

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

تعیین پارامترهای ژئومکانیکی و تنش‌های برجای توده‌سنگ با استفاده از تحلیل برگشتی و

داده‌های رفتارنگاری – مطالعه موردی تونل البرز

سید شهاب الدین بنی‌جمالی

استاد راهنما:

دکتر شکرالله زارع

استاد مشاور:

دکتر مرتضی جوادى اصطهباناتی

پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

بهمن ۱۳۹۹

شماره: ۹۹۹۹۴۳۳۹
تاریخ: ۹۹/۱۳/۱۶

باسمه تعالی



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 آقای سید شهاب الدین بنی جمالی با شماره دانشجویی ۹۶۳۲۵۱۴ رشته مهندسی معدن گرایش مکانیک سنگ تحت عنوان تعیین پارامترهای ژئومکانیکی و تنش های برجای توده سنگ با استفاده از تحلیل برگشتی و داده های رفتارنگاری - مطالعه موردی تونل البرز که در تاریخ ۱۳۹۹/۱۱/۲۶ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

☒ الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰	☒ ب) درجه خیلی خوب: نمره ۱۸/۹۹ - ۱۸
☐ ج) درجه خوب: نمره ۱۷/۹۹ - ۱۶	☐ د) درجه متوسط: نمره ۱۵/۹۹ - ۱۴
☐ ه) کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد	
نوع تحقیق: ☐ نظری ☒ عملی	

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر شکرالله زارع	دانشیار	
۲- استاد مشاور	دکتر مرتضی جوادی اصطهباناتی	استادیار	
۳- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر محمد جهانی چگنی	استادیار	
۴- استاد ممتحن اول	دکتر مجید نیکخواه	استادیار	
۵- استاد ممتحن دوم	دکتر سید محمد اسماعیل جلالی	دانشیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر محمد عطایی

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:



تقدیم به

پدر و مادر دلسوزم

و همسر مهربانم...

تشکر و قدردانی

به رسم ادب و قدرشناسی، بر خود لازم می‌دانم از اساتید ارجمندم آقایان دکتر شکرالله زارع و دکتر مرتضی جوادی که دلسوزانه پشتیبان و راهنمای من بودند و در طول انجام این پایان‌نامه با راهنمایی‌های مفید و مساعدت‌های بی‌شمار خود راه را هموار نموده‌اند و از هیچ‌گونه کمک علمی و عملی دریغ نکرده‌اند کمال تشکر و قدردانی را داشته باشم.

همچنین از خانواده عزیزم، پدر و مادر فداکارم که اولین معلمان زندگی من بودند، تشکر می‌کنم. از همسر دلبندم که همواره مشوق و پشتیبان من در تمامی مراحل انجام این پروژه بود، تشکر و قدردانی می‌کنم.

اما در این مدت از همنشینی دوستانی بهره‌مند شدم که کمک بی‌حصرشان راه‌گشای بسیاری از مشکلات بوده، با سپاس فراوان از آقایان مهندس علی شریفی و فرهاد پسرکلو که مرا در این امر یاری کردند، آرزوی سلامتی و موفقیت در تمام مراحل زندگی را برایشان از خداوند خواستارم. در پایان از پرسنل زحمت‌کش دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه تشکر کرده و برایشان آرزوی سلامتی می‌کنم.

تعهدنامه

اینجانب سید شهاب الدین بنی جمالی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مکانیک سنگ دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با موضوع تعیین پارامترهای ژئومکانیکی و تنش های برجای توده سنگ با استفاده از تحلیل برگشتی و داده های رفتارنگاری – مطالعه موردی تونل البرز تحت راهنمایی دکتر شکرالله زارع و دکتر مرتضی جوادی اصطهباناتی متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام دانشگاه صنعتی شاهرود 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 پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ: ۱۳۹۹/۱۲/۱۹

امضاء دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات، مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوط ذکر شود.

چکیده

مبنای اصلی و تعیین‌کننده در تحلیل پایداری، طراحی و ارائه سیستم نگهداری سازه‌های زیرزمینی، اطلاع از خصوصیات ژئومکانیکی توده‌سنگ سازه زیرزمینی است. روش‌های گوناگونی برای تخمین و یا تعیین این پارامترها وجود دارد که برخی از آن‌ها هزینه و زمان زیادی را صرف می‌کنند. یکی از روش‌های مورد توجه و قابل قبول در این زمینه استفاده از نتایج رفتارسنجی و تحلیل برگشتی به عنوان ابزاری برای تخمین مجدد داده‌های ورودی در حین اجرا و پس از احداث سازه است. روش‌های مختلفی برای تحلیل برگشتی ارائه شده است. روش‌های اصلی و ابتدایی شامل روش‌های مستقیم، معکوس و آماری می‌باشد. این روش‌ها زمان زیادی را صرف می‌کنند و البته دقت زیادی نیز ندارند. روش معکوس، فرضیات ساده‌سازی نظیر محیط یکنواخت، میدان تنش خطی و حفاری تک مرحله‌ای است. در واقعیت اما شرایط این‌گونه نیست. در روش مستقیم نیز بهینه‌سازی تابع هدف، مستلزم تصحیح متعدد پارامترها است که تصحیح هریک نیاز به حداقل یک محاسبه دارد. بنابراین حل عددی به خصوص برای مدل‌های بزرگ، زمان‌بر است. اخیراً برای غلبه بر این مشکلات روش‌های هوشمند تحلیل برگشتی ارائه شده‌اند.

ساختمان مورد مطالعه در این پژوهش تونل البرز می‌باشد. تونل البرز به عنوان بلندترین تونل راه ایران، یکی از تونل‌های مسیر آزادراه تهران-شمال است. پارامترهای ورودی برای انجام تحلیل برگشتی در این مطالعه به‌وسیله‌ی تونل اکتشافی حفر شده به موازات تونل‌های اصلی برآورد شده است. در این مطالعه ۲ نوع سیستم تحلیل برگشتی برای تعیین پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ و شرایط تنش منطقه‌ای برای سه ایستگاه در سازندهای مختلف انتخاب شده است. با توجه به این‌که اکثر سازندهای عمده در تونل البرز از نوع تحکیم C می‌باشند، از این نوع تحکیم نیز در این مطالعه استفاده شده است. بدین منظور با استفاده از داده‌های حاصل از تونل اکتشافی و مطالعات زمین‌شناسی، مدل‌سازی عددی تونل البرز با نرم‌افزار FLAC^{3d} برای تولید زوج داده‌های ورودی-خروجی مورد نیاز برای طراحی سیستم

تحلیل برگشتی هوشمند انجام شد. سپس ۲ نوع سیستم تحلیل برگشتی الگوریتم بهینه‌سازی تجمعی ذرات (PSO) و ماشین بردار پشتیبان (SVM) برای انجام این مطالعه انتخاب شدند و پس از جستجو و بهینه‌سازی، پارامترهای توده‌سنگ را تخمین زدند. با استفاده از تحلیل حساسیت صورت گرفته مقادیر پارامترهای مدول الاستیسیته، نسبت تنش‌ها و پارامترهای مدل رفتاری هوک-براون به عنوان پارامترهای ورودی انتخاب شدند. استفاده از مدل رفتاری هوک-براون به دلیل آن‌که به نتایج واقعی نزدیک‌تر و برای تعیین آن‌ها از ورودی‌های بیشتری استفاده می‌شود، به عنوان مدل رفتاری در این مطالعه انتخاب شد. جهت بررسی عملکرد سیستم‌های هوشمند انتخاب شده، نتایج حاصل از تحلیل برگشتی با نتایج ابزار دقیق مقاطع مقایسه شدند. نتایج نشان داد که سیستم‌های انتخاب شده به درستی مقادیر مختلف توده‌سنگ را پیش‌بینی کرده‌اند. با استفاده از خطای محاسبه شده برای هریک از سیستم‌های هوشمند تحلیل برگشتی، مشخص شد الگوریتم PSO دارای خطای ۱/۷ درصدی و الگوریتم ماشین بردار پشتیبان (SVM) دارای خطای ۳/۷۵ می‌باشد. در نهایت نشان داده شد که الگوریتم تجمعی ذرات (PSO) عملکرد بسیار مطلوبی در تخمین پارامترهای ورودی سیستم تحلیل برگشتی دارد.

کلمات کلیدی: تحلیل برگشتی هوشمند، الگوریتم PSO، الگوریتم SVM، تونل البرز، تعیین

پارامترهای ژئومکانیکی.

