutagawa, 2006).

این روش به دلیل عدم نیاز به تکرار و در نتیجه کاهش زمان محاسبه، در کاربردهای مهندسی جایگاه ویژه‌ای پیدا نموده است. از آن جایی که روش‌های این گروه نیازمند معکوس نمودن معادلات حاکم بر مسئله تحلیل تنش می‌باشند، می‌بایستی روش‌های متفاوتی را برای مسائل مختلف تحلیل برگشتی با درجه‌بندی به کار برد، چرا که شیوه حل این روش‌ها بستگی به خصوصیات به کار رفته در روش مدل‌سازی و پارامترهایی که باید به طور برگشتی محاسبه شوند، دارند (Zhifa, 2000).

[1] Inverse
[2] Direct

۳-۶-۱-۱- تحلیل برگشتی ثابت های الاستیک

این روش مبتنی بر روش اجزاء محدود پیشنهادی کاوانژه برای تحلیل برگشتی مدول الاستیک است و از الگوریتم حداقل مربعات برای تعیین مقدار بهینه پارامترهای مجهول استفاده می‌کند. با داشتن جابجایی و معادلات و منحنی‌های بدست آمده می‌توان ماتریس سختی و سپس مدول بالک را محاسبه کرد.

این روش نیاز به ایجاد رابطه‌ی خطی بین ماتریس سختی هر المان $[k^e]$ و خصوصیات مواد مجهول دارد. این روش در مواد ایزوتروپیک با توصیف رفتار الاستیک بر حسب مدول بالک[1] و مدول برشی[2] (به جای مدول یانگ و نسبت پواسون) به آسانی صورت می‌گیرد (Jason, 2006).

$$[K^e] = \mathrm{K}\,[K^e]_K + \mathrm{G}\,[K^e]_G \qquad (۱-۳)$$

که در آن:

$[K^e]_K$: ماتریس صلبیت حجمی المان eام

$[K^e]_G$: ماتریس تفاضلی المان eام

با در نظر گرفتن رابطه (۳-۱) در حالت کلی می‌توان ماتریس سختی مدل اجزاء محدود را به شکل معادله (۳-۲) نوشت:

$$[\mathrm{K}] = \sum_{i=1}^{2n}[K_i] \qquad (۲-۳)$$

به طوری که n تعداد مواد مختلف (۲n تعداد پارامترهای الاستیک مجهول) و K_i ماتریس سختی مجموع است که در آن همه پارامترها صفر هستند به استثنای پارامتر iام که مقدار یک دارد. حال فرض می‌شود که n مولفه تغییر مکان از نقاطی در سیستم واقعی که توسط یک توزیع بار مشخص ایجاد شده است اندازه‌گیری شده و این نقاط منطبق بر گره‌هایی روی شبکه المان محدود باشند. بنابراین دستگاه معادلات خطی توصیف کننده رفتار مدل عددی را می‌توان به صورت زیر نوشت:

[1] Bulk Modulus
[2] Shear Modulus

$$\begin{bmatrix}[K_{11}] & [K_{12}]\\ [K_{21}] & [K_{22}]\end{bmatrix}\begin{bmatrix}[u_1]\\ [u_2]\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}F_1\\ F_2\end{bmatrix} \quad (۳-۳)$$

به طوری که بردار $[u_1]$ تمامی مولفه‌های تغییر مکان اندازه‌گیری شده را در خود جمع کرده و F_1 و F_2 بردار نیروهای گره‌ای هستند. رابطه (۳-۴) را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

$$[U_2] = [K_{22}^{-1}]\ (\ [F_2]-[K_{21}]\ [u_1]\ ) \quad (۴-۳)$$

اگر ماتریس Q را به صورت زیر تعریف کنیم:

$$[K_{12}]\ [K_{22}^{-1}]= [Q] \quad (۵-۳)$$

آنگاه:

$$([K_{11}] + [Q]\ [K_{21}])\ [u_1]= [F_1]-[Q]\ [F_2] \quad (۶-۳)$$

با در نظر داشتن روابط (۳-۲) و (۳-۶) می‌توان رابطه زیر را ارائه کرد:

$$\sum_{i=1}^{2n} P_i \quad [\gamma_i] = [F_1]-[Q]\ [F_2] \quad (۷-۳)$$

به طوری که:

$$[\gamma_i]= ([K_{11}]_i-[Q]\ [K_{21}]_i)[u_1] \quad (۸-۳)$$

ماتریس سختی در رابطه (۳-۷) با تفکیک ماتریس $[K_i]$ به حالت مشابه رابطه (۳-۲) تعیین گردیده است. پارامترهای الاستیک مجهول به ۲n بردار P گروه‌بندی می‌شوند و بردارهای $[\gamma_i]$ به ماتریس $[R]$ که یک ماتریس $m\times 2n$ است.

$$[R]= [\gamma_1\ \gamma_2 \cdots \gamma_{2n}\ ] \quad (۹-۳)$$

رابطه (۳-۹)، رابطه (۳-۱۰) را نتیجه می‌دهد:

$$[R]\ [P] = [F_1]-[Q]\ [F_2] \quad (۱۰-۳)$$

دستگاه معادلات رابطه (۳-۱۰) تنها هنگامی جواب دارد که تعداد معادلات (تعداد تغییر مکان-های اندازه‌گیری شده) برابر یا بیشتر از تعداد پارامترهای الاستیک مجهول باشد. به این نکته باید

توجه کرد چنین شرطی برای به دست آوردن جواب معنی‌دار از مسئله تحلیل برگشتی لازم بوده ولی کافی نیست. در حقیقت برای تعیین مقادیر صحیح پارامترهای مجهول می‌بایستی که اندازه‌گیری‌های موجود، نیازهای مختلف را براورده سازد. از این رو رعایت نکات زیر ضروری است:

الف- خطای اندازه‌گیری‌ها باید به اندازه کافی کوچک باشد.

ب- پارامترهای مجهول بایستی تاثیر محسوسی بر کمیت اندازه‌گیری شده داشته باشند. این امر مهندس را به انتخاب دقیق پارامترهای اندازه‌گیری ملزم می‌کند.

با این فرض که در رابطه (۳-۱۰) تعداد داده‌ها بیش از تعداد مجهولات باشد و اندازه‌گیری‌هایی با کیفیت خوب در دسترس قرار گیرد، می‌توان از روش حداقل مربعات استفاده نمود و دستگاه معادلات غیرخطی زیر را بدست آورد. توجه شود که ماتریس ضرایب $[R]$ بستگی به ماتریس $[Q]$ و بردار مجهول $[P]$ دارد.

$$[R]^T\ [R]\ [P]= [R]^T([F_1]-[Q]\ [F_2]) \qquad (۳-۱۱)$$

دستگاه فوق را می‌توان با یک روند تکراری ساده حل نمود که در هر مرحله نیاز به عکس نمودن درایه $[K_{22}]$ از ماتریس سختی کلی در رابطه (۳-۴) می‌باشد. به طوری که در انتهای هر تکرار بر اساس پارامترهای مشخص شده، مقدار آن تعیین می‌شود.

۳-۶-۲- تحلیل برگشتی مستقیم

فرمول‌بندی بکار رفته در روش مستقیم همانند تحلیل تنش عادی است. اساس روش مستقیم بر مبنای بهینه‌سازی با استفاده از تکرار استوار است. در این حالت مسئله تحلیل معکوس با استفاده از رابطه بهینه‌سازی طوری حل می‌شود که مقادیر آزمایشی پارامترهای مجهول در الگوریتم تحلیل تنش، منجر به حداقل شدن اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسبه شده، می‌شود (قدیری، ۱۳۸۹).

مزایای این روش عبارتند از:

- ✓ آن را می‌توان بدون نیاز به اطلاع از ریاضیات پیچیده برای مسائل غیرخطی به کار برد.
- ✓ الگوریتم‌های استاندارد برنامه‌سازی مانند سیمپلکس[1] و روزنبرگ[2] برای آن قابل کاربرد است.
- ✓ قابلیت استفاده سریع از آن برای زمانی که با داده‌های فراوانی سروکار داریم فراهم می‌آورد.

۳-۶-۲-۱- روش سیمپلکس (چند ضلعی انعطاف پذیر)

یک چند ضلعی در فضای n بعدی از پارامترهایی که بایستی ارزیابی شوند (متغیرهای آزاد)، مجموعه‌ای از n+1 نقطه یا راس است. به طوری که n بردار از یک نقطه به نقاط دیگر مستقل خطی باشند. با انتخاب یک چند ضلعی یعنی n+1 مجموعه از پارامترهای آزمایشی مناسب، تابع خطا در هر راس تعیین می‌شود. راسی که دارای بیشترین خطا است توسط مرکز رئوس دیگر منعکس می‌شود. اگر خطای مربوطه به راس انعکاس یافته نسبت به خطای سایر رئوس کوچک باشد، راس خطای حداکثر توسط راس انعکاس یافته جایگزین می‌شود و فرآیند با این جایگزینی ادامه می‌یابد. در غیر این صورت آزمایش‌های دیگری انجام می‌گردد که یا به کاهش خطای میانگین چند ضلعی منجر شود و یا فرآیند حداقل نمودن قطع گردد (اعصاری، ۱۳۸۴).

۳-۶-۲-۲- الگوریتم روزنبرگ

این روش در رده روش‌های جستجوی مستقیم قرار می‌گیرد. ساده‌ترین روند از این نوع، شامل اجرای حداقل نمودن تابع خطا نسبت به هر متغیر است که طی آن متغیرهای باقی‌مانده ثابت نگه داشته می‌شوند. این روش‌ها تنها زمانی کارآمد است که بر هم کنش اندکی بین متغیرها وجود داشته باشد. تابع خطا تقریبا به موازات یک محور، گودی نشان می‌دهد. این امر مبنای روزنبرگ را مشخص

[1] Simplex
[2] Rosenburg

می‌کند، که در آن کاهش خطا براساس حرکت در راستای محوری قابل تغییر، انجام می‌گیرد و در هر گام سعی می‌شود جهت کلی فرورفتگی به دست آمده و اولین محور در گام بعدی در این راستا انتخاب شوند (Gioda, 1985).

۳-۶-۲-۳- روش پاول[1]

این شیوه روشی جدیدتر و پیشرفته‌تر است که در حالت جستجوی مستقیم از مزایای عملی روش ترکیب گرادیان بهره می‌برد. هنگامی که یک نقطه در فضای متغیرهای آزاد از محدوده‌ای فراتر می‌رود، تابع خطا مقدار بزرگی را به خود می‌گیرد و در نتیجه روش حداقل‌سازی به طور خودکار به مسیر بهینه در ناحیه محتمل باز می‌گردد (Gioda, 1985).

۳-۶-۳- تحلیل برگشتی به روش قطعی و احتمالاتی

روش‌های قطعی را می‌توان هنگامی که اندازه‌گیری‌ها با دقت بالا صورت گرفته یا هنگامی که ساختار ریاضی روش نسبت به خطای احتمالی که ممکن است داده‌های ورودی را تحت تاثیر قرار دهد پایدار باشد، به کار برد. در مقابل، کاربرد روش‌های احتمالاتی هنگامی است که عدم اطمینان در ثبت اندازه‌گیری‌ها صورت گرفته، تاثیر قابل توجهی در نتایج محاسبات داشته باشد. از آنجا که اندازه-گیری‌های صحرایی به عنوان داده‌های ورودی تحلیل برگشتی محسوب می‌شوند، لذا در حالت کلی این اندازه‌گیری‌ها تحت تاثیر خطاهایی قرار می‌گیرند که وابسته به ماهیت کمیت‌های اندازه‌گیری شده (تغییر مکان، کرنش، فشارهای منفذی)، مشخصات وسیله اندازه‌گیری و شرایط موجود در محل هستند. این خطاها تاثیر انکار ناپذیری در نتایج تحلیل برگشتی داشته و گاهی ممکن است منجر به محاسبه مقادیری در تحلیل شوند که تفاوت زیادی با مقادیر واقعی داشته باشند. این تاثیر کاملا به خصوصیات مسئله و روش بکار رفته در حل آن وابسته است. بنابراین تحلیل برگشتی قابل قبول تنها زمانی انجام می‌شود که اندازه‌گیری‌ها با دقت بالا، توسط ابزاری مناسب در اختیار تحلیل‌گر قرار گیرد.

[1] Powell

با این وجود در بسیاری از موارد مقادیری در دسترس است که تحت تاثیر عوامل مختلف، دارای خطا هستند. آشکار است که در این حالت تعیین کمی خطا داده‌های ورودی بر دقت پارامترهای محاسبه شده تاثیر قابل توجهی خواهد داشت. در روش‌های تحلیل برگشتی احتمالاتی، امکان در نظر گرفتن خطای اندازه‌گیری‌ها در محاسبات وجود دارد. عموما این روش‌ها بر مبنای آمار پیشرفته ایجاد شده‌اند و انجام تحلیل‌های آماری با این روش‌ها معمولا به یک متخصص آمار نیاز دارد (Gioda, 1985).

از جمله این روش‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره نمود (Oreste, 2005).

۳-۶-۳-۱- روش بیزین

روش بیزین[1] جزء روش‌های آماری به شمار می‌رود که برای اولین بار در سال ۱۹۸۷ در زمینه مهندسی سازه و ژئوتکنیک ارایه شد. جنبه شاخص این روش در آن است که می‌توان اطلاعات اولیه را از پارامترهای مجهول، همزمان با اندازه‌گیری صحرایی به دست آورد. این اطلاعات می‌تواند شامل تخمین‌هایی از پارامترهای مجهول بر اساس قضاوت‌های مهندسی باشند. این امر موجب می‌شود که روند تحلیل برگشتی سیری منطقی را طی کند و طراح اطلاعاتی را که بر اساس تجربه، از مسائل مشابه به دست آورده است در روند تحلیل وارد نماید. در واقع روش تحلیل برگشتی بیزین اطلاعات اولیه و اطلاعات حاصل از اندازه‌گیری‌ها را ترکیب نموده و در به دست آوردن بهترین تخمین از پارامترهای مجهول به کار می‌رود. اگر بتوان حدس اولیه‌ای از پارامترها را فرمول‌بندی نمود در این صورت می‌توان روش تحلیل برگشتی بیزین را هنگامی که پارامترهای مجهول بیش از تعداد اندازه-گیری برجا باشد نیز به کار برد (Panet & Gunet, 1982).

۳-۶-۳-۲- روش فیلتر کالمن

ابتدا از این روش برای تعیین پارامترهای تحکیم خاک استفاده شد و سپس یک الگوریتم تکرارپذیر برای آن در نظر گرفته شد که با استفاده از آن مدول الاستیسیته تحت شرایط بارگذاری به

[1] Bayesian

دست می‌آمد. فیلتر کالمن[1] یک روش قوی است که امکان در نظر گرفتن خطای اطلاعات اولیه در تحلیل برگشتی یا همان خطاهای اندازه‌گیری در آن وجود دارد. حل مسائل دوبعدی کرنش صفحه‌ای با اجزا محدود نوعی از فرمول‌بندی فیلتر کالمن است (Kalman, 1960).

۳-۶-۴- تحلیل برگشتی جستجو مستقیم با به کارگیری روش بهینه سازی

یکی از روش‌های مناسب پیشنهاد شده برای تحلیل برگشتی روش جستجوی مستقیم می‌باشد. روش جستجو مستقیم، روش بهسازی بدون محدودیت می‌باشد (Jeon & Ynag, 2004).

از میان روش‌های بهسازی موجود که در روش جستجو مستقیم به کار می‌رود روش تک متغیره، تک متغیره جایگزین و روش جستجوی الگویی می‌باشد. با بررسی‌های انجام شده توسط یانگ و جئون[2] مشخص گردیده است، روش تک متغیره و روش تک متغیره جایگزین مقدار پارامترهای طراحی (خصوصیات مکانیکی سنگ محیط) را صرف نظر از مقدار اولیه آن‌ها به طرز موفقیت‌آمیزی جستجو می‌نمایند، در حالی که روش جستجوی الگویی در بعضی موارد با شکست مواجه می‌شود (Jeon & Ynag, 2004). روش بهینه‌سازی بر مبنای کمینه کردن تابع خطای زیر که به نام تابع هدف نامیده می‌شود استوار است.

(۱۲-۳)

$$\text{Error}=\frac{\sum_{K=1}^{N}[u_k-u_k^*]^2}{\sum_{K=1}^{N}u_k^*}$$

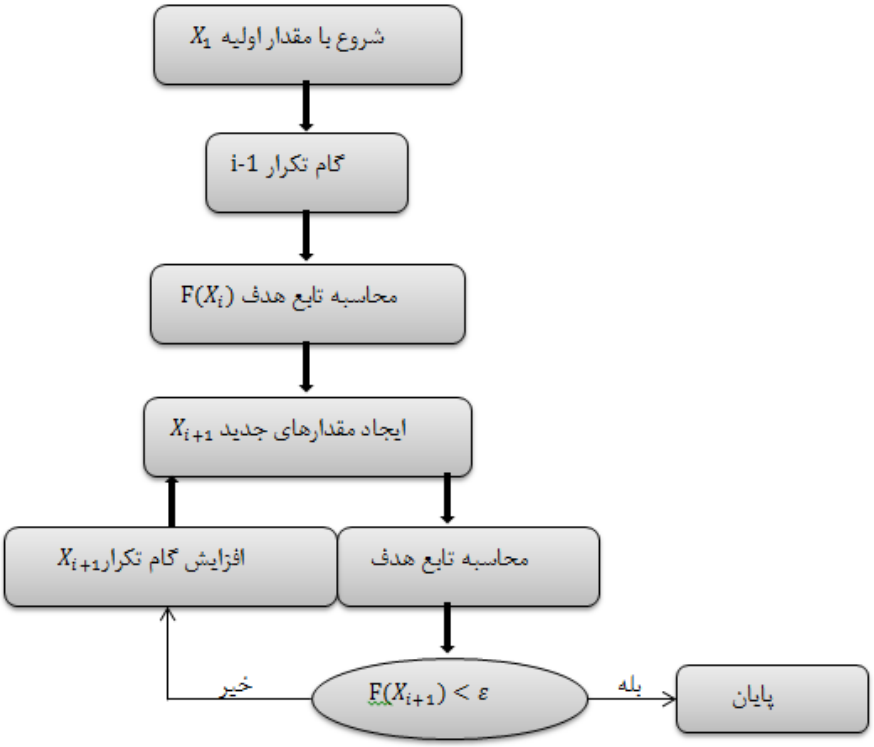
در معادله (۱۲-۳) u_k^* و u_k به ترتیب مقدار اندازه‌گیری شده و مقدار محاسبه شده در نقطه i می‌باشند. N تعداد نقاط اندازه‌گیری شده می‌باشد. شکل (۳-۴) طرح کلی روش بهینه‌سازی تکرار را نمایش می‌دهد. مقدار اولیه که برای پارامتر مجهول X_i به کار می‌رود، مقداری است که معمولا برای تحلیل معمولی به کار می‌رود. متعاقبا تابع هدفی که توسط معادله (۱۲-۳) ارایه گردید کنترل می-

[1] Kalman Filter
[2] Jeon

شود که آیا به حد مجاز همگرا می‌شود یا خیر. در صورتی که تابع هدف به حد مجاز همگرا شود، گام تکرار متوقف خواهد شد و در غیر این صورت بعد از اصلاح پارامترها توسط روش بهینه، گام تکرار تا همگرایی شرط مذکور ادامه خواهد یافت. یانگ و جئون با مطالعات خود در این زمینه تابع برگشتی برای محاسبه مقدار جدید X_i، به صورت معادله (۳-۱۳) ارایه نمودند:

$$X_{i+1}= X_i + \lambda_i^*. S_i \qquad (۱۳-۳)$$

در معادله فوق λ_i^* فاصله گام و S_i امتداد جستجو می‌باشد. فاصله گام به صورت نسبت کمیت محاسبه شده به اندازه‌گیری شده و امتداد جستجو نیز مطابق با روش استفاده شده تعریف می‌گردد.

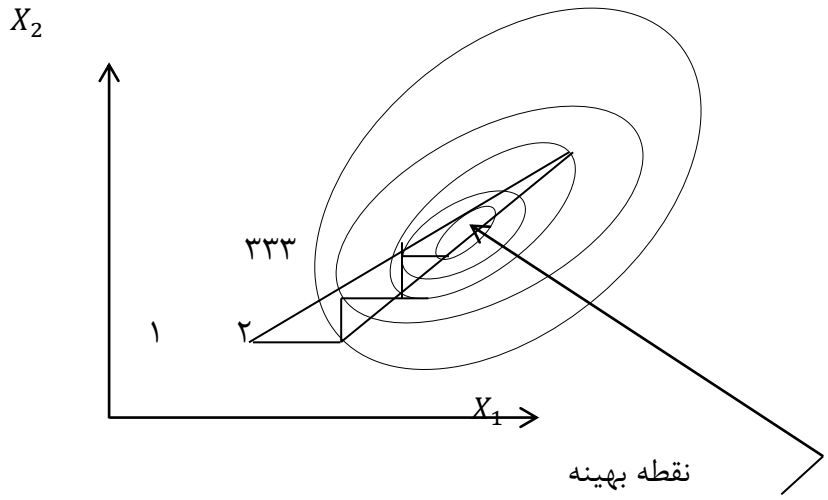


شکل ۳-۴- طرح کلی روش بهینه‌سازی تکرار (Jeon & Ynag, 2004).

۳-۶-۴-۱- روش جستجوی تک متغیره

شکل (۳-۵) فرایند جستجویی را که طی آن نقطه هدف توسط روش جستجوی بهینه به دست می‌آید را نشان می‌دهد. نقاط ۱ و ۲ و ۳ نقاط متوالی هستند که توسط روش تک متغیره به دست

آمده‌اند. جستجو برای نقطه بهینه در امتداد موازی با جهات محورهای مختصات می‌باشد. در این روش فقط یک متغیر تغییر می‌کند و با ایجاد یک سری توالی از تخمین‌های بهبود یافته از آن متغیر، نقطه بهینه را جستجو می‌نماید. با شروع کردن از نقطه مرجع X_i در i تکرار و با ثابت نگه داشتن n-1 متغیر، مقدار متغیر آغازین تغییر می‌کند. بنابراین در هر مرحله از تغییر یک مقدار جدیدی برای X_{i+1} حاصل می‌شود. این جستجو در جهت جدید ادامه پیدا می‌کند. این جهت جدید با تغییر دادن هر یک n-1 متغیری که تکرار قبلی ثابت شده بودند به دست می‌آید. روند جستجو با در نظر گرفتن یک به یک هر کدام از جهت‌ها ادامه پیدا می‌نماید. بعد از اینکه همه‌ی n جهت جستجو شدند اولین چرخه کامل شده است. بنابراین تمام فرآیند بهینه‌سازی متوالی تکرار شده است. این روند تا زمانی که تابع هدف به مقدار حدی نزدیک شود ادامه پیدا می‌کند (Jeon & Ynag, 2004). در واقع می‌توان گفت که سعی در کمینه نمودن تابع خطا در امتداد یکی از مولفه‌های اصلی را دارد.