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه

- ۱-۱- کلیات ۲
- ۲-۱- اهمیت و هدف موضوع ۳
- ۳-۱- ساختار پایان نامه ۴

فصل دوم: مروری بر مطالعات گذشته

- ۱-۲- مقدمه ۸
- ۲-۲- مروری بر مطالعات گذشته ۸
- ۳-۲- مثال های کاربردی در زمینه تحلیل برگشتی هوشمند ۱۵
- ۳-۲-۱- تحلیل برگشتی هوشمند خط ۲ مترو کرج با استفاده از روش های فازی ۱۵
- ۳-۲-۲- تحلیل برگشتی هوشمند راه آهن اصفهان- شیراز با استفاده از الگوریتم ژنتیک ۱۶
- ۳-۲-۳- تحلیل برگشتی با استفاده از الگوریتم کلونی زنبور عسل (ABC) ۱۷

فصل سوم: رفتارنگاری و ابزار دقیق

- ۱-۳- رفتارسنجی ۲۰
- ۱-۳-۱- اهداف رفتارسنجی ۲۱
- ۱-۳-۲- نقش رفتارسنجی در مراحل مختلف طرح و اجرای سازه ها ۲۲
- ۳-۳- پیشینه علمی رفتارنگاری ۲۳

۲۴	 ۴-۳-اساس رفتارنگاری در سازه های زیرزمینی و روباز
۲۵	 ۵-۳-طراحی و انتخاب ابزار
۲۷	 ۶-۳-مراحل کار در رفتارسنجی
۲۸	 ۷-۳-سیستم های رفتارسنجی
۳۰	 ۱-۷-۳-همگرایی سنجی
۳۱	 ۲-۷-۳-کشیدگی سنج
۳۲	 ۳-۷-۳-بارسنج

فصل چهارم: تحلیل برگشتی

۳۶	 ۱-۴-مقدمه
۳۷	 ۲-۴-تحلیل برگشتی و تحلیل معمولی
۴۱	 ۳-۴-انواع روش های تحلیل برگشتی
۴۱	 ۱-۳-۴-تحلیل برگشتی معکوس
۴۳	 ۲-۳-۴-تحلیل برگشتی مستقیم
۴۷	 ۴-۴-تحلیل برگشتی آماری
۴۸	 ۵-۴-تحلیل برگشتی هوشمند
۵۱	 ۱-۵-۴-الگوریتم بهینه سازی تجمعی ذرات
۵۲	 ۱-۱-۵-۴-طرز کار الگوریتم بهینه سازی تجمع ذرات (PSO)
۵۶	 ۲-۵-۴-روش الگوریتم بهینه سازی ماشین بردار پشتیبان SVM

۵۷ ۴-۵-۱-۲-روش کار الگوریتم ماشین بردار پشتیبان (SVM)

۵۹ ۴-۶-نتیجه گیری

فصل پنجم: مشخصات ساختگاه مورد مطالعه

۶۲ ۵-۱-مقدمه

۶۲ ۵-۲-معرفی تونل البرز

۶۴ ۵-۲-۱-وضعیت زمین شناسی منطقه

۶۶ ۵-۲-۲-حفاری و سیستم نگهداری

۶۸ ۵-۳-تشریح گروه های خاکی و سازندهای موجود

۷۱ ۵-۴-بزارهای موجود در تونل البرز

۷۳ ۵-۵-رفتارنگاری در تونل البرز

۷۵ ۵-۶-تحلیل داده های رفتارنگاری در تونل البرز برای مقاطع انتخاب شده

فصل ششم: مدلسازی عددی و تحلیل برگشتی هوشمند تونل البرز

۸۲ ۶-۱-مقدمه

۸۳ ۶-۲-روش مدلسازی عددی

۸۵ ۶-۳-انتخاب مناسب ترین روش عددی

۸۵ ۶-۴-معرفی نرم افزار FLAC

۸۷ ۶-۴-۱-مراحل مدلسازی عددی در نرم افزار FLAC

۸۸ ۶-۵-مدلسازی عددی تونل البرز

- ۹۰ ۱-۵-۶- انتخاب مقطع مناسب جهت انجام مدل سازی عددی
- ۹۱ ۲-۵-۶- انتخاب مناسب ترین مدل رفتاری
- ۹۲ ۳-۵-۶- اعمال شرایط مرزی و اعمال تنش ها
- ۹۴ ۴-۵-۶- تعادل اولیه در مدل
- ۹۵ ۵-۵-۶- حفاری و اعمال سیستم نگهداری
- ۱۰۱ ۷-۵-۶- بررسی نتایج آنالیز عددی
- ۱۰۲ ۶-۶- تحلیل برگشتی تونل البرز
- ۱۰۲ ۱-۶-۶- تولید داده های ورودی و خروجی جهت انجام تحلیل برگشتی
- ۱۰۶ ۲-۶-۶- تولید زوج داده های مورد نیاز برای طراحی سیستم تحلیل برگشتی هوشمند
- ۱۰۷ ۱-۲-۶-۶- اصلاح مقادیر داده های ابزار دقیق
- ۱۰۹ ۳-۶-۶- طراحی سیستم تحلیل برگشتی هوشمند با استفاده از روش PSO
- ۱۱۵ ۱-۳-۶-۶- تخمین مقادیر توده سنگ با استفاده از روش PSO
- ۱۱۶ ۲-۳-۶-۶- اعتبارسنجی سیستم طراحی شده برای تحلیل برگشتی هوشمند با استفاده از الگوریتم PSO
- ۱۱۷ ۴-۶-۶- طراحی سیستم تحلیل برگشتی با استفاده از الگوریتم SVM
- ۱۲۴ ۱-۴-۶-۶- تخمین مقادیر توده سنگ با استفاده از روش SVM
- ۱۲۵ ۲-۴-۶-۶- اعتبارسنجی سیستم طراحی شده برای تحلیل برگشتی هوشمند با استفاده از الگوریتم SVM

۶-۷-مقایسه سیستم های طراحی شده برای تحلیل برگشتی هوشمند.....۱۲۶

۶-۸-نتیجه گیری۱۲۷

فصل هفتم: نتیجه گیری و پیشنهادات

۷-۱-مقدمه۱۳۰

۷-۲-نتیجه گیری۱۳۰

۷-۳-پیشنهادهات۱۳۲

منابع و مآخذ۱۳۳

فهرست شکل‌ها

- شکل (۱-۳) اساس رفتارنگاری در سازه های زیرزمینی و روباز (Sakurai,2010) ۲۵
- شکل (۲-۳) جایگاه رفتارنگاری در طی مراحل ساخت (Sakurai, 2010) ۲۷
- شکل (۳-۳) مراحل کار در رفتارسنجی (مدنی، ۱۳۷۹) ۲۸
- شکل (۴-۳) انواع مقطع های همگرایی سنجی، تونل (راست)، مغار (وسط) و چاه (چپ) ۳۱
- شکل (۵-۳) اجزای تشکیل دهنده کشیدگی سنج گمانه ای و چندنقطه ای ۳۲
- شکل (۶-۳) نمونه ای از بارسنج استفاده شده در تونل البرز ۳۳
- شکل (۱-۴) ارتباط تحلیل و معمولی و تحلیل برگشتی (Sakurai,1993) ۳۸
- شکل (۲-۴) مقایسه بین تحلیل عادی و تحلیل برگشتی (Sakurai,1993) ۳۹
- شکل (۳-۴) مراحل طراحی و اجرا یک ساختار در روش مشاهده ای (Sakurai,1993) ۴۰
- شکل (۴-۴) طرح کلی روش بهینه سازی تکرار (Jeon, Yang, 2004) ۴۷
- شکل (۵-۴) نحوه ی به روز شدن موقعیت ذره در الگوریتم PSO ۵۵
- شکل (۶-۴) روند مراحل محاسبات، در الگوریتم بهینه سازی تجمع ذرات ۵۶
- شکل (۱-۵) الف: تونل البرز در منطقه ۲ پروژه آزادراه تهران-شمال، ب: محل تقریبی تونل البرز، ج: نمایی از دهانه جنوبی تونل البرز و تونل دسترسی (جنرال مکانیک، ۱۳۹۳) ۶۴
- شکل (۲-۵) پروفیل طولی از تونل اکتشافی تونل البرز در امتداد محور تونل (جنرال مکانیک، ۱۳۹۳) ۶۵
- شکل (۳-۵) مقطع عرضی تونل البرز (جنرال مکانیک، ۱۳۹۳) ۶۸
- شکل (۴-۵) شماتیک نقاط ابزار همگرایی سنجی در تونل البرز ۷۳
- شکل (۵-۵) نمودار قرائت های ابزار همگرایی سنجی ایستگاه IN003 ۷۶
- شکل (۶-۵) نمودار نرخ همگرایی در برابر نرخ پیشروی سینه کار در ایستگاه IN003 ۷۷
- شکل (۷-۵) نمودار قرائت های ابزار همگرایی سنجی ایستگاه IS003 ۷۷
- شکل (۸-۵) نمودار نرخ همگرایی در برابر نرخ پیشروی سینه کار در ایستگاه IS003 ۷۸
- شکل (۹-۵) نمودار قرائت های ابزار همگرایی سنجی ایستگاه IS007 ۷۸
- شکل (۱۰-۵) نمودار نرخ همگرایی در برابر نرخ پیشروی سینه کار در ایستگاه IS007 ۷۹

- شکل (۱-۶) انواع روش های عددی (Huton,2004) ۸۴
- شکل (۲-۶) روند حل مسئله در نرم افزار FALC (کرمی و همکاران، ۱۳۹۱) ۸۸
- شکل (۳-۶) مدلسازی عددی سه بعدی تونل البرز ۸۹
- شکل (۴-۶) نمودار نیروهای نامتعادل کننده در مدلسازی عددی ۹۵
- شکل (۵-۶) کانتورهای تنش های برجای افقی قبل از حفاری تونل ۹۵
- شکل (۶-۶) نمایش نمادین معادلسازی یک مقطع از لایه نگهدارنده شامل مواد مختلف ۱ و ۲ (Torres & Diredrich, 2008) ۹۸
- شکل (۷-۶) حفاری انجام شده در مدلسازی عددی تونل البرز ۱۰۰
- شکل (۸-۶) تصویر سیستم های نگهداری اعمالی با استفاده از نرم افزار FLAC ۱۰۰
- شکل (۹-۶) نتایج جابه جایی های قائم حاصل از مدلسازی عددی در تونل البرز ۱۰۱
- شکل (۱۰-۶) نتایج جابه جایی های افقی حاصل از مدلسازی عددی در تونل البرز ۱۰۲
- شکل (۱۱-۶) نمودار تحلیل حساسیت برای پارامتر مدول الاستیسیته در برابر جابه جایی ۱۰۴
- شکل (۱۲-۶) نمودار تحلیل حساسیت ضریب پواسون در برابر جابه جایی ۱۰۴
- شکل (۱۳-۶) نمودار تحلیل حساسیت پارامتر M_d در برابر جابه جایی ۱۰۵
- شکل (۱۴-۶) نمودار تحلیل حساسیت پارامتر S در برابر جابه جایی ۱۰۵
- شکل (۱۵-۶) نمودار تحلیل حساسیت پارامتر k در برابر جابه جایی ۱۰۶
- شکل (۱۶-۶) نمودار جستجوی مقدار مدول الاستیسیته با استفاده از الگوریتم PSO برای ایستگاه IN003 ۱۱۰
- شکل (۱۷-۶) نمودار جستجوی مقدار مدول الاستیسیته با استفاده از الگوریتم PSO برای ایستگاه IS003 ۱۱۰
- شکل (۱۸-۶) نمودار جستجوی مقدار مدول الاستیسیته با استفاده از الگوریتم PSO برای ایستگاه IS007 ۱۱۱
- شکل (۱۹-۶) نمودار جستجوی مقدار M_d با استفاده از الگوریتم PSO برای ایستگاه IN003 ۱۱۱
- شکل (۲۰-۶) نمودار جستجوی مقدار M_d با استفاده از الگوریتم PSO برای ایستگاه IS003 ۱۱۲
- شکل (۲۱-۶) نمودار جستجوی مقدار M_d با استفاده از الگوریتم PSO برای ایستگاه IS007 ۱۱۲
- شکل (۲۲-۶) نمودار جستجوی مقدار S با استفاده از الگوریتم PSO برای ایستگاه IN003 ۱۱۳

شکل (۶-۲۳) نمودار جستجوی مقدار S با استفاده از الگوریتم PSO برای ایستگاه IS003.....۱۱۳

شکل (۶-۲۴) نمودار جستجوی مقدار S با استفاده از الگوریتم PSO برای ایستگاه IS007.....۱۱۴

شکل (۶-۲۵) نمودار جستجوی مقدار K با استفاده از الگوریتم PSO برای ایستگاه IN007.....۱۱۴

شکل (۶-۲۶) نمودار جستجوی مقدار K با استفاده از الگوریتم PSO برای ایستگاه IS003.....۱۱۵

شکل (۶-۲۷) نمودار جستجوی مقدار K با استفاده از الگوریتم PSO برای ایستگاه IS007.....۱۱۵

شکل (۶-۲۸) نمودار جستجوی مقدار مدول الاستیسیته با استفاده از الگوریتم SVM برای ایستگاه IN003.....۱۱۸

شکل (۶-۲۹) نمودار جستجوی مقدار مدول الاستیسیته با استفاده از الگوریتم SVM برای ایستگاه IS003.....۱۱۹

شکل (۶-۳۰) نمودار جستجوی مقدار مدول الاستیسیته با استفاده از الگوریتم SVM برای ایستگاه IS007.....۱۱۹

شکل (۶-۳۱) نمودار جستجوی مقدار M_d با استفاده از الگوریتم SVM برای ایستگاه IN003.....۱۲۰

شکل (۶-۳۲) نمودار جستجوی مقدار M_d با استفاده از الگوریتم SVM برای ایستگاه IS003.....۱۲۰

شکل (۶-۳۳) نمودار جستجوی مقدار M_d با استفاده از الگوریتم SVM برای ایستگاه IS007.....۱۲۱

شکل (۶-۳۴) نمودار جستجوی مقدار S با استفاده از الگوریتم SVM برای ایستگاه IN003.....۱۲۱

شکل (۶-۳۵) نمودار جستجوی مقدار S با استفاده از الگوریتم SVM برای ایستگاه IS003.....۱۲۲

شکل (۶-۳۶) نمودار جستجوی مقدار S با استفاده از الگوریتم SVM برای ایستگاه IS007.....۱۲۲

شکل (۶-۳۷) نمودار جستجوی مقدار K با استفاده از الگوریتم SVM برای ایستگاه IN003.....۱۲۳

شکل (۶-۳۸) نمودار جستجوی مقدار K با استفاده از الگوریتم SVM برای ایستگاه IS003.....۱۲۳

شکل (۶-۳۹) نمودار جستجوی مقدار K با استفاده از الگوریتم SVM برای ایستگاه IS007.....۱۲۴

جدول‌ها

- جدول (۱-۳) پارامترهای مورد سنجش در رفتارسنجی (Sakurai, 1993) ۲۹
- جدول (۱-۴) چند مورد از کاربرد الگوریتم های تکاملی همراه با محاسبه مستقیم تابع هدف توسط معادلات حاکم بر روش های عددی برای تحلیل برگشتی ۴۹
- جدول (۲-۴) چند مورد از کاربرد الگوریتم های تکاملی همراه با محاسبه تابع هدف توسط سیستم های فازی و شبکه های عصبی برای تحلیل برگشتی ۵۰
- جدول (۱-۵) مشخصات سیستم های نگهداری تونل البرز (GDE, 2015) ۶۷
- جدول (۲-۵) دامنه مقادیر ویژگی های فیزیکی و مکانیکی نمونه سنگ های مسیر تونل البرز (یساقی، ۱۳۸۲) ۶۹
- جدول (۳-۵) سازندهای موجود به همراه پارامترهای ژئومکانیکی در طول مسیر تونل البرز (گزارش شرکت GDE، ۲۰۱۵) ۷۰
- جدول (۴-۵) مشخصات و موقعیت ابزارهای نصب شده در تونل البرز ۷۱
- جدول (۵-۵) حدود بحرانی جابه جایی ۷۴
- جدول (۶-۵) عملیات مورد نیاز در صورت فراتر رفتن مقادیر جابه جایی از حدود بحرانی ۷۴
- جدول (۱-۶) مقادیر اولیه مورد استفاده برای مقطع های انتخابی مدلسازی عددی ۹۰
- جدول (۲-۶) حدود مقادیر پارامترهای توده سنگ مورد استفاده در آنالیز عددی ۹۲
- جدول (۳-۶) روابط مختلف مورد استفاده برای بدست آوردن نسبت تنش های افقی به قائم (شریفزاده، ۱۳۹۰) ۹۳
- جدول (۴-۶) حدود مقادیر نسبت تنش های محاسبه شده برای هر مقطع ۹۴
- جدول (۵-۶) خصوصیات راک بولت استفاده شده در مدلسازی (GDE, 2015) ۹۶
- شکل (۶-۶) خصوصیات شاتکریت و مش فولادی استفاده شده در مدلسازی (GDE, 2015) ۹۷
- جدول (۷-۶) پارامترهای تخمین زده شده توده سنگ با استفاده از الگوریتم PSO ۱۱۶
- جدول (۸-۶) مقایسه مقادیر جابه جایی واقعی با مقادیر تخمینی نرم افزار برای الگوریتم PSO ۱۱۷
- جدول (۹-۶) پارامترهای تخمین زده شده توده سنگ با استفاده از الگوریتم SVM ۱۲۴
- جدول (۱۰-۶) مقایسه مقادیر جابه جایی واقعی با مقادیر تخمینی نرم افزار برای الگوریتم SVM ۱۲۵
- جدول (۱۱-۶) مقایسه خطای هر الگوریتم در سیستم تحلیل برگشتی ۱۲۶

فصل اول

کلیات

۱-۱- کلیات

در طی دهه‌های گذشته روش‌های عددی مختلفی مانند المان محدود، المان مرزی و المان مجزا در تجزیه و تحلیل‌های مهندسی به کار گرفته شده‌اند. این روش‌ها امروزه به‌طور گسترده‌ای در طراحی مسائل ژئومکانیکی مختلف نظیر فضاها، زیرزمینی، مغارها، شیب‌ها و در فعالیت‌های مربوط به سدسازی مورد استفاده قرار می‌گیرند. با این وجود، هنوز هم پیش‌بینی رفتار مکانیکی ساختگاه‌ها با دقت مناسب امکان‌پذیر نمی‌باشد. این بدان معناست که، برای یک تحلیل با دقت بالا، به قابلیت اعتماد بالایی از فرضیات اولیه‌ی طراحی مورد نیاز است. بنابراین اگر این اطلاعات به اندازه کافی و با دقت بالا اندازه‌گیری نشوند و یا نماینده مقادیر مورد نظر پارامترهای ژئومکانیکی محیط نباشند، پیش‌بینی صحیح رفتار ژئومکانیکی ساختگاه مورد مطالعه با مشکل مواجه خواهد بود.

برای فهم بهتر رفتار ساختگاه مورد مطالعه و همچنین برای مدل کردن صحیح محیط، شناخت وضعیت تنش‌های برجا و پارامترهای ژئومکانیکی یک امر ضروری در تحلیل عددی می‌باشد. محاسبه مقادیر تنش‌های برجا و پارامترهای ژئومکانیکی از روش‌های مختلفی اندازه‌گیری می‌شود. نتایج این روش‌ها یک پراکندگی محسوس را در این اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد، حتی اگر دقت لازم در انجام آزمایش‌های مختلف به کار گرفته شده باشد، زیرا خواص مربوط به خاک و سنگ اطراف یک فضای زیرزمینی دارای ناهمسان‌گردی و تغییرات طبیعی می‌باشد. علاوه بر این، برای انجام این آزمایش‌ها، زمان و هزینه زیادی در طول انجام یک پروژه نیاز است. با توجه به این مسائل، می‌توان نتیجه گرفت که نتایج این آزمایش‌های برجا نمی‌تواند به طور مستقیم به عنوان داده‌های ورودی طراحی مورد استفاده قرار گیرند و نیاز به دقت و تفسیر این نتایج دارد.