شکل۳-۵- فرایند جستجو نقطه بهینه (Jeon & Ynag, 2004).

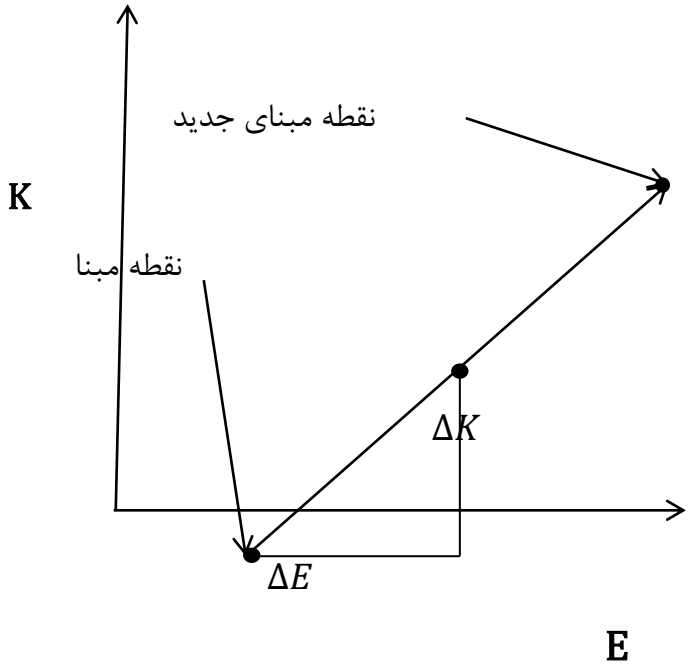
۳-۶-۴-۲- روش جستجوی الگویی

روش جستجوی الگویی، مفهوم تعمیم یافته‌ای از روش تک متغیره است. روش کار آن به این صورت است که با به کار بردن n گام تک متغیره و سپس جستجو کردن برای نقطه بهینه در امتداد جهت S_p که توسط رابطه زیر معرفی شده است، می‌باشد.

$$S_p = X_i - X_{i-n} \qquad (۱۴-۳)$$

X_i نقطه به دست آمده در پایان n گام تک متغیره و X_{i-n} نقطه آغازین قبل از به کار بردن n گام تک متغیره می‌باشد. جهتی که توسط معادله (۳-۱۴) تعریف شده است به عنوان جهت الگو نامیده می‌شود.

شکل (۳-۶) طرح اولیه از روش جستجوی الگویی را با این فرض که هدف جستجوی مقدار مدول الاستیسیته E و نسبت تنش افقی به قائم (K) باشد، را با این الگوریتم نشان می‌دهد (Jeon & Ynag, 2004).



شکل ۳-۶- طرح اولیه از روش جستجوی الگویی (Jeon & Ynag, 2004).

۳-۶-۴-۳- روش جستجوی تک متغیره جایگزین

روش تک متغیره جایگزین یک روش بسیار پیشرفته‌ای است. روش این الگوریتم به این صورت است که n گام تک متغیره و n متغیر توامان با یکدیگر تغییر می‌کنند. در واقع فرایندی است که طی آن با تغییر همزمان n متغیر تا زمانی که تابع هدف به مقدار حد مجاز همگرا شود ادامه پیدا می‌کند (Jeon & Ynag, 2004).

۳-۶-۴-۴- بهینه سازی با روش حداقل مربعات

اساس این روش مبتنی بر حداقل نمودن تفاوت موجود بین اندازه‌گیری صحرایی و محاسبه شده در مدل عددی است. در عمل می‌توان تابع خطا ε را برای توصیف تفاوت ذکر شده طبق رابطه (۳-۱۵) به کار برد.

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^{n}(U_{mi} - U_{pi})^2 \qquad (۱۵-۳)$$

که U_{mi} مقادیر اندازه‌گیری شده و U_{pi} مقادیر پیش‌بینی شده از مدل عددی هستند. واضح است که می‌توان این تعریف را به شکل‌های دیگری مانند قدرمطلق تفاضل حداکثر در رابطه (۳-۱۵) بیان نمود. در این رابطه تابع خطا وابسته به مقدار U_{pi} حاصل از مدل عددی خواهد بود و مقادیر U_{pi} بستگی به پارامترهای $[P]$ دارد که بایستی از تحلیل برگشتی محاسبه شوند. در نتیجه تحلیل برگشتی برای تعیین مجموعه‌ای از پارامترهای $[P]$ جهت حداقل نمودن خطای ε یا به بیان دیگر تعیین مجموعه‌ای از پارامترها که به ازای آن‌ها مدل عددی بهترین تقریب را از سیستم واقعی نتیجه دهد انجام می‌گیرد.

در حالت کلی خطای بدست آمده توسط رابطه (۳-۱۵) تابعی غیرخطی و پیچیده از پارامترهای مجهول می‌باشد و روشی تحلیلی برای آن نمی‌توان بیان نمود. بنابراین الگوریتم حداقل این رابطه بایستی با توابع غیرخطی همخوانی داشته باشد و نیازی به ارزیابی تحلیلی گرادیان تابع نداشته باشد.

این الگوریتم‌ها روش‌های تکراری‌اند که فرایند حداقل نمودن را تنها با تخمین‌های متوالی تابع خطا انجام می‌دهند (Oreste, 2005)..

۳-۶-۵- تحلیل برگشتی هوشمند

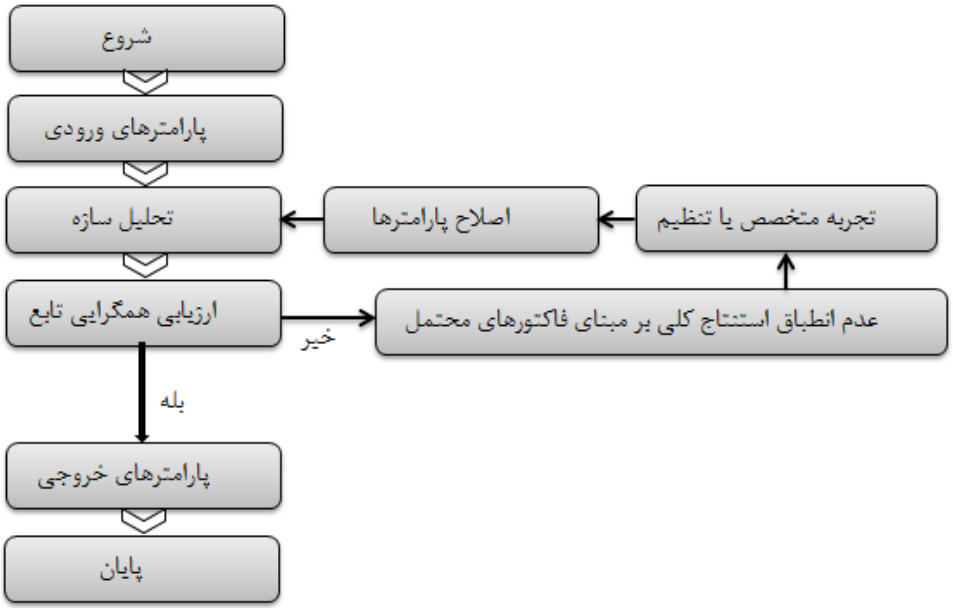
این روش از سال ۱۹۹۱ با کارهایی که لی و همکاران در زمینه هوش مصنوعی انجام داده‌اند به وجود آمده است. این روش با به کار بردن روش اجزا مرزی یک روش تحلیلی برگشتی مستقیم بر مبنای آزمون و خطا و تحت نظر دانش متخصص بر مبنای تحلیل‌های مکانیکی می‌باشد. این روش شامل شیوه‌های مختلفی است که از پرکاربردترین برنامه‌هایی که در تحلیل برگشتی هوشمند وجود دارد شکل گرفته است. در این مورد می‌توان به برنامه کامپیوتری BMP90 اشاره نمود. این برنامه از روش تحلیل بر مبنای موارد مشابه (PTA) استفاده می‌نماید. روش تحلیل بر مبنای تشابه برای مواردی که اطلاعات کاملی از پروژه‌های تونل‌سازی که در گذشته انجام شده و اطلاعات آن با دقت بالا جمع‌آوری و نگهداری می‌شود به کار می‌رود (Li, et al,2006).

اصول روش تحلیل برگشتی هوشمند، شامل یک زیر برنامه کامپیوتری برای کنترل زیر برنامه کامپیوتری دیگر که شامل روش تحلیل عددی برای پردازش داده‌ها و پس خوراند داده‌های جدید است، می‌شود. این روش نیازمند دانش متخصص و قوانین حاکم بر خصوصیات ژئومکانیکی می‌باشد، و در نهایت این که طی دو فرایند ذکر شده منجر به محاسبه جابجایی در نقاط رفتارسنجی و مطابقت تدریجی آن با داده‌های ثبت شده و نزدیک‌تر شدن این دو پارامتر، یعنی داده‌های بدست آمده از تحیلی برگشتی و داده‌های ثبت شده از ابزار رفتارنگاری می‌گردد.

می‌توان گفت که تحلیل برگشتی در این روش، نه تنها بستگی به تحلیل‌های مکانیک سنگی دارد، بلکه وابستگی شدیدی به تجربه متخصص نیز دارد. به عبارت دیگر تحلیل‌های مکانیک سنگ و روش هوش مصنوعی با استفاده از برنامه BMP90 ادغام شده‌اند. شکل (۳-۷) روند این برنامه را نشان می‌دهد.

لازمه استفاده از روش تحلیل برگشتی این است که باید داده‌های بسیاری از مکان‌های مختلف در اختیار مهندس طراح باشد تا بتواند تحلیل برگشتی مناسب را بین مشاهدات انجام شده در محل با مشاهداتی که در موارد مشابه انجام شده، از قبیل وضعیت زمینی که قرار است در آن فعالیتی آغاز گردد، وضعیت سیستم نگهداری موجود با سیستم‌های نگهداری مشابه، ابزارهای استفاده شده و مواردی از قبیل حفر و ... در اختیار داشته باشد. در صورتی که این ابزار فراهم گردد و بتوان موارد مشابه بسیاری را با مدل مورد نظر تطبیق داد، درآن صورت طبق نظر شیهویی[1] که این روش را با سایر روش‌های تحلیل برگشتی مقایسه نموده است، به مزیت‌های این روش به صورت زیر می‌توان اشاره کرد (Li, et al,2006):

- ✓ استفاده سریع و هوشمند
- ✓ قابل اعتماد
- ✓ قابل استفاده در مدت دوره رفتارسنجی



شکل ۳-۷- روش مورد استفاده در برنامه BMP90 (Li, shihui, et al,2006).