برای غلبه بر این مشکلات، در طی فرایند اجرای پروژه، رفتارنگاری انجام می‌شود و این نه تنها به خاطر کنترل پایداری سازه‌ها، بلکه برای تخمین مجدد پارامترهای زمین‌شناسی و ژئومکانیکی است که در طراحی مورد استفاده قرار می‌گیرند (Hudson 1992).

۱-۲- اهمیت و هدف موضوع

استفاده از روش‌های تحلیل برگشتی^۱ در طی چند سال گذشته با توجه به شرایط پیچیده توده-سنگ‌های مختلف و مشکلات اندازه‌گیری برجا، امروزه کاربرد زیادی در حل مسائل ژئومکانیکی دارد. در سال‌های اخیر محققان زیادی با توجه به این که تغییر شکل‌های به‌وجود آمده در فعالیت‌های مهندسی سنگ معمولاً با قابلیت اعتماد بالا و به آسانی قابل اندازه‌گیری نیست، پژوهش‌های زیادی را در توسعه روش‌های مختلف تحلیل برگشتی براساس جابه‌جایی‌های صورت گرفته در محیط انجام داده‌اند. از عمده‌ترین مسائل در طراحی مهندسی سنگ، اندازه‌گیری و تخمین پارامترهای ژئومکانیکی و تنش‌های برجا در توده‌سنگ است. با توجه به این مسئله و نیاز به زمان و هزینه زیاد برای انجام آزمایش‌های برجا و آزمایشگاهی و علاوه بر این، پیچیدگی‌های مختلف زمین‌شناسی و تغییرات پارامترهای ژئومکانیکی در محل‌های مختلف پروژه، استفاده از تحلیل برگشتی می‌تواند با صرف هزینه و زمان کمتر، روشی قابل اطمینان برای تعیین تنش‌های برجا و پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ باشد. البته برای انجام بهتر تحلیل برگشتی و بهینه نمودن نتایج آن، انجام آزمایشات برجا لازم می‌باشد. از اهداف اصلی طراحی و نصب ابزار دقیق تونل البرز می‌توان به شناخت رفتار و عکس‌العمل واقعی توده‌سنگ دربرگیرنده تونل حین حفاری و کمک به پیش‌بینی رفتار احتمالی آن در آینده و کفایت یا عدم کفایت سیستم‌های نگهدارنده و همچنین تحلیل برگشتی اشاره نمود. علاوه بر این، تونل البرز به عنوان طولانی‌ترین تونل راه ایران با طول تقریباً ۶۴۰۰ متر شناخته می‌شود. تونل شرقی (باند رفت) حفاری آن پایان یافته است

¹ -Back Analysis

اما تونل غربی هنوز حفاری نشده است. بنابراین تحلیل بر روی پارامترهای مختلف و اندازه‌گیری تنش‌ها در تونل شرقی می‌تواند برای استفاده در تونل غربی کارآمد باشد. همچنین با توجه به این که در تونل البرز تاکنون تحلیلی برای برآورد پارامترهای مهم توده‌سنگ صورت نگرفته است، بررسی و برآورد این پارامترها می‌تواند برای طراحی بهینه سیستم‌های نگهداری مفید واقع شود.

۱-۳- ساختار پایان‌نامه

این پایان‌نامه در ۷ فصل به شرح زیر تدوین شده است:

در فصل اول، کلیات، ضرورت تحقیق، اهداف تحقیق و ساختار گزارش بیان شده است.

در فصل دوم تحت عنوان مروری بر مطالعات گذشته، به کلیه فعالیت‌های مرتبط انجام شده در این زمینه (تحلیل برگشتی) پرداخته شده است.

در فصل سوم تحت عنوان رفتارنگاری و ابزاردقیق، به معرفی کلی مفاهیم رفتارنگاری و توضیح ابزارهای رفتارسنجی اشاره شده است.

در فصل چهارم تحت عنوان تحلیل برگشتی، به توضیح مفاهیم کلی تحلیل برگشتی و انواع آن با نگاه ویژه به تحلیل برگشتی هوشمند اشاره شده است. در این فصل علاوه بر توضیح تحلیل برگشتی، الگوریتم‌های جدیدتر تحلیل برگشتی و همچنین الگوریتم‌های استفاده شده در این پایان‌نامه تشریح شدند.

در فصل پنجم تحت عنوان مشخصات ساختگاه، به معرفی کلی منطقه مورد مطالعه یعنی تونل البرز پرداخته شده است.

در فصل ششم، تحت عنوان تحلیل برگشتی و آنالیز عددی تونل البرز، ابتدا به معرفی نرم‌افزار FLAC پرداخته شده و فرایند مدل‌سازی به طور کامل تشریح می‌شود. سپس با استفاده از تحلیل برگشتی هوشمند پارامترهای مدنظر توده‌سنگ برآورد شده و با نتایج رفتارسنجی مقایسه شده است.

فصل هفتم نیز مربوط به نتایج تحقیق و پیشنهادها می باشد.

فصل دوم

مروری بر مطالعات گذشته

۲-۱- مقدمه

طراحی و انجام فعالیت‌های زیرزمینی در اکثر مواقع بر مبنای روش مشاهده‌ای می‌باشد که توسط پک^۱ و ترزاقی^۲ در سال ۱۹۴۸ ارائه شده است. در این روش، اندازه‌گیری‌های برجها برای غلبه بر عدم قطعیت در خصوصیات زمین‌شناسی یا ژئومکانیکی، مورد استفاده قرار می‌گیرد و در طول ساخت و در بعضی حالات نیز در مرحله اکتشاف، تنش‌ها و جابه‌جایی‌های ساختار زیرزمینی اندازه‌گیری می‌شود. در فعالیت‌های زیرزمینی، مطالعاتی برای تعیین پارامترهای ژئومکانیکی با استفاده از روش تحلیل برگشتی انجام شده است. در ابتدا این مطالعات بیشتر به صورت سعی و خطا انجام می‌شد اما از اواخر دهه ۹۰ میلادی این مطالعات به صورت گسترده‌تری و با استفاده از پیشرفت‌های تکنولوژی صورت گرفت. با روی کار آمدن روش‌های جدید و استفاده از الگوریتم‌های مختلف روش تحلیل برگشتی به طور کلی جواب‌های دقیق‌تری برای مسائل ژئومکانیکی داشتند. روش‌های عددی نیز برای آن‌که درک بهتری از شرایط مختلف زمین‌شناسی به وجود آوردند، به مرور جایگزین روش‌های تجربی و آزمون و خطا شدند (Filipe & Dasilva, 2007).

در این فصل به مرور برخی از فعالیت‌های مختلف انجام شده در زمینه تحلیل برگشتی با تاکید بر روش‌های هوشمند پرداخته می‌شود و در پایان مثال‌های کاربردی مهم در زمینه فضا‌های زیرزمینی ارائه خواهد شد.

۲-۲- مروری بر مطالعات گذشته

در اوایل دهه ۷۰ میلادی تئوری‌های مختلفی برای شناسایی خواص سنگ با استفاده از روش‌های مشاهده‌ای و برجها توسعه یافتند (Astrom & Eykhoff, 1971). بنابراین علاقه اصلی محققان در مورد حل مسائل غیرخطی، دستیابی به یک راه‌حل پایدار از نظر ریاضی با دقت بالا بوده است. در سال ۱۹۷۴

¹ -Peck

² -Terzaghi

ساکورایی^۱ در زمینه شناخت پارامترهای ژئومکانیکی با استفاده از فرضیات ساده‌ای یک روش تحلیل برگشتی برای تعیین پارامترهای ژئومکانیکی و تعیین تنش‌های اولیه در یک محیط زیرزمینی را در شرایط ویسکوپلاستیک پیشنهاد کرد (Sakurai, 1974).

پس از مطالعات ساکورایی، در این زمینه در سال ۱۹۸۰ توسط گیودا^۲ فعالیت‌هایی در این مورد انجام شده است. این روش برای ارزیابی پارامترهای طراحی در ساختارهای زیرزمینی و بهبود روش مشاهده‌ای معرفی شده است (Gioda, 1980). در همین سال گیودا و همکاران روشی برای تخمین پارامترهای مقاومتی و حالت تنش با استفاده از تفسیر نتایج آزمایش‌های فشار آب حفره‌ای در تونل ارائه نموده‌اند (Gioda, 1980).

دنگ^۳ و لی^۴ (۱۹۸۱) یک روش تحلیل برگشتی جدید را مبتنی بر الگوریتم‌های ژنتیک^۵ و شبکه عصبی^۶ ارائه دادند. این روش‌ها برای استفاده در یک ساختگاه شیب سنگی استفاده شده است. استفاده از این الگوریتم‌ها می‌تواند قابلیت اطمینان نتایج به‌دست آمده را به طرز چشم‌گیری افزایش دهد (Deng & Lee, 1981).

گیودا در سال ۱۹۸۱ شکل اصلاح شده‌ای از الگوریتم کاونانگ را پیشنهاد نمود که در آن با استفاده از تراکم الاستیک و روش حداقل مربعات، می‌توان مدول حجمی و برشی را به صورت برگشتی محاسبه نمود. در این الگوریتم برای به دست آوردن ثابت‌های مواد نیز اندازه‌گیری جابه‌جایی به تنهایی کافی است. با این وجود برای شناسایی شرایط بارگذاری به همراه ثابت‌های مواد علاوه بر جابه‌جایی، اندازه‌گیری مقادیر بارگذاری و فشار نیز ضروری خواهد بود. به همین منظور یک روش عمومی و منحصر

¹ - Sakurai

² - Gioda

³ - Dang

⁴ - Lee

⁵ - Genetic Algorhythm (GA)

⁶ - Artificial Neural Networks (ANN)

به فرد برای محاسبه برگشتی پارامترهای بارگذاری شده توسط گیودا و جورینا^۱ فرمول نویسی و ارائه شد (Gioda, 1981).