[1] Shihui

۳-۷- تحلیل برگشتی جابجایی ها برای دست یابی به مدول تغییر شکل و نسبت تنش ها

برای تحلیل برگشتی به روش مستقیم از روش جستجوی تک متغیره جایگزین استفاده شده است. از ویژگی های روش مستقیم این است که نیاز به حل معادلات پیچیده ندارد، همچنین الگوریتم استفاده شده در این روش نقطه بهینه را صرف نظر از مقدار اولیه به راحتی جستجو می-نماید، اما حجم محاسبات بالاست.

برای اطمینان از یکتایی جواب‌ها در تحلیل برگشتی و افزایش سرعت تحلیل، پارامترهایی به عنوان مجهول انتخاب می شوند که دارای شرایط زیر باشند:

۱) پارامترهای انتخاب شده اثر بیشتری بر روی تحلیل پایداری فضاهای زیرزمینی احداث شده داشته باشند.

۲) پارامترهایی انتخاب شوند که بدست آوردن آنها از طریق روش های دیگر بسیار مشکل باشد.

۳) با شناسایی پارامترهای مجهولی که به راحتی شناسایی می شوند، پارامترهای مجهول کاهش یابند.

به طور کلی در برنامه های عددی که در ژئومکانیک متداول شده پارامترهای ورودی به دو دسته کلی خصوصیات توده خاک و شرایط تنش منطقه ای تقسیم می شود. انتخاب مدل رفتاری مناسب اهمیت بسیاری در تحلیل برگشتی دارد. مدول تغییر شکل پذیری از خصوصیات توده خاک و نسبت تنش افقی برجا به تنش قائم به عنوان پارامترهای مجهول انتخاب شده اند. پارامترهای معلوم استفاده شده در تحلیل برگشتی مستقیم در جدول (۳-۱) آورده شده است.

جدول ۳-۱- پارامترهای معلوم تحلیل برگشتی

نسبت پواسون	چسبندگی (Pa)	زاویه اصطکاک (Deg)	چگالی (kg/m^3)
۰/۳۵	۲۵۰۰۰	۲۵	۱۷۵۰

در این روش دو پارامتر تعیین کننده یعنی مدول تغییر شکل پذیری و نسبت تنش های افقی به قائم با انجام تحلیل برگشتی مستقیم قابل دستیابی است.

معمولا نقطه شروع مقادیری هستند که در تحلیل های اولیه مورد استفاده قرار گرفته اند. این به این معنی است که با انتخاب پارامترهای ضعیف کمترین ضریب ایمنی برای پایداری سازه باید در نظر گرفت. البته باید به این نکته توجه نمود که نقطه شروع، نقطه مناسبی برای تحلیل انتخاب نشود. در چنین مواردی تابع خطای معرفی شده در رابطه (۳-۱۲) جهت جستجو را مشخص می‌نماید. در واقع در این روش هدف کمینه نمودن تابع خطای معرفی شده است.

بدین منظور نقطه شروع برای تعیین مدول تغییرشکل پذیری و ضریب تنش افقی به قائم برای استفاده از الگوریتم جستجوی تک متغیره جایگزین به ترتیب مقادیر ۱۰۰ مگا پاسکال و ۰/۵۹ است.

۳-۷-۱- روند تحلیل برگشتی

با انتخاب نقطه شروع و اعمال پارامترهای معلوم مدل را حل کرده و سپس تابع خطا را محاسبه می‌کنیم. پس از هفت مرتبه حل مدل تابع خطا به مقدار بهینه می‌رسد.

در جدول (۳-۸) مراحل تعیین پارامترهای E و K در فرایند جستجوی تک متغیره جایگزین برای مقطع مورد مطالعه در تونل خط دو مترو مشهد آورده شده است. همان‌طور که در جدول (۳-۲) مشاهده می شود، زمانی که مقدار E برابر با ۱۹۹ مگاپاسکال و K برابر با ۰/۴۸ می باشد، تابع خطا به کم‌ترین مقدار خود می‌رسد.

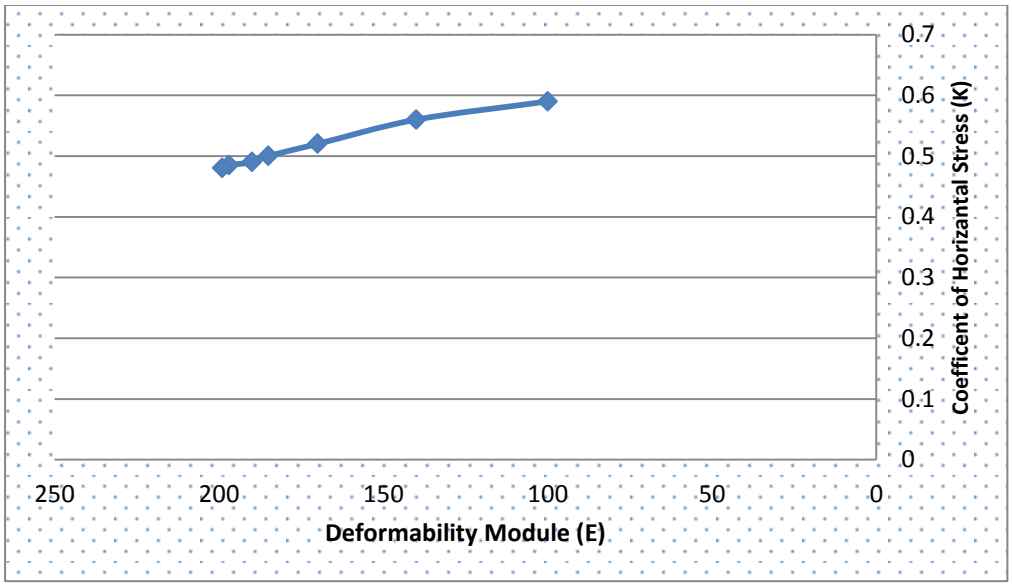
جدول ۳-۲- مراحل تعیین پارامترهای E و K در فرایند جستجوی تک متغیره جایگزین

تابع خطا	مقدار جابجایی به دست آمده از مدل‌سازی(mm)	E (MPa)	K	شما ره اجرا
۱/۱۲۹	۴/۶۲	۱۰۰	۰/۵۹	۱
۰/۸۶۶	۴/۰۵	۱۴۰	۰/۵۶	۲
۰/۵۷۶	۳/۴۲	۱۷۰	۰/۵۲	۳
۰/۳۴۵	۲/۹۲	۱۸۵	۰/۵	۴
۰/۰۹۶	۲/۳۸	۱۹۰	۰/۴۹	۵
۰/۰۱۸	۲/۲۱	۱۹۷	۰/۴۸۵	۶
۰/۰۰۴	۲/۱۸	۱۹۹	۰/۴۸	۷

جدول ۳-۳- مقایسه مقادیر اندازه گیری شده با مقادیر مدل شده

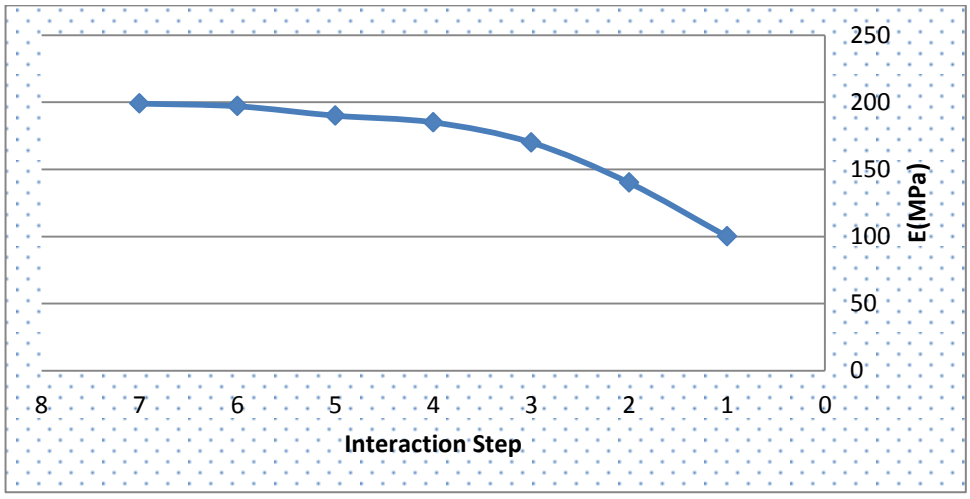
	مقدار جابجایی	E(Mpa)	K
مقادیر اندازه گیری شده	۲/۱۷	۱۰۰	۰/۵۹
مقادیر مدل شده	۲/۱۸	۱۹۹	۰/۴۸

شکل (۳-۹) جستجوی نقطه بهینه در روش جستجوی تک متغیره جایگزین، برای مقطع مورد مطالعه در تونل خط دو مترو مشهد را نشان می دهد. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است، در هر یک از مراحل اجرای مدل پارامترهای E و K به طور همزمان تغییر می‌کنند.

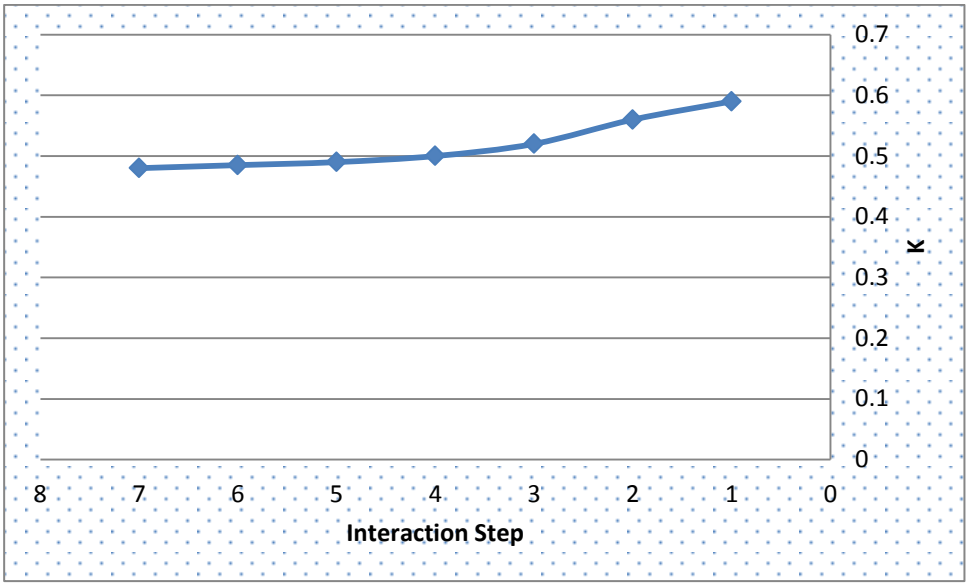


شکل ۳-۹- فرایند جستجو نقطه بهینه در روش جستجوی تک متغیره جایگزین به ازای تغییراتE و K

شکل‌های (۳-۱۰) و (۳-۱۱) تغییرات مدول تغییر شکل‌پذیری و نسبت تنش‌ها را به ازای هر گام جستجو نشان می‌دهند.

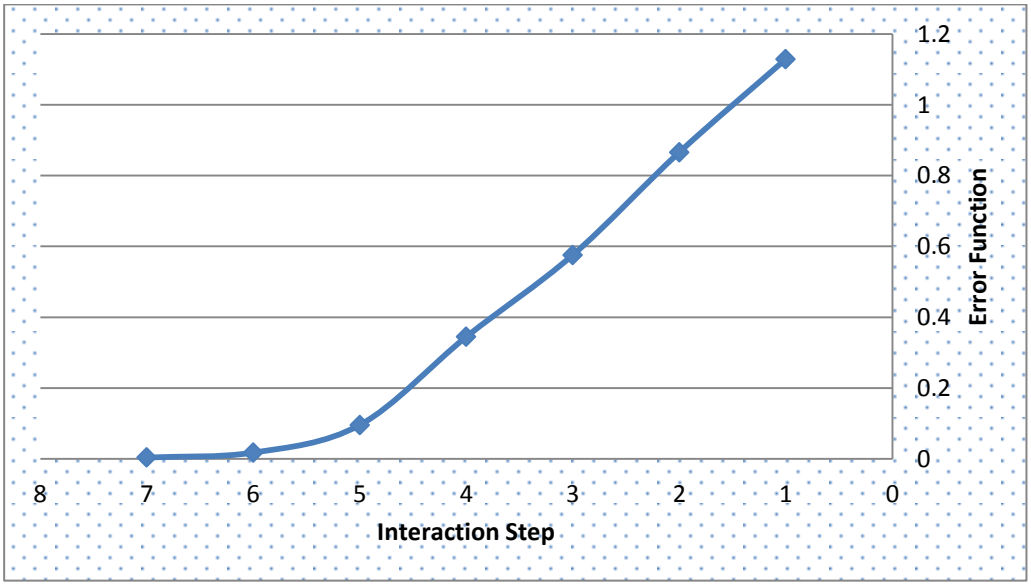


شکل ۳-۱۰- تحلیل برگشتی پارامتر مدول تغییر شکل پذیری



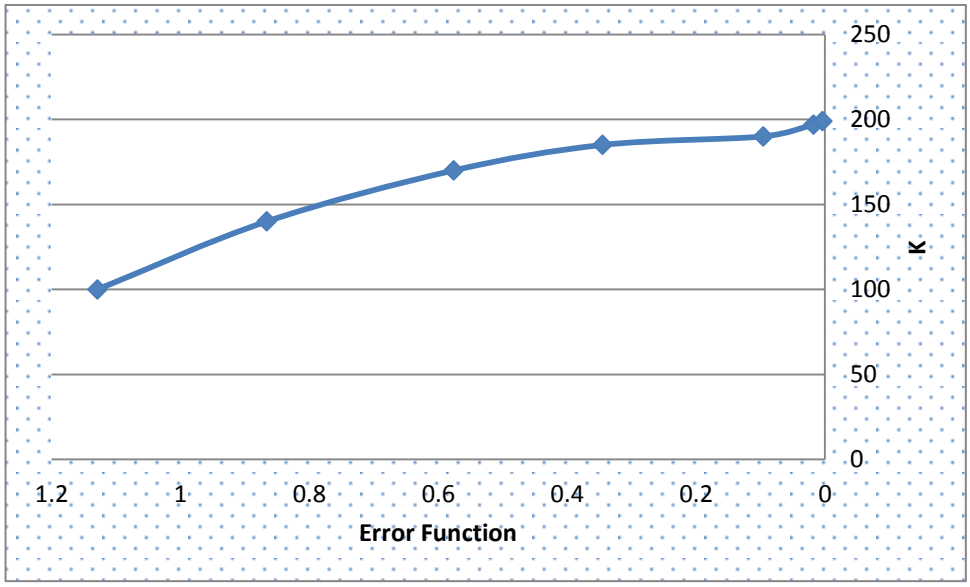
شکل ۳-۱۱- تحلیل برگشتی پارامتر نسبت تنش ها

در شکل (۳-۱۲) نمودار تابع خطا به ازای گام‌های تکرار نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که به ازای چند گام تکرار تابع به مقدار قابل قبولی همگرا می‌شود.

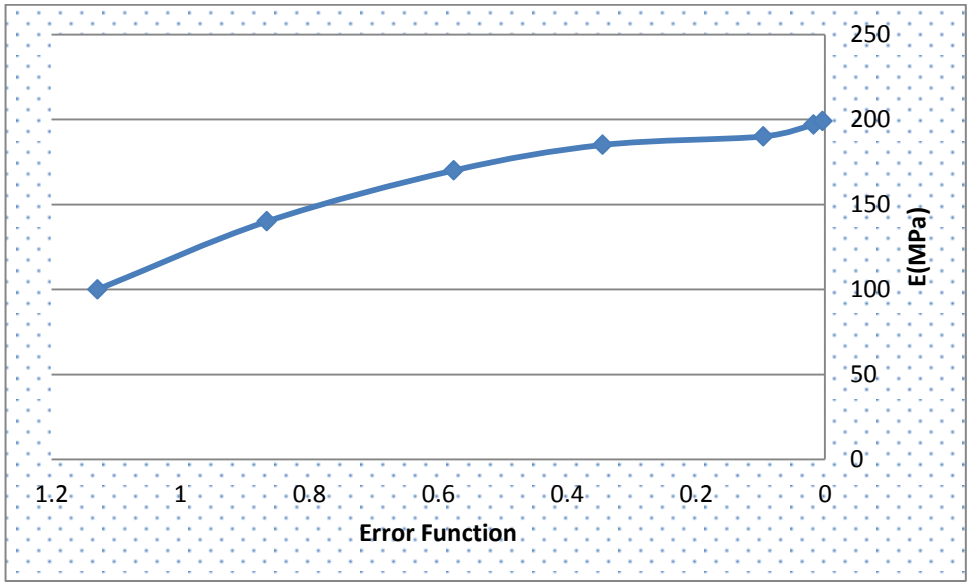


شکل ۳-۱۲- نمودار تابع خطا به ازای تعداد گام تکرار

شکل‌های (۳-۱۳) و (۳-۱۴) تغییرات تابع خطا به ازای تغییر نسبت تنش‌ها و مدول تغییر شکل پذیری را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱۳- تغییرات تابع خطا در برابر نسبت تنش ها



شکل ۳-۱۴- تغییرات تابع خطا در برابر مدول تغییر شکل پذیری

۳-۸- نتیجه گیری

تحلیل برگشتی برای حل مسایل مرتبط با رفتارنگاری به صورت مستقیم و معکوس به وجود آمده است. در بسیاری از موارد به علت محدودیت در ارتباط با حل مسایل، از تحلیل برگشتی مستقیم استفاده می‌نماییم. ویژگی تحلیل برگشتی مستقیم در این است که نیاز به فرمول‌بندی پیچیده ندارد و علاوه بر آن الگوریتم استاندارد برنامه نویسی برای آن موجود است. تحلیل برگشتی با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی از جمله روش‌های تحلیل برگشتی مستقیم است. ویژگی جالب توجه این روش‌ها کاستن تعداد محاسبات در تحلیل برگشتی است، که کمک بسیاری در روند جستجوی پارامترهای بهینه می‌نماید.

در این فصل سعی شد در ابتدا تحلیل برگشتی و روش‌های آن به طور کامل معرفی و نقاط ضعف و قوت هر کدام بیان شود، در ادامه با استفاده از داده‌های کشیدگی‌سنج در تونل خط دو مترو مشهد تحلیل برگشتی در مقطع مورد مطالعه انجام گرفت. تحلیل برگشتی در این مقطع با استفاده از روش تحلیل برگشتی مستقیم تک متغیره جایگزین با نرم‌افزار FLAC3D بر روی پارامترهای مدول تغییر شکل‌پذیری و نسبت تنش افقی به قائم انجام گرفت. پس از هفت مرتبه حل مدل تابع خطا به مقدار مورد نظر همگرا شد و به ترتیب برای پارامترهای مدول تغییر شکل‌پذیری و نسبت تنش‌ها مقادیر ۱۹۹ و ۰/۴۸ محاسبه گردید.

در فصل بعد به تحلیل پایداری تونل خط دو مترو مشهد در مقطع مورد مطالعه با توجه به پارامترهای تصحیح شده توسط تحلیل برگشتی با استفاده از نرم‌افزار FLAC3D می‌پردازیم.

فصل چهارم

تحلیل پایداری تونل خط ۲ مترو مشهد

۴-۱- مقدمه

تحلیل و بررسی پایداری یکی از اصول اصلی مهندسی مکانیک خاک در پروژه‌های زیرزمینی و یا هر سازه حفر شده در خاک می‌باشد. بدین منظور همواره پژوهشگران به دنبال روش‌هایی برای بررسی‌های ایمنی و اقتصادی در پروژه‌های عظیم زیرزمینی بوده‌اند و گاهی از روی تجربه نیز اصولی برای بررسی‌های پایداری در سازه های زیرزمینی ارائه شده است.

آنچه که در این فصل مد نظر است ارائه تحلیل پایداری مبتنی بر مدل سازی عددی می‌باشد. بدین منظور با استفاده از نتایج مدل سازی سه بعدی و روش کنترل مستقیم کرنش به تحلیل پایداری تونل خط ۲ مترو مشهد پرداخته می‌شود.

۴-۲- مدل سازی

به طور کلی مدل سازی را به دو دسته روش‌های مرزی و روش‌های ناحیه‌ای می‌توان تقسیم نمود. روشهای مرزی به آن دسته از روش‌هایی اطلاق می‌شود که در آن فقط مرز حفاری به اجزا کوچک تقسیم شده و درون توده از لحاظ ریاضی یک محیط پیوسته نامحدود در نظر گرفته می‌شود. روش‌هایی ناحیه‌ای به آن دسته از روش‌هایی گفته می‌شود که درون توده به اجزا کوچک هندسی تقسیم شده و فرض می‌شود که هر کدام دارای خواصی مشابه باشند. از روش‌های مرزی می‌توان به روش اجزا مرزی و از روش‌های ناحیه‌ای می‌توان به روش‌های اجزا محدود و تفاضل محدود و روش اجزا مجزا اشاره نمود. این دو دسته‌بندی می‌تواند به صورت شکل‌های ترکیبی ادغام شود تا مزایای هر دو روش را به حداکثر رسانده و معایب آنها را به حداقل کاهش دهد. درباره دو روش مذکور می‌توان یک سری مقایسه کلی ارائه داد. در روش‌های ناحیه‌ای تلاش گسترده‌ای لازم است تا توده را در شبکه‌ای به اجزایی تقسیم کنند. در مورد مدل‌های پیچیده که شامل چندین فضای زیرزمینی است ایجاد شبکه ممکن است بسیار دشوار باشد. در بیشتر مدل‌ها ایجاد شبکه با قابلیت‌هایی که در نرم افزار ارائه شده بسیار آسان‌تر از ایجاد شبکه به صورت دستی است. اما در روش‌های مرزی کافی است

که مرز حفاری به اجزایی تقسیم شده و توده در برگیرنده یک محیط پیوسته نامحدود فرض شود. در مورد روش‌های ناحیه‌ای مرزهای خارجی مدل باید به قدر کافی از محدوده فضای زیرزمینی دور در نظر گرفته شود، تا خطایی که از اندر کنش این مرزهای خارجی و حفاری‌ها حاصل می‌شود به حد قابل قبولی تقلیل پیدا کند. از طرف دیگر در روش‌های مرزی توده به عنوان یک محیط پیوسته نامحدود فرض می‌شود. شرایط مناطق با فاصله زیاد از مرز حفاری لازم است تا به عنوان تنش‌های عمل کننده بر توده در نظر گرفته شود، و نیاز به مشخص کردن مرزهای خارجی نیست. نقطه قوت روش‌های مرزی، ساده سازی آن با ارائه توده به عنوان یک محیط پیوسته با گسترش نامحدود است. هرچند این مورد ممکن است باعث شود که در نظر گیری خواص مواد مختلف و مدل کردن اندرکنش نگهدارنده و خاک با مشکل مواجه شود، اگرچه روش‌هایی ارائه شده‌اند که به وسیله اجزا مرزی خاک-هایی با خواص متفاوت را مدل می‌کنند ولی این نوع مسایل با روش‌های ناحیه‌ای راحت تر انجام می‌شوند. قبل از انتخاب روش مدل سازی مناسب برای حل مسایل مختلف بایستی مولفه‌های اصلی هر روش به خوبی درک شود.