تاکوچی^۲ و ساکورایی (۱۹۷۷)، یک روش تحلیل برگشتی معکوس را برای تعیین دو مقدار نسبت تنش‌ها و مدول یانگ ارائه کردند. روابط ارائه شده بر مبنای داده‌های حاصل از تعداد معدودی اندازه‌گیری جابه‌جایی و با فرضیات ساده‌شده‌ای مانند موادی همگن و دارای رفتار الاستیک خطی قادر به تخمین توزیع کرنشی در اطراف تونل می‌باشد (Takuchi & Sakurai, 1977).

سیویدینی^۳ و همکاران در سال ۱۹۸۱، با استفاده از روش‌های تحلیل برگشتی مستقیم و معکوس فرمول‌بندی را ارائه کردند و این‌طور نتیجه‌گیری نمودند که روش مستقیم بر حداقل کردن توابع خطا استوار است و ممکن است این روش نسبت به روش معکوس برتری محسوسی در اندازه‌گیری پارامترهای مختلف ژئومکانیکی داشته باشد (Cividini, et al, 1981). 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 (Cividini, et al, 1985).

لدسما^۴ در سال ۱۹۹۶، با استفاده از یک تحلیل برگشتی معکوس^۵ و استفاده از به حداقل رساندن تابع خطا و روش بهینه‌سازی المان محدود برای تعیین نسبت تنش‌ها و مدول الاستیسیته در یک تونل فرضی، روشی را ارائه کرده است (Ledesma, et al, 1996).

¹ -Jurina

² -Takuchi

³ -Cividini

⁴ -Ladesma

⁵ -Inverse Approach

ماتسون^۱ در سال ۲۰۰۱ از روش های سیمپلکس^۲ و روزنبروک^۳ برای بهینه سازی روش تحلیل برگشتی استفاده کرده است. این روش ها از روش های الگوریتم های مستقیم^۴ در فرایند تحلیل برگشتی هستند (Mattson, 2001).

دنگ در سال ۲۰۰۱، از یک روش تحلیل برگشتی بر اساس حداقل سازی تابع خطا ارائه کرده است. این یک روش ساده در عین حال قابل اعتماد است که از مشتق های تابع خطا استفاده نمی کند. این روش برای سه مطالعه موردی در فعالیتهای مختلف ژئومکانیکی به کار گرفته شده است (Deng, 2001).

کاسترو^۵ در سال ۲۰۰۲ برای تعیین تنش های برجا و تغییر شکل پذیری توده سنگ در یک مطالعه موردی، روشی را پیشنهاد کرده است که به طور مستقیم از معادلات مربوط به روش المان محدود استفاده می کند. این روش اطلاعات گذشته مراحل حفاری را برای محاسبه واقعی وضعیت تنش ها در نظر گرفته است و باعث تحلیل برگشتی تعدادی ناحیه مختلف با مدول الاستیک و وضعیت تنش متفاوت می شود (Castro, 2002).

شانگا^۶ در سال ۲۰۰۲ از اولین فعالیتهای تحلیل برگشتی هوشمند^۷ را انجام داده است. وی یک تحلیل برگشتی هوشمند را برای تعیین وضعیت تنش ها و مدول الاستیسیته را براساس ۱۰۰ مطالعه موردی در تونل های کشور چین انجام داده است (Shanga, et al, 2002).

¹ -Mattson

² -Simplex

³ -Rosenberg

⁴ -Direct Approach

⁵ -Castro

⁶ -Shang

⁷ -Intelligence Approach

یانگ و الگمال در سال ۲۰۰۳، از یک برنامه بهینه‌سازی که روش شبه نیوتن را استفاده کرده است که هدف آن تخمین پارامترهای کرنش-تنش برشی از آزمایش‌های سه‌محوری بوده است (Yang & Elgmal, 2003).

ساکورایی و همکاران در سال ۲۰۰۳ روش جدیدی ارائه کرده است که در آن روش تحلیل برگشتی برای تشخیص توزیع کرنش اطراف تونل، از یک مدل الاستیک خطی شروع می‌شود و نتایج به طور عددی با افزودن مجموعه‌ای از نیروها جهت تغییر رفتار مواد به رفتار غیرخطی تنظیم می‌شوند (Sakurai, et al, 2003).

جئون و یانگ^۱ در سال ۲۰۰۴، با استفاده از نرم‌افزار المان محدود FLAC با برنامه‌های بهینه‌سازی خارجی و عمومی را استفاده نموده‌اند. جئون و یانگ برای تعیین دو پارامتر اصلی در طراحی تونل، مدول الاستیک و نسبت تنش‌ها، الگوریتمی را که بر اساس روش جستجوی مستقیم عمل می‌کرد، در نرم افزار FLAC به وسیله زبان برنامه‌نویسی FISH تعریف کرده‌اند. برای پیدا کردن مناسب‌ترین الگوریتم تحلیل برگشتی در میان تکنیک‌های بهینه‌سازی، سه الگوریتم شامل روش تک‌متغیره، روش جستجوی الگویی و روش تک‌متغیره متناوب می‌باشد که روش تک‌متغیره متناوب در مطالعه‌ی آن‌ها توسعه داده شده است. برای این که کارایی الگوریتم مورد ارزیابی قرار گیرد و اعتبار آن تایید شود، الگوریتم به مدلی اعمال شده است. بررسی الگوریتم به وسیله‌ی راه حل تحلیلی کرش^۲ و نتایج منتشر شده از تحقیقات جنز موفقیت‌آمیز بوده است. این الگوریتم به یک تونل واقعی نیز اعمال شده است. آن‌ها نتیجه گرفته‌اند که روش‌های تک‌متغیره به طور موفقیت‌آمیزی مقادیر بهینه را صرف نظر از مقادیر اولیه جستجو می‌کنند و در روش جستجوی الگویی، گام‌های محاسباتی در موقعی که مقادیر اولیه با مقادیر واقعی اختلاف زیادی دارند، افزایش می‌یابد (Jeona, Yang, 2004).

¹ -Jeona & Yang

² -Kirsch

هیستاک^۱ و همکارانش در سال ۲۰۰۷، برای ارزیابی خصوصیات مکانیکی توده سنگ جلوی سینه کار تونل، یک روش تحلیل برگشتی سه بعدی پیشنهاد کرده اند. مدول الاستیسیته، ضریب پواسون و شش مولفه ی تنش برجا از طریق این روش، مشخص می شوند. قابلیت اجرا و سادگی آن از مزیت های این روش می باشد (Hisatake & Hieda, 2008).

قربانی و شریف زاده در سال ۲۰۰۹، یک تحلیل برگشتی با استفاده از روش مستقیم را برای مغار سد نیروگاه سیاه بیشه انجام داده اند. الگوریتم بهینه سازی برای انجام فرایند تحلیل برگشتی، الگوریتم بهینه سازی تک متغیره بوده است. آن ها نشان دادند که نتایج حاصل از تحلیل برگشتی با روش مستقیم از کارایی خوبی برخوردار است. هم چنین نتایج آن ها نشان داد مغار نیروگاه در شرایط طبیعی و پایدار قرار دارد. (قربانی و شریف زاده، ۲۰۰۹).

چنگ^۲ و همکاران در سال ۲۰۱۰ یک مدل الاستیک-پلاستیک غیر کششی و یک روش تحلیل برگشتی بهینه شده بر مبنای الگوریتم ژنتیک ارائه داده اند. (Cheng-Xiang , et al, 2010).

اوچمانسکی و بزوکا^۳ در سال ۲۰۱۲، از روش شبکه عصبی مصنوعی (ANN) برای تحلیل برگشتی و تحلیل حساسیت پارامترهای خاک در دو تونل مشابه با لاینینگ بتن پاشی شده (SCL) استفاده کرده اند. چانسینگ ژو^۴ و همکارانش در سال ۲۰۱۴، از روشی جدید و با استفاده از کوپل الگوریتم های کلونی زنبور عسل و ماشین بردار پشتیبان تحلیل برگشتی هوشمندی را انجام داده اند. آن های برای انجام این تحلیل برگشتی از فرضیات ساده شده ای مانند تونل دایره ای استفاده کرده اند. اما نتایج بسیار

¹ - Hisatake

² - Cheng

³ - Ochmanski & Bzowka

⁴ -Zhu

کاربردی بوده است و می‌توان نتایج حاصل از این مطالعه را برای فعالی‌های دیگر نیز به کار برد. (Ochmanski & Bzowka, 2012, Zhu, et al, 2014).

خامسی و همکاران در سال ۲۰۱۵ یک روش هوشمند جدید را با استفاده از ترکیب الگوریتم‌های تکاملی و سیستم‌های فازی ارائه دادند. تحلیل برگشتی در واقع برای یک تونل در خط ۲ مترو کرج انجام شده است. نتایج ابزار دقیق (نشست‌سنج) پایش شده و با استفاده از سه الگوریتم فازی-هوشمند تخمین زده شده است. مدل رفتاری مدنظر در این فعالیت موهر-کلمب در نظر گرفته شده است. با استفاده از تحلیل حساسیت صورت گرفته مشخص شده که پارامترهای مدول الاستیک، نسبت تنش‌ها، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی سنگ به عنوان داده‌های ورودی سیستم در نظر گرفته می‌شوند. سپس با استفاده از تحلیل برگشتی و استفاده از یک پایگاه داده قواعد فازی، پارامترهای توده‌سنگ تخمین زده شده است. نتایج نشان داده است که الگوریتم بهینه‌سازی تجمعی ذرات بهترین کارایی را در بین الگوریتم‌های انتخاب شده در این فعالیت دارد (خامسی و همکاران، ۲۰۱۵).