۴-۳- انتخاب مناسب ترین روش عددی

هریک از روش‌های عددی ذکر شده دارای معایب و محاسنی است، که بایستی برای هر مورد خاص و برای هدف مطالعاتی موجود بهترین روش ارائه گردد. می‌توان گفت که در بسیاری از موارد مدل سازی، شناخت محیط های ناپیوسته و پیوسته تاثیر بسیار زیادی در فرایند شبیه‌سازی مساله خواهد گذاشت. پس لازم است که از فاکتورهایی برای شناسایی انواع محیط‌ها استفاده نماییم.

۴-۴- مدل سازی دو بعدی یا سه بعدی

ابزارهای نصب شده در تونل ها در بهترین حالت دارای فاصله‌ای با سینه کار می‌باشند بنابراین هنگامی که‌این ابزارها شروع به ثبت جابجایی‌های به وقوع پیوسته در اطراف کنند عملا بخشی از این جابجایی‌ها را از دست داده‌اند. حتی در شرایط ایده‌آل با فرض نصب ابزارها در خود سینه کار انتظار

می‌رود که حدود یک سوم جابجایی‌های مورد نظر از دست بروند. هنگام استفاده از مدل‌های عددی این جابجایی‌ها باید در گام اول از مدل حذف شوند و سپس اقدام به مقایسه نتایج حاصل از مدل با اندازه‌گیری‌های صورت گرفته نمود. چنین مشکلی دقیقا برای نصب سیستم نگهداری در مدل سازی دو بعدی وجود خواهد داشت یعنی باید مدل تا اندازه‌ای جابه‌جا گردد و سپس سیستم نگهداری در آن نصب شود. با استفاده از مدل‌های سه بعدی مقادیر این جابجایی‌ها در حالت کلی، فاصله مابین ابزار و سینه کار و یا سیستم نگهداری و سینه‌کار را می توان مستقیما در مدل وارد نمود.

در کنار مزایای یاد شده برای مدل‌های سه بعدی کاربرد آن‌ها در تحلیل برگشتی که نیاز به انجام آزمایش‌های عددی پر شماری خواهد بود خالی از اشکال نخواهد بود. مهمترین محدودیتی که در این حالت به وجود می‌آید ابعاد مدل‌ها و زمان لازم برای اجرای مدل‌هاست که به مراتب بیش از مدل‌های دو بعدی خواهد بود. این امر موجب می شود از یک سیستم سخت افزاری قوی برای اجرا استفاده شود.

۴-۵- نرم افزار FLAC3D

FLAC3Dیک برنامه کامپیوتری به روش اجزاء تفاضلی صریح است. اولین بار توسط پیتر کندال[1] با هدف تحلیل‌های مهندسی به وجود آمد. این برنامه علاوه بر محاسبات مربوط به مکانیک خاک و ژئوتکنیک کاربرد بسیار گسترده‌ای در سایر علوم مکانیک در فرایند مدل‌سازی رفتارهای پیچیده دارد.

از جمله توانایی‌های عمومی این نرم افزار می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱) مدل سازی شیب

۲) مدل سازی شرایط آب زیرزمینی و مسایل تحکیم

۳) مدل سازی عناصر ساختاری در مسایل مربوط به نگهداری حفاری‌های سطحی و عمقی

۴) قابلیت مدل سازی دینامیکی

[1] Cundall

۵) مدل نمودن رفتار ویسکوالاستیک و ویسکوپلاستیک

۶) مدل سازی جریان های دوفازی برای شبیه سازی جریان دو سیال آمیخته نشدنی

۷) قابلیت مدل سازی رفتارهای وابسته به زمان (خزش)

۸) مدل سازی مسایل عمومی مکانیک جامدات و نمودارهای مربوط به تنش و کرنش

به طور پیش فرضFLAC3D بر مبنای کرنش‌های کوچک عمل می‌نماید، این بدین معنی است که مختصات شبکه تغییر نمی‌کند، حتی اگر جابجایی‌های محاسبه شده بزرگ باشند (که نوعا با اندازه های نواحی مقایسه می‌شوند). در حالت کرنش بزرگ مختصات نقاط شبکه برای هر گام حل، جدید می‌شود. مطابق با جابجایی‌های محاسبه شده در حالت کرنش بزرگ غیر خطی بودن هندسه امکان پذیر است.

۴-۶- مراحل مدل سازی در مکانیک خاک

اصولا مدل سازی در مکانیک خاک تفاوت عمده‌ای با سایر موضوع‌های مهندسی مکانیک دارد. دلایل اصلی این تفاوت در محدودیت خصوصیات ماده و اطلاعات موجود می‌باشد. برای انجام یک آنالیز عددی باید مراحل زیر در نظر گرفته شود.

۱. تعیین اهداف تحلیل مدل

۲. ایجاد تصویر ذهنی از سیستم فیزیکی

۳. ایجاد و اجرای مدل های ساده

۴. گردآوری اطلاعات ویژه مساله

۵. تهیه مدل با جزئیات بیشتر

۶. انجام محاسبات مدل

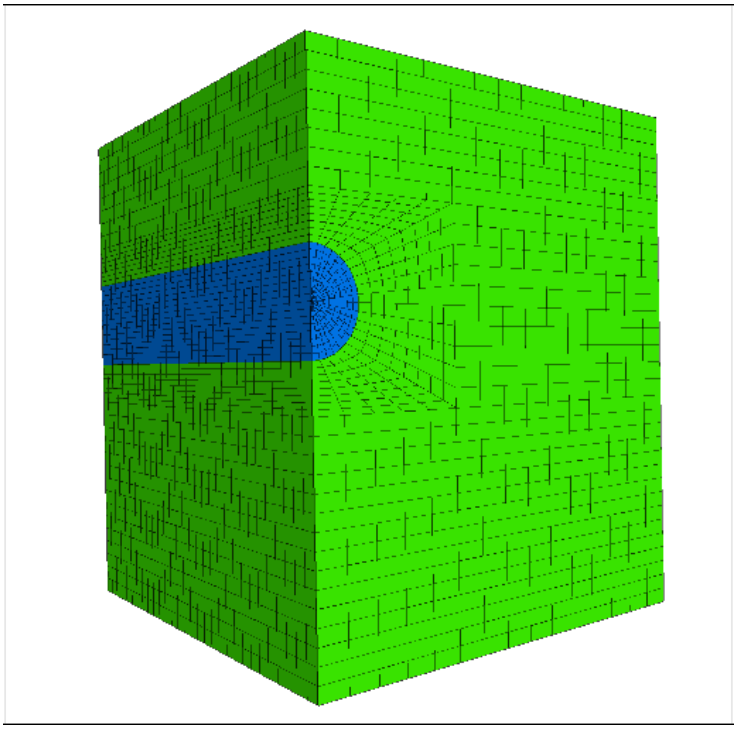
۷. ارائه نتایج جهت تفسیر

۴-۸- مدل سازی تونل خط ۲ مترو مشهد با استفاده از نرم افزار FLAC 3D

۴-۸-۱- هندسه مدل

اولین گام به منظور انجام مدل‌سازی و اجرای برنامه در نرم افزار FLAC3D هندسه سازی است. هندسه سازی در این نرم افزار توسط مش‌بندی صورت می‌گیرد. هندسه تونل که می‌تواند به صورت نعل اسبی، دایره‌ای، دو تونل متقاطع، مربعی و غیره باشد که با دستورهای مختلف در این نرم افزار قابل مدل‌سازی است.

شکل (۴-۲) نمایی از هندسه تونل مدل شده را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱- هندسه تونل متروی خط ۲ مشهد

۴-۸-۲- تعیین مدل رفتاری و تخصیص خواص مواد

پس از اینکه هندسه مدل ایجاد گردید، نوبت به معرفی مدل رفتاری و تخصیص خصوصیات مـواد می‌رسد. در نرم افزار FLAC 3D امکان مدل سازی ۱۱ نوع مدل رفتاری مصالح سنگی و خاکی وجود دارد که عبارتند از مدل حفاری[۱]، الاستیک همسانگرد[۲]، الاستیک ارتوتروپیک[۳]، الاسـتیک همسـانگرد اریب[۴]، مدل دراگر پراگر[۵]، موهر-کولمب، مدل درزه های فراگیر[۶]، مدل موهر- کولمـب نـرم شـونده و سخت شونده[۷]، مدل درزه های فراگیر نرم شونده و سخت شونده[۸]، رفتـار پلاسـتیک دوگانـه[۹] و مـدل cam-clay اصلاح شده[۱۰].

مدلی که برای تونل خط ۲ مترو مشهد مناسب به نظر می رسد و مقبولیت بیشتری را نسبت به سایر مدل‌های موجود دارد، مدل رفتاری متداول در تحلیل‌های مکانیک خاک و به خصوص در حفاری‌های زیرزمینی یعنی مدل رفتاری موهر کولمب می‌باشد.

۴-۸-۳- شرایط مرزی و اولیه

شرایط مرزی یک مدل عددی، شامل متغیرهای میدان همچون تنش و جابجایی است. مرز به دو صورت واقعی و مصنوعی می‌تواند باشد. مرزهای فیزیکی و موجود در طبیعت را مرز واقعی گویند. مرز مصنوعی در طبیعت وجود ندارد ولی برای بستن محدوده زون‌ها در یک محیط بی نهایت، ضروری است. همان طور که می‌دانیم به منظور انجام مدل سازی سازه‌ای زیرزمینی نمی‌توان کل منطقه را

[1] Null
[2] Elastic Isotropic
[3] Elastic Orthotropic
[4] Elastic, transversely isotropic
[5] Drucker-Prager
[6] Ubiquitous-joint
[7] Strain-hardening/softening Mohr-Coulomb
[8] Bilinear strain-hardening/softening ubiquitous-joint plasticity
[9] Double-yield plasticity
[10] Modified Cam-clay plasticity

مدل کرد. بنابراین برای انجام مدل سازی از مرزهای مصنوعی استفاده کرده و مدل را در ابعاد کوچکتر ایجاد می‌کنیم.

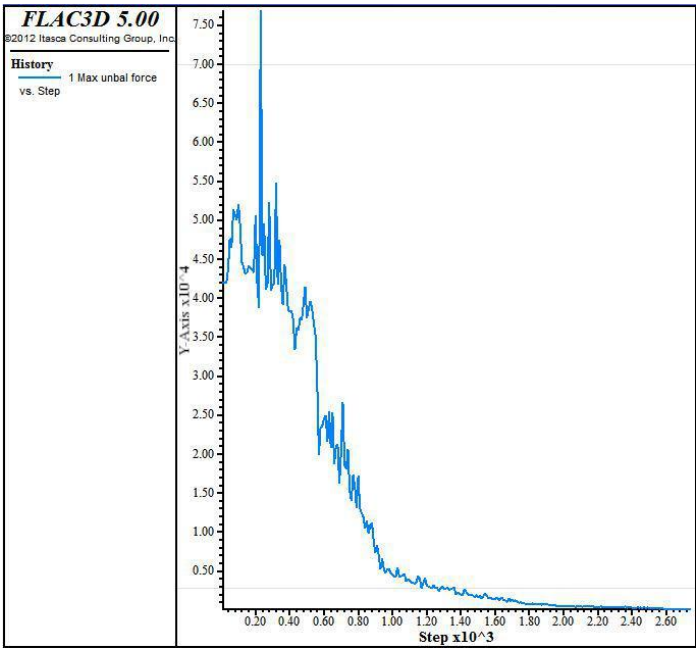
در سازه هایی که در زمین حفر می‌شوند، اهمیت تنش‌های برجا از هر پارامتر دیگری بیشتر می باشد. یکی از شرایط صحیح مدل سازی در FLAC 3D اعمال صحیح تنشهای برجا می‌باشد.

۴-۸-۴- ایجاد تعادل اولیه در مدل

پیش از این که حفاری مدل آغاز گردد، مدل اجرا می‌شود، این کار برای تطبیق شرایط برجا با شرایط مدل سازی و بر اساس پیشنهاد (ITASCA) صورت می‌گیرد.

سوالی که این جا مطرح می‌گردد این است که آیا مدل سازی صحیح صورت گرفته است؟

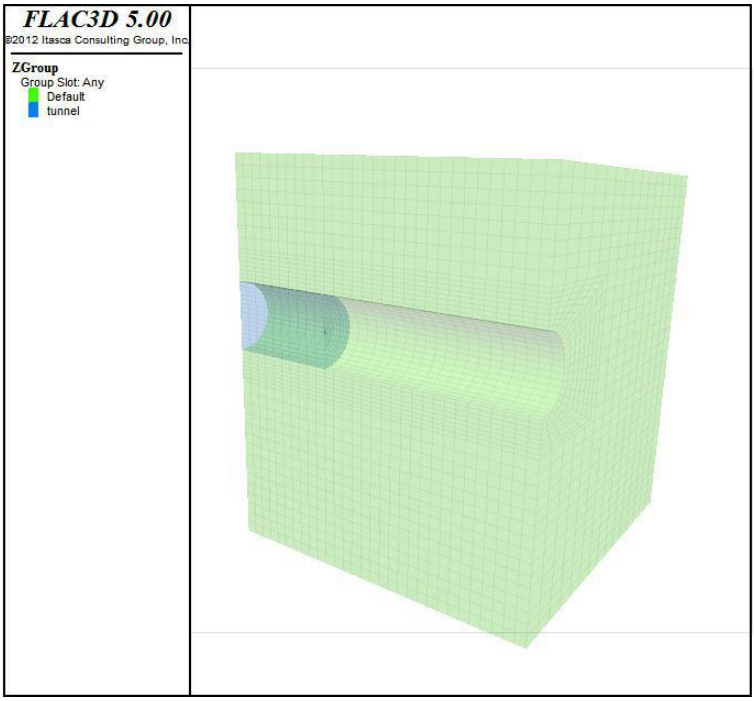
برای این منظور برای اطمینان از اینکه مدل سازی صحیح صورت گرفته فاکتورهایی توسط (ITASCA) پیشنهاد شده است. ثابت شدن جابجایی‌ها پس از حل، مینیمم شدن نیروهای نامتعادل کننده به ٪۰/۱ مقدار اولیه و در صورت وجود تنشهای برجا، یکنواخت شدن کنتور های تنش‌های برجا از عوامل اصلی برا ی اثبات حل صحیح مساله می باشد. در صورتی که نیروهای نا متعادل کننده به سمت صفر میل نکند باید مدل مورد بررسی قرار گیرید. در صورتی که مدل به صورت صحیح ساخته شده باشد نیرو های نا متعادل کننده به سمت صفر میل می کنند.



شکل ۴-۲- نمودار نیروهای نامتعادل کننده پس از تعادل اولیه

۴-۸-۴- حفر تونل

پس از ایجاد تعادل اولیه تونل باید به صورت صحیح حفر گردد. در این مدل سیکل حفاری ۲ متر در نظر گرفته شده است، در این سیکل بعد از حفر ۲ متر سگمنت گذاری انجام گرفته و دوباره سیکل مورد نظر تکرار می‌شود. قبل از حفر تونل باید جابجایی‌ها و پارامتر سرعت را صفر کرد تا فقط تاثیر حفاری روی مدل بررسی شود.



شکل ۴-۳- تونل حفر شده تا مقطع مورد نظر

۴-۹- بررسی پایداری تونل خط دو مترو مشهد در مقطع مورد نظر

برای پایداری تونل با استفاده از نتایج به دست آمده از مدل سازی عددی و مقایسه با نتایج تحلیلی در ادامه ارائه می‌گردد.

۴-۹-۱- کنترل پایداری با کرنش بحرانی

ساکورایی و همکارانش علاوه بر روابط بین مقاومت فشاری تک محوری و کرنش بحرانی برای توده سنگ‌های مختلف رابطه (۴-۱) و (۴-۲) را برای مدول تغییر شکل پذیری و کرنش بحرانی ارائه کرده‌اند.

$$\log \varepsilon_c = -0.25 \log E - 1.22 \qquad (۱-۴)$$

$$\gamma_c = (1 + \vartheta).\varepsilon_c \qquad (۲-۴)$$

γ_c:کرنش برشی بحرانی

E : مدول تغییر شکل پذیری بر حسب Kgf/cm2

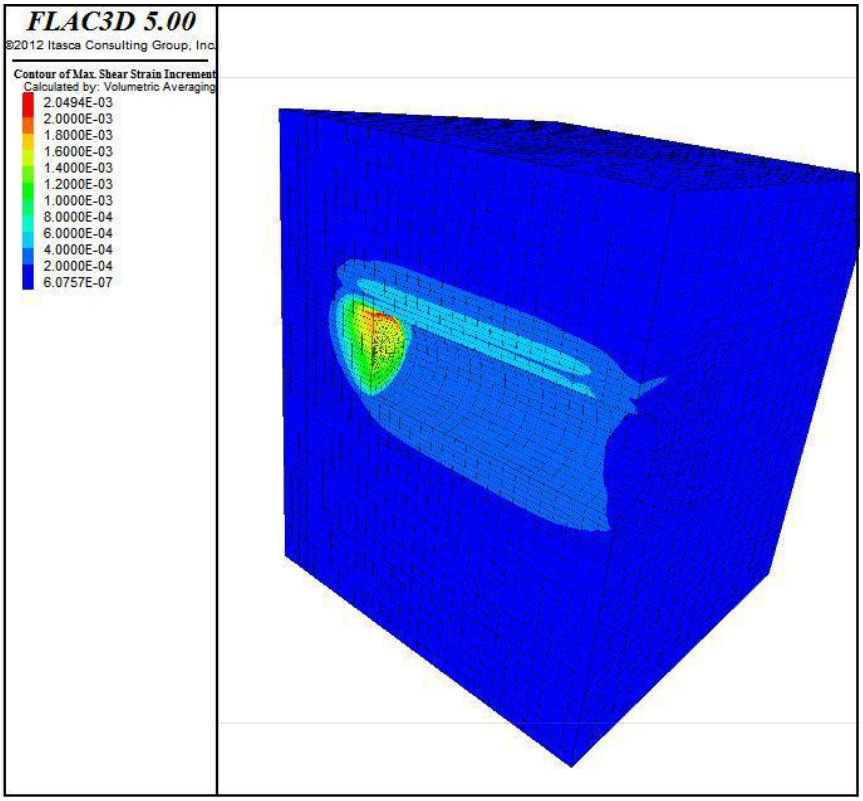
ϑ : نسبت پواسون

ε_c: کرنش بحرانی

به طور کلی توده خاک اطراف تونل، در معرض تنش سه محوره قرار دارد و معقول‌تر است که برای تحلیل پایداری از کرنش برشی ماکزیمم استفاده شود. در صورتی که مقادیر کرنش برشی بزرگتر از مقدار کرنش برشی بحرانی شود، حفاری تونل دچار مشکلاتی نظیر ناپایداری سینه کار و بالازدگی کف می‌شود. در این صورت باید تمهیداتی برای نگهداری تونل در نظر گرفت. با قرار دادن مقادیر مدول تغییر شکل و نسبت پواسون در رابطه‌های ارائه شده می‌توان مقادیر کرنش بحرانی را محاسبه کرد. برای این کار از مقدار بیشینه مدول تغییر شکل استفاده شده است تا کم‌ترین مقدار مجاز کرنش برشی و بحرانی‌ترین حالت به دست آید.

$$\gamma_c = 0.0091$$

حداکثر کرنش برشی به وجود آمده در اطراف فضای حفر شده برابر با ۰/۰۰۲۴ که در شکل (۴-۵) مشاهده می‌گردد. بنابراین به دلیل کمتر بودن مقادیر کرنش برشی به وجود آمده در اطراف تونل نسبت به مقدار محاسبه شده می‌توان استنباط کرد که تونل پایدار است.



شکل ۴-۴- مقادیر کرنش برشی تونل در مقطع مورد مطالعه

۴-۱۰- نتیجه گیری

استفاده از ابزار دقیق و رفتارسنجی در پروژه‌های ژئومکانیکی می‌تواند علاوه بر ارزیابی مستمر وضعیت پایداری سازه‌های احداث شده، نزدیک‌ترین مقادیر پارامترهای موثر در طراحی و اجرا به پارامترهای واقعی را در تحلیل‌ها به کار می‌برد، که باعث ایمن و اقتصادی بودن پروژه‌ها می‌گردد.

در این فصل تونل خط دو قطار شهری مشهد با استفاده از نرم افزار FLAC 3D مدل شده است. مراحل مختلف مدل سازی توضیح داده شده است و در انتها با استفاده از روش کنترل مستقیم کرنش که توسط ساکورایی ارائه شده است، پایداری مدل تحلیل شده است و با توجه به خروجی نرم افزار و مقایسه با تحلیل انجام شده مشخص گردید که تونل پایدار بوده و نیازی به اقدامات محافظ کارانه‌ی بیشتر نیست.

در فصل بعد تحت عنوان نتیجه‌گیری و پیشنهادها، به جمع‌بندی تحقیق انجام شده پرداخته می‌شود و نتایج تحقیق و راهکارهای مناسب ارائه خواهد شد.

فصل پنجم

نتیجه گیری و پیشنهادها

۵-۱- نتیجه گیری

- ❖ زمان مناسب برای شروع و اتمام ثبت قرائت‌ها در یک طرح رفتارسنجی کمک بسیاری به قضاوت رفتار صحیح سازه به منظور تحلیل‌های وابسته به آن از جمله تحلیل برگشتی می نماید. در صورتی که هدف تعیین رفتار سازه در بلند مدت باشد، باید طرح رفتار سنجی را ادامه داد تا اثراتی که بیشتر شامل بارهای خارجی هستند و سازه را تهدید می نمایند، با استفاده از طرح رفتار سنجی شناسایی گردد.
- ❖ تکنیک‌های بهینه سازی که در حل مسائل به صورت برگشتی استفاده می شوند، روشهای خوبی برای تعدیل مدل‌های ساخته شده، با مقایسه پارامترهای خروجی با قرائت‌های ابزار دقیق می باشند.
- ❖ با استفاده از تحلیل برگشتی مستقیم و تکنیک جستجوی تک متغیره جایگزین، مدول تغییر شکل پذیری برابر با ۱۹۹ مگا پاسکال محاسبه شده است.
- ❖ با استفاده از تحلیل برگشتی مستقیم و تکنیک جستجوی تک متغیره جایگزین، ضریب تنش افقی به قائم در تونل ۰/۴۸ محاسبه شده است.
- ❖ نتایج تحلیل پایداری استفاده از روش کنترل مستقیم کرنش، نشان می‌دهد کرنش های برشی به حد بحرانی نمی‌رسد.