ال وی^۱ و همکارانش در سال ۲۰۱۷ با استفاده از تحلیل برگشتی پارامترهای مقاومت برشی توده‌سنگ به تحلیل پایداری شیب‌های سنگی که در اثر زلزله القا شده‌اند، پرداختند. ارزیابی پایداری به ترتیب تحت شرایط استاتیکی، دینامیکی و بارش انجام شد. نتایج نشان داد که حالت گسیختگی عمده شیب لغزش در طول یک گسل در منطقه می‌باشد و ریزش‌های محلی توده‌های آویزان در قسمت بالای شیب در اثر بار دینامیکی و بارش اتفاق افتاده است که برای بهبود پایداری شیب نصب راک‌بولت در بالای شیب پیشنهاد دادند (Lv, et al, 2017).

لو^۲ و همکاران در سال ۲۰۱۸ با استفاده از تحلیل برگشتی پارامترهای توده‌سنگ را در شرایط زمین‌های نرم بررسی کردند. آن‌ها با استفاده از یک توصیف لاگرانژی فوری و با استفاده از کد تجاری

¹ -L.V

² -Luo

FLAC مقادیر پارامترهای مختلف را بررسی کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که تغییر شکل عمودی تونل تحت تاثیر مدول الاستیک و نسبت تنش توده سنگ قرار گرفته است و تاثیر مدول الاستیک نسبت به نسبت تنش در تغییر شکل عمودی بیشتر خواهد بود. همچنین نسبت تنش در جابه‌جایی های افقی تاثیر بیشتری خواهد داشت (Luo, et al, 2018).

حبیبی و زارع در سال ۱۳۹۶، با استفاده از داده‌های ابزار دقیق یک تحلیل برگشتی انجام دادند. برای این کار ابتدا از پارامترهای ژئومکانیکی و محیطی به دست آمده از نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی به مدل سازی دو ایستگاه از مقاطع تونل های دسترسی با استفاده از کد تجاری $FLAC^{2D}$ پرداخته شده است، که یک ایستگاه از تونل دسترسی اصلی و دیگری از مغار ترانسفورمر به هد مغار نیروگاه انتخاب شده است. سپس بر مبنای داده‌های حاصل و به وسیله تحلیل برگشتی مستقیم با روش جستجوی تک‌متغیره متناوب، مقادیر پارامترهای ژئومکانیکی شامل مدول الاستیسیته، نسبت تنش‌های برجا، زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی برآورد شده است (حبیبی و زارع، ۱۳۹۶).

۲-۳- مثال‌های کاربردی در زمینه تحلیل برگشتی هوشمند

همان‌طور که در بخش مقدمه این فصل نیز گفته شد، در این قسمت مثال‌های کاربردی در زمینه تحلیل برگشتی با تاکید ویژه بر روش‌های هوشمند و نوین به صورت خلاصه آورده خواهد شد.

۲-۳-۱- تحلیل برگشتی هوشمند خط ۲ مترو کرج با استفاده از روش‌های فازی

در این مطالعه ۳ نوع سیستم فازی برای تعیین بازگشتی پارامترهای ژئومکانیکی توده خاک و شرایط تنش منطقه‌ای از کیلومتر ۳.۴ تا ۱۳.۷ در پروژه خط ۲ مترو کرج با روش تحلیل برگشتی هوشمند طراحی شدند، بدین منظور با استفاده از داده‌های حاصل از آزمایش‌های برجا و مطالعات زمین‌شناسی و مدل سازی عددی تونل پروژه خط ۲ مترو کرج با نرم افزار Plaxis 3D Tunnel زوج داده‌های ورودی-خروجی مورد نیاز برای طراحی سیستم‌های فازی تولید شد. سپس ۳ سیستم فازی با ساختار موتور استنتاج ضرب، فازی ساز منفرد، غیرفازی ساز میانگین مراکز و توابع عضویت گوسین برای

تحلیل برگشتی هوشمند با ورودی‌های شماره گروه خاکی، خصوصیات توده‌خاک و شرایط تنش منطقه و خروجی میزان نشست سطحی، با استفاده از روش‌های آموزش گرادیان نزولی، الگوریتم بهینه‌سازی جمعی ذرات و الگوریتم رقابت استعماری طراحی شدند. تعیین تعداد قواعد فازی، توسط خوشه‌بندی با روش نزدیک‌ترین همسایه، هم‌زمان با طراحی سیستم‌های فازی انجام شد. برای بررسی عملکرد سیستم-های فازی طراحی شده، از نتایج حاصل از قرائت‌های نشست‌سنجی ثبت‌شده در ۲۰ ایستگاه نشست-سنجی استفاده شد. برای تعیین ورودی‌های معادل با میزان نشست ثبت شده در ایستگاه‌های نشست-سنجی در هر سیستم فازی، از الگوریتم‌های تکاملی استفاده شد. نتایج نشان دادند که هر ۳ سیستم از عملکرد بسیار خوبی برخوردارند و سیستم‌های فازی طراحی شده با الگوریتم بهینه‌سازی تجمعی ذرات دارای بهترین عملکرد می‌باشد (خامسی و همکاران، ۱۳۹۶).

۲-۳-۲- تحلیل برگشتی هوشمند راه‌آهن اصفهان-شیراز با استفاده از الگوریتم ژنتیک

تونل شماره ۱ راه‌آهن اصفهان-شیراز که در این مطالعه مورد تحلیل قرار گرفته است، در زون تحت تنش سنج-سیرجان واقع شده است. قبل از حفر تونل هیچگونه مطالعات ژئومکانیکی و ژئوفیزیکی جهت شناسایی جنس طبقات و وضعیت آب در مسیر تونل انجام نشده است. این تونل در سازند شمشک متعلق به دوره ژوراسیک واقع شده و از نظر وضعیت و تشکیلات زمین‌شناسی اغلب شامل شیل‌های ذغالی و لنزهای ماسه‌سنگی می‌باشد. در زمان حفر تونل، به دلیل مشکلات ناشی از ناپایداری تونل، مترهای همگرایی جهت اندازه‌گیری همگرایی دیواره‌ها بعد از حفر و در زمان حفاری، نصب شده است. با توجه به تغییرشکل‌های زیاد که با گذشت زمان مقدار آن‌ها در حال افزایش بوده است، نیاز به تعیین تنش‌های برجا و پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ می‌باشد. در این مطالعه برای اولین بار تحلیل برگشتی بهینه‌شده مستقیم با استفاده از الگوریتم ژنتیک برای تونل شماره ۱ راه‌آهن اصفهان-شیراز به‌وسیله نرم‌افزار تفاضل محدود $FLAC^{3d}$ انجام شده است. مدول الاستیک، چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و نسبت تنش‌های برجا با به کارگیری روش جدید تعیین شده‌اند. در این روش

همگرایی تونل به صورت تابعی از پارامترها در نظر گرفته شد و با انتگرال گیری از دیفرانسیل این تابع، معادلاتی به دست آمد. با حل این معادلات به وسیله ی الگوریتم ژنتیک، پارامترها تعیین شدند. نتایج تحقیق نشان می دهد که پارامترهای محاسباتی، تطابق خوبی با شرایط زمین شناسی و تکتونیکی منطقه دارند. استفاده از الگوریتم ژنتیک نشان می دهد که این روش، ابزار قوی برای ارزیابی و بهینه سازی پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ می باشد. انجام تحلیل حساسیت بر روی نسبت تنش های برجا و پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ نشان می دهد که همگرایی تونل به شدت به مدول تغییر شکل پذیری توده سنگ و نسبت تنش های برجا وابسته می باشد. همچنین در این مطالعه، سیستم نگهداری موقت تونل مورد تحلیل قرار گرفته است. سیستم نگهداری موقت تونل شامل اجرا و نصب قاب های فولادی و شبکه های فولادی و شاتکریت است. در این مطالعه با استفاده از روش اثر متقابل نگهداری-زمین، بارهای اعمالی بر روی نگهداری موقت تعیین و با استفاده از دیگرام های ظرفیت نگهداری، ایمنی این سیستم بررسی شده است. نتایج نشان داد که سیستم نگهداری از ایمنی بالایی برخوردار است (ساریخانی خرمی، ۱۳۹۰).

۲-۳-۳- آنالیز برگشتی با استفاده از الگوریتم کلونی زنبور عسل (ABC)

به طور کلی در آنالیزهای برگشتی معمولا از روش های عددی به عنوان یک راه حل تحلیلی نیز استفاده می شود. اما راه حل های عددی معمولا بسیار زمان بر هستند، بنابراین استفاده از روش های جایگزین می تواند کمک شایانی به سرعت حل معادلات کند. بر این اساس در این بخش با استفاده از روش تحلیل برگشتی تجمع زنبور عسل (ABC) ابتدا یک تحلیل بر روی یک تونل دایره ای و در شرایط هیدرواستاتیک صورت گرفته است. با توجه به اینکه معمولا این شرایط به ندرت پیش می آید، از روش ماشین برداری پشتیبان (LSSVM) نیز به عنوان مکمل برای الگوریتم زنبور عسل استفاده شده است. پایه و اساس الگوریتم زنبور عسل روش های هوش مصنوعی می باشد. در این بخش با استفاده از ترکیب دو روش ماشین برداری پشتیبان و روش الگوریتم زنبور عسل یک مثال برای یک تونل فرضی با شرایط

موردنظر انجام شده است که نتایج و کاربردهای آن می‌تواند برای حل مثال‌های واقعی کمک شود. مقادیر اندازه‌گیری شده با استفاده از داده‌های ورودی، همچنین نقاط کلیدی که به وسیله تحلیل برگشتی به دست آمده‌اند. با توجه به شرایط، برای استفاده از این روش، این مهم است که هسته اصلی تعیین شود. این مقاله یک روش جدید بر اساس الگوریتم زنبور عسل و ماشین‌برداری پشتیبان می‌باشد. به طور کلی الگوریتم زنبور عسل کارایی بهتری برای تونل‌هایی با شرایط هیدرواستاتیکی دارد و در نتیجه برای این که بتوان از این روش به طور کلی استفاده کرد بهتر است که روشی همانند ماشین‌برداری پشتیبان مکمل آن است. همچنین مزیت دیگری که روش ماشین‌برداری پشتیبان دارد، توانایی حل رابطه غیرخطی میان پارامترهای ژئومکانیکی و جابه‌جایی‌ها در تونل‌های نعل‌اسبی است. این روش همچنین باعث افزایش کارایی و دقت تحلیل برگشتی می‌شود و امکان استفاده از آن برای حل مسائل پیچیده را نیز فراهم می‌کند (Zhu, et al. 2014).

فصل سوم

رفتارنگاری و ابزار دقیق

۳-۱- رفتارسنجی

یکی از اصلی‌ترین مراحل احداث سازه‌های مختلف در ژئومکانیک، تحلیل و بررسی پایداری فضای مورد مطالعه است. به همین دلیل محققین و مهندسين این صنعت همواره به دنبال روش‌های ایمن و اقتصادی در پروژه‌های عظیم احداث شده در سنگ و خاک هستند. اهداف اصلی بررسی پایداری فضاهای مختلف مانند فضاهای زیرزمینی ارائه روشی مناسب جهت حفاری و طراحی سیستم نگهداری ایمن و در عین حال اقتصادی می‌باشد. روش‌های اصلی تحلیل پایداری و طراحی سیستم‌های تحکیم در تونل‌ها به سه دسته‌ی روش‌های ریاضی، تجربی و مشاهده‌ای تقسیم می‌شود.

رفتارنگاری در واقع یکی از فعالیت‌های متداول در روش‌های مشاهده‌ای می‌باشد. در واقع اکثر فعالیت‌های مشاهده‌ای امروزه بر مبنای رفتارنگاری سنگ و خاک انجام می‌شود. روش‌های مشاهده‌ای در ابتدا براساس مشاهدات واقعی حرکات زمین در هنگام حفاری و تحلیل سیستم نگهداری ابداع شده‌اند و به کمک این روش‌ها می‌توان هرگونه ناپایداری در فضای زیرزمینی را با دقت ارزیابی کرد.

روش‌های مشاهده‌ای متداول شامل روش‌های تونل‌زنی اتریشی^۱ و روش همگرایی-همجواری^۲ هستند. اساس کار در این روش‌ها در واقع پایداری سازه و مشاهده و پایش^۳ مرتب سازه احداث شده می‌باشد. یکی از مزیت‌های استفاده از رفتارنگاری ارزیابی سیستم نگهداری و اصلاحات لازم پس از مشاهده مقادیر پایش شده، می‌باشد. علاوه بر این می‌توان اطلاعات اولیه‌ی طراحی شده قبل از حفر یک سازه زیرزمینی را نیز اصلاح کرد. اجرای این عملیات را در واقع رفتارسنجی می‌نامند (Beiniawski, 1984).

¹ - New Astruian Tunneling Method (NATM)

² - Convergence-Confinement

³ -Monitoring

رفتارنگاری در طرح‌های مختلف می‌تواند از وقوع مشکلات احتمالی جلوگیری کند. با استفاده از داده‌های رفتارنگاری می‌توان وضعیت تغییرات در توده‌سنگ را بررسی کرد. همچنین می‌توان با استفاده از رفتارنگاری ناپایداری فضای احداث شده در سنگ و خاک را ارزیابی کرد و به علت وقوع ناپایداری در سازه پی برد. پیش‌بینی این عوامل مربوط به اندازه‌گیری فشار آب حفره‌ای، حرکت و جابه‌جایی دیواره‌ها و عواملی از این دست می‌باشد. یکی از مزیت‌های بسیار مهم در رفتارنگاری هزینه بسیار پایین در اجرای طرح است که می‌تواند صرفه‌جویی قابل ملاحظه‌ای را در کل احداث یک پروژه پدید آورد. (Dunncliff & Gordon, 1988).

۳-۱-۱- اهداف رفتارسنجی

رفتارسنجی تاسیسات احداث شده در زیرزمین برای تامین چهار منظور اساسی زیر انجام می‌شود:

- ۱- ثبت مقادیر طبیعی و نیز تغییرات ایجاد شده در پارامترهای ژئوتکنیکی مثل سطح آب زیرزمینی، وضعیت طبقات زمین و اتفاقات زمین‌لرزشی قبل از اجرای یک طرح مهندسی
- ۲- تامین ایمنی ضمن عملیات ساختاری و بهره‌برداری با دادن اخطار به موقع مثل تشدید غیر عادی جابه‌جایی‌های زمین، فشار آب زیرزمینی و بارهای اعمال شده بر اجرای سیستم نگهداری.
- ۳- کنترل صحت فرضیات، مدل‌های انتخابی و مشخصات توده‌سنگ که در محاسبات مربوط به طراحی به کار می‌روند.

- ۴- کنترل انجام امور ترمیمی و اصلاحی در زمین، مانند تونل‌سازی در زمین‌های حاوی آب، منجمد کردن زمین حین حفر چاه یا تونل، تقویت زمین با عملیات تزریقی و زه‌کشی.

سیستم‌های رفتارسنجی که در ارتباط با حفاریات زیرزمینی بزرگ‌مقیاس مورد استفاده قرار می‌گیرند، گاه بسیار پیچیده و پرهزینه‌اند، اما باید توجه داشت که با استفاده از این ابزار می‌توان نتایج ارزشمندی را در چگونگی واکنش توده‌سنگ به دست آورد (Dunncliff, Gordon, 1988).

هدف اصلی بررسی‌های رفتارسنجی برجا، تعیین شرایط پایداری حفاریات زیرزمینی با ارائه داده-های کیفی در مورد رفتار توده‌سنگ و سیستم نگهداری است. اهمیت رفتارسنجی تونل را مدت‌ها پیش رابسویچ^۱ در سال ۱۹۶۴ مطرح ساخت. وی در اتریش، طراحی را بر اساس اندازه‌گیری‌های برجا ارائه کرد که به نام گسترش تجربی نامیده می‌شد و ادامه کار وی، امروزه بنام روش جدید اتریشی شناخته شده است (Dunncliff, Gordon, 1988).

۳-۱-۲- نقش رفتارسنجی در مراحل مختلف طرح و اجرای سازه‌ها

از نقطه نظر زمان رفتارسنجی می‌توان هدف‌ها را به شرح زیر تقسیم‌بندی کرد (شاهوردیلو، ۱۳۷۹):

۱- قبل از اجرا

- برای ثبت مقادیر طبیعی و تغییرات ایجاد شده در پارامترهای ژئوتکنیکی هم‌چون سطح و فشار آب زیرزمینی، مقاومت بر جای سنگ و وضعیت تنش‌های برجا از پارامترهای ثبت شده در فاز طراحی استفاده می‌شود.
- برای کسب نتیجه آزمایش مقاومت در مقابل بار و استفاده از آن برای طراحی های بهینه و اقتصادی، مثلاً آزمایش مقاومت در مقابل نیرو در مهارهای بلند.
- هنگام وقوع شرایط بحرانی می‌بایست خصوصیات آن برای انجام تمهیدات ترمیمی مشخص گردد که ابزار دقیق نقش مهمی در تعیین این خصوصیات دارد.

۲- در حین اجرا

- اعلام قریب‌الوقوع بودن تخریب یا گسیختگی
- هشدار به افراد جهت دور شدن از منطقه خطر

¹ - Rabecwicz

- آشکارسازی موارد و جوانب ناشناخته کار
- ارزیابی آن دسته از فرضیات طراحی که در هنگام طراحی ساده سازی شده و طراحی را محافظه کارانه نموده است.
- ارزیابی عملکرد و کنترل کیفیت
- به حداقل رساندن آسیب‌های وارده به تاسیسات و سازه‌های مجاور
- کنترل پیشرفت بهینه پروژه

۳- در زمان بهره‌برداری

برای کنترل رفتار کلی سازه در طول بهره‌برداری، اندازه‌گیری و مراقبت بر واکنش و پاسخ سازه بر خود سازه و عملیات‌های مجاور سازه مورد نظر ضرورت دارد.

هدف از برنامه ابزاربندی در سازه‌های زیرزمینی تامین این شرایط و نیازها تا حد ممکن به صورت موثر و اقتصادی است. لزوم سادگی، راحتی و اطمینان از ابزارها را نمی‌توان از نظر دور داشت، زیرا ابزارهای زیرزمینی باید تحت شرایط سخت، رطوبتی و خشن عمل نمایند.

۳-۳- پیشینه علمی رفتارنگاری

تولید ابزارهای ژئوتکنیکی به‌عنوان وسیله‌ای برای رسیدن به مشاهدات صحرائی در سال‌های ۱۹۳۰ و ۱۹۴۰ اتفاق افتاد. در ۵۰ سال اول روی کار آمدن این ابزار یک روند عمومی مشاهده می‌شود. در آن سال‌ها بیشتر برنامه‌های ابزاربندی که اجرا می‌شد، در دست مهندسان سخت‌کوشی بوده که دید واضحی از هدف و انگیزه کافی برای توسعه و پیش‌برد برنامه داشتند. (Dunncliff, 1993).