۵-۲- پیشنهادها

- ✓ با توجه به اینکه در تونل خط دو قطار شهری مشهد، ابزارها قبل از حفاری تونل نصب شده و قرائت‌ها به موقع انجام گرفته بود جابجایی‌ها به طور کامل ثبت شد و باعث کاهش خطا در نتایج تحلیل‌ها گردید. پیشنهاد می‌شود، مشابه کار انجام شده در این تحقیق برای پروژه دیگری که داده های بیشتر و بهتری دارد، انجام گیرد.

- ✓ با توجه به شرایط دوران بهره برداری پیشنهاد می شود، شرایط پایداری تونل تحت چنین شرایطی با استفاده از مدل سازی عددی بررسی شود.
- ✓ به منظور تحلیل دقیق‌تر علاوه بر کشیدگی‌سنج در دوران بهره‌برداری از تونل از دیگر ابزار دقیق همچون همگرایی‌سنج نیز استفاده گردد.

منابع:

احمدی، مرتضی. شاهوردیلو، محمد رضا. (۱۳۸۹)، ابزار دقیق و رفتارنگاری در مهندسی سنگ، انتشارات جهاد دانشگاهی واحد دانشگاه تربیت مدرس.

امامی تبریزی، م، (۱۳۷۶)، **مطالعه و ارزیابی روش‌های تعیین منحنی اندرکنش بین توده سنگ اطراف فضاهای زیرزمینی و سیستم نگه‌دارنده**، سمینار کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک سنگ، دانشگاه امیرکبیر.

اعصاری، م، (۱۳۸۴)، **تحلیل پایداری مغار نیروگاه لوارک به روش تحلیل برگشتی با استفاده از رگرسیون چند متغیره**، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران.

بلیغ، محمود، (۱۳۷۹)، **تحلیل پایداری تونل تالون با استفاده از داده‌های ابزار دقیق**، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

دهقان، علی نقی؛ رضایی، فریدون؛ قنبری، علی؛ (۱۳۸۸)، تحلیل برگشتی تونل متروی کرج به منظور تعیین پارامترهای ژئومکانیکی توده خاک دربرگیرنده، نشریه زمین‌شناسی مهندسی.

دهقان، علی نقی، (۱۳۹۲)، **انتخاب طرح مناسب سامانه‌ی نگهداری اولیه تونل متروی کرج برمبنای نتایج ابزار دقیق و الگوریتم تحلیل برگشتی**، نشریه مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی.

داداش‌زاده سیار، علی؛ فرهادی، علی؛ شوش‌یاشا، عیسی؛ (۱۳۸۲)، **تحلیل پایداری با استفاده از داده‌های ابزار دقیق در تونل اکتشافی تالون واقع در آزادراه تهران- شمال**، ششمین کنفرانس تونل، دانشکده عمران دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران.

حسنی، رحیم؛ شعبانی مشکول، مهدی؛ سالاری راد، حسین؛ (۱۳۸۵)، **برآورد خواص تغییر شکل پذیری توده سنگ برمبنای الگوریتم تحلیل برگشتی.**

حسینی، مهدی؛ افضل‌آقایی، احمدرضا؛ (۱۳۹۰)، **تحلیل برگشتی مغار نیروگاه سد سیاه بیشه بااستفاده از داده‌های حاصل از ابزار دقیق**، نشریه علمی- پژوهشی مهندسی معدن.

جمشاسب، فرشاسب، (۱۳۸۵)، **تحلیل پایداری تونل‌های کم عمق با استفاده از نتایج رفتار سنجی- مطالعه موردی تونل‌های دوقلوی قطعه اول جنوبی متروی اصفهان**، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود.

گزارشات شرکت ساوند، (۱۳۹۱)، **گزارش رفتارنگاری کشیدگی‌سنج‌های بلوار طبرسی**.

شریف‌زاده، مصطفی؛ دارای، رحمان؛ (۱۳۹۰)، **طراحی روش اجرای تونل در سنگ‌های سست بااستفاده از نتایج تحلیل برگشتی مبتنی بر داده‌های جابجایی حاصل از رفتار نگاری**، نخستین همایش آسیایی و نهمین همایش ملی تونل.

صائمی، محسن؛ حاجی حسنی، محسن؛ عباسیان، میثم؛ احمدی، مرتضی؛ (۱۳۸۶)، **تحلیل برگشتی به کمک احتمالات- مطالعه موردی تونل خماری**، سومین کنفرانس مکانیک سنگ ایران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران.

فطورچی، سعید، (۱۳۸۲)، **رفتار سنجی و تحلیل پایداری تونل خماری**، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود.

قدیری، ذکریا، (۱۳۸۹)، **تحلیل پایداری مترو خط ۲ قطار شهری کرج با استفاده از نتایج رفتارسنجی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد**، دانشگاه صنعتی شاهرود.

طاهری، سعید؛ فاروق حسینی، محمد؛ (۱۳۸۲)، **تحلیل برگشتی در سازه‌های زیرزمینی (مطالعه موردی لوارک)**، ششمین کنفرانس تونل، دانشکده عمران دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران.

مشهد میقانی، مجید؛ رمضان‌زاده، احمد؛ معارف‌وند، پرویز؛ (۱۳۸۰)، **کاربرد همگرایی سنجی به عنوان ساده‌ترین سیستم رفتار نگاری تونل‌ها مطالعه موردی تونل انتقال آب دشت عباس**، پنجمین کنفرانس تونل ایران، دانشکده فنی دانشگاه تهران، تهران.

Akutagawa, S., Sakurai, S., (2003), **Back Analysis for Tunnel Engineering as a Modern Observational Method**, Tunneling and Underground Space Technology, Vol. 18, pp. 185-196, Published by Elsevier Ltd.

ASTM, D4403-84, (1996), **Standard Practice for Extensometers Used in Rock**, Vol. 04.08, section 4, pp. 610-619.

Dunnicliff, John,. (1993), **Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance**, John Wiley& Sons, New York.

Gioda, G., (1985), **Some Remarks on Back Analysis and Characterization Problem in Geomechanics**, Vol. 11, pp. 555-583.

Gioda, G., Sakurai, S., (1987), **Bach analysis procedures for the interpretation of field measurements in geomechanics**, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, vol.11, pp. 553-559.

Hoek, E., Brown E.T., (1982), **Underground Excavation in Rock**, Published for Mining and metallurgy by E & FN Spon, an imprint of champman & Hall.

Itasca Consulting Group, Inc. (2005), **FLAC3D, Fast Lagrangian Analiysis of Continua in 3Dimensions**. User's Manual.

Jeon, Y. S., Yang, H. S., (2004), **Development of a back analysis algorithm using flac**, Int J of Rock Mech. & Mining Sci. Vol. 41, No. 3.

Karakus, M., Fowell, R. J.,(2005), **Back analysis for tunneling induced ground movements and stress redistribution**, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol.20. 514524.

Li, Shihui, et al, (2006), **Intelligent Back Analysis of Displacement Monitoring in Tunneling**, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, Vol. 43, Issue7, page 1118-1127.

Oreste, Pierpaolo, (2005), **Back analysis techniques for the improvement of the understanding of rock in underground constructions**, Tunneling and Underground Space Technology, 20. 7-21.

Panet, Gunet, (1982), **Analysis of Convergence behind the Tunnel Face**, Int. Conf. Of Tunneling, pp. 82.

www.Soilinstrument.com

www.Sisgeo.com

www.Interfels.com

www.Geokon.com

Sakurai, S., Takeuch, K., (1983), **Back analysis of measured displacements of tunnels**, Rock mechanics and Rock Engineering. Volume 16, Issue 3, pp. 173-180.

Saveur, J., Grantz, W. (1997). **Structural Design of Immersed Tunnels**. Tunnelling and Underground Space Technology, 12(2),93-109.http://dx.doi.org/10.1016/S0886-7798(97)90015-8.

Selby, A. R. (1999). **Tunnelling in Soils-Ground Movements, and Damage to Buildings in Workington**, UK. Geotechnical and Geological Engineering, 17(3-4), 351-371. http://dx.doi.org/10.1023/A:1008985814841.

Shang. Y., (2002), **Intellgent back analysis of displacement using precedent type analysis for tunneling**, Chinese academy of Science Tunnelling and Underground technology.

Tanimoto, Fujiwara, (1988), **Determination of Rock Mass Strength through Convergence Mesurements in Tunneling**, 2nd Int, Symp. On Field Measurements in Geomechanics.

Zhang, L.Q., Yue Z.Q., Yang, Z.F., Liu,F.C., (2006), **A Displacement-based Back-analysis Method for Rock Mass Modulus and Horizontal in Situ Stress in Tunneling-illustrated with a Cace Study**, Tunneling and Underground Space Technology, pp. 636-649.

Zhifa, Y., lee, C. F., (2000), **Three-Dimensional Back Analysis of displacement in Exploration Adits-Principle and Application**, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 37, pp. 325-533, Published by Elsevier Ltd.

Abstract

The design and construction of underground structures in most cases are carried out with approximate knowledge of geomechanical parameters of the surrounding environments. Due to the difficulty of estimating the parameters of the earth, the behavior measurement and the application of the back analysis is a useful method. Monitoring during and after the project implementation is used not only to control the stability of structures but also to re-estimate the input data for geomechanical parameters. In the design analysis, this estimate should be made in such a way that the distance between actual and predicted values for the environment examination is minimized.

The main purpose of the monitoring is to determine the stability conditions in an underground structure by providing quantitative information based on land monitoring and tunnel maintenance system. In the back analysis, it is not merely the determination of the mechanical model, mechanical constant values and its external forces, but the ultimate purpose is to assess the design method during construction.

In this study geomechanical parameters of soil are replaced by a single-variable and based on instrumentation data for tunnel line 2 of Mashhad Metro. Laboratory data is used as equivalent geomechanical parameters in modeling with FLAC 3D software. After the back analysis, the values of the deformation modulus (E_m) and the horizontal to vertical tension ratio (K) were calculated to be 199 mega-Pascal and 0.48 respectively. By correcting the initial values of geomechanical parameters, the stability analysis of tunnel line 2 of Mashhad Metro in the studied section was carried out using method (DSCT) and it was determined that the tunnel will be stable considering the maintenance.

Keywords: Monitoring, Back Analysis, Instrument, Mashhad Urban Train line2

Shahrood University of Technology

Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering

M.Sc. Thesis in Rock Mechanics

Title of Thesis:

Stability analyses of Mashhad Urban Train metro line2 using the results of instrumentation by MPBX

By: Saeed Shamshirzan

Supervisor:

Dr. S. R. Torabi

July 2017