اولین تلاش‌های علمی اوایل دهه ۵۰ میلادی صورت گرفته است. سرآغاز مبانی علمی و عملی آن، سیستم تونل‌سازی اتریشی جدید توسط رابسونیچ بوده که یکی از اصول بنیادی این فلسفه است.

محققینی از جمله راسل^۱ در سال ۱۹۸۱، دانیکیلِف^۲، الناهاس^۳ در سال ۱۹۹۲، بوارد، لکوانت و همکاران در سال ۱۹۸۸، کایزر^۴ در سال ۱۹۹۴، رابنستینر^۵ در سال ۱۹۹۶ و اخیراً پیراود^۶ در سال ۲۰۰۰ در خصوص رفتارنگاری و ابزاربندی تحقیقات گسترده‌ای داشته‌اند (Vardakos, 2007).

در واقع رفتارسنجی مراقبت سازه با مشاهده مستقیم یا با استفاده از تجهیزات خاصی است که به وسیله آن می‌توان رفتار فضای احداثی در سنگ را به طور کمی و کیفی کنترل کرد. نتایج ارزشمند سیستم‌های رفتارسنجی به طور مستقیم در روش تحلیل برگشتی استفاده می‌شود و برای به دست آوردن پارامترهای ژئومکانیکی و تنش‌های وارد بر سنگ به کار می‌رود (شاهوردیلو، ۱۳۸۹).

۳-۴-اساس رفتارنگاری در سازه‌های زیرزمینی و روباز

در حالت کلی در پروژه‌های زیرزمینی رفتارنگاری بر اساس سنجش کرنش و در سازه‌های روباز اساس رفتارنگاری بر مبنای سنجش تنش قرار دارد. این مهم به دلیل آن است که خصوصیات رفتاری در سازه روباز به مشخصات بار وارده (معلوم) و مشخصات سازه (معلوم) بستگی دارد، پس تنش راحت‌تر اندازه‌گیری می‌شود. اما خصوصیات رفتاری در سازه زیرزمینی به مشخصات بار وارده از طرف زمین (مجهول) و مشخصات مصالح میزبان (مجهول و متغیر) بستگی دارد، پس اندازه‌گیری تغییر شکل‌ها یا کرنش‌ها تحت بار وارده برای سازه زیرزمینی آسان‌تر و امکان‌پذیرتر است. در شکل (۳-۱) پارامترهای قابل اندازه‌گیری برای یک سازه روباز (پل) و یک سازه زیرزمینی (تونل)، به صورت شماتیک نشان داده شده است. در شکل (۳-۱) شماتیکی از یک سازه تونل مشاهده می‌شود و همان‌طور که اشاره شد برای رفتارنگاری این سازه‌ها چون مشخصات بارهای وارده و مشخصات مصالح میزبان تونل نامعلوم است. پس

¹ -Russell

² -Dunnicliff

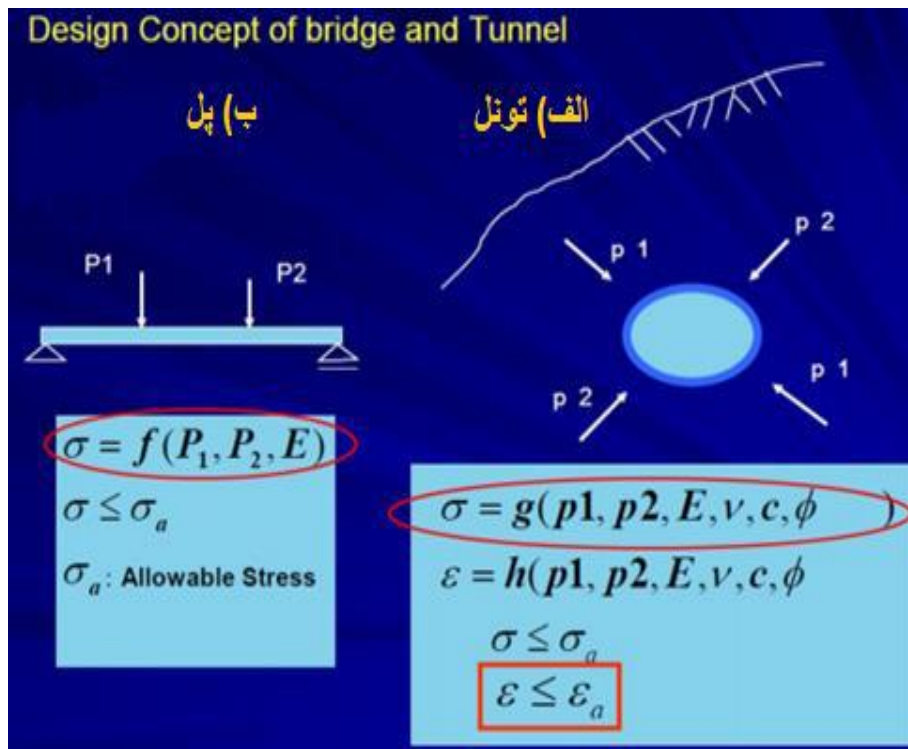
³ -Elena Haas

⁴ -Kaiser

⁵ -Robenestiner

⁶ -Piearoad

اندازه‌گیری جابه‌جایی‌ها و کرنش‌های ناشی از وارد شدن تنش‌ها برای رفتارنگاری آسان‌تر می‌باشد و در شکل (۱-۳) شماتیکی از سازه پل مشاهده می‌شود، برای رفتارنگاری در این سازه‌ها چون هم مشخصات بار وارده و هم مصالح آن معلوم می‌باشد پس برای رفتارنگاری می‌توان به راحتی تنش‌ها را اندازه‌گیری کرد (Sakurai, 2010).



شکل (۱-۳) اساس رفتارنگاری در سازه‌های زیرزمینی و روباز (Sakurai, 2010)

۳-۵- طراحی و انتخاب ابزار

برای انتخاب ابزار مناسب برای سازه‌های احداث شده باید به تعدادی سوال مشخص پاسخ داده شود و اگر هیچ سوالی وجود نداشته باشد کاربرد ابزار دقیق تنها باعث افزایش بی مورد هزینه‌ها خواهد بود. قبل از پرداختن به روش‌های اندازه‌گیری باید لیستی از سوالات ژئوتکنیکی متناسب با سازه تهیه شود. به طور کلی سوالات شامل موارد زیر می‌باشد:

چه کمیتی باید اندازه‌گیری شود؟

آیا رفتار سازه در حین ساخت مناسب می‌باشد؟

چرا باید اندازه‌گیری شود؟

چگونه باید اندازه‌گیری شود؟

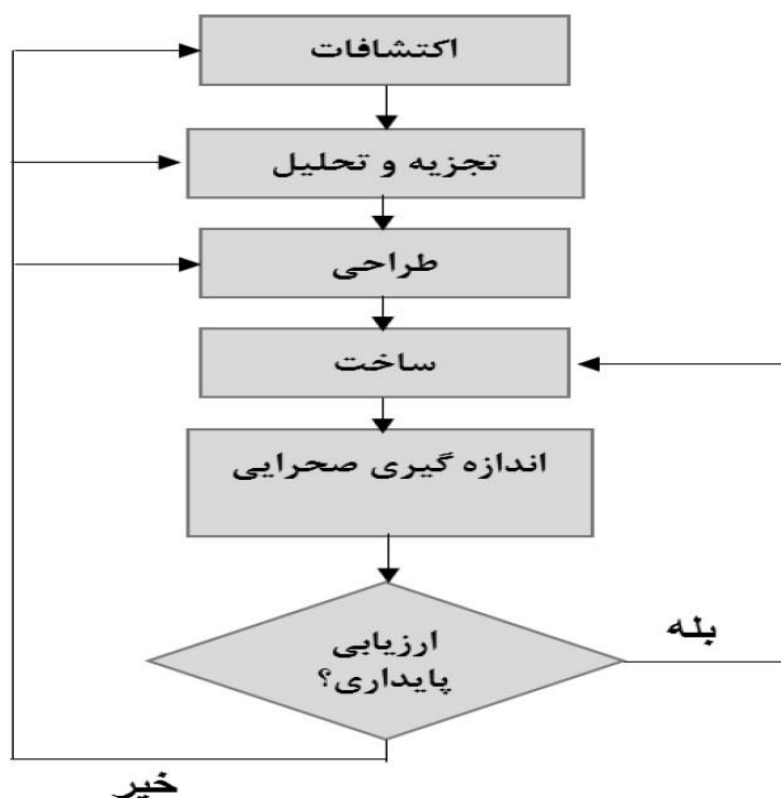
کجا باید اندازه‌گیری شود؟

زمان‌های قرائت چقدر است؟

هزینه سیستم چقدر است؟

هدف از به‌کارگیری ابزار، اندازه‌گیری پارامترهای مشخصی برای شرایط از قبل تعریف شده است. همانطور که بیان شد ابزار نباید استفاده شود مگر با یک دلیل قابل قبول. پارامترهای عمده کنترلی شامل جابه‌جایی، فشار آب منفذی، تنش‌ها و... در اجرا سازه می‌باشند. سوالی که کدام پارامتر کنترلی باید رفتارنگاری و پایش شود، باید پاسخ داده شود. اغلب اندازه‌گیری‌ها مانند فشار، تنش، کرنش و... در یک ناحیه کوچک انجام می‌شوند و بستگی به خواص محلی همانند محیط دارد. بنابراین تعداد زیادی از اندازه‌گیری‌ها مورد نیاز است. با پیش‌بینی‌های ضروری محدوده اندازه‌گیری و دامنه تغییرات ابزار، حساسیت و دقت آن‌ها را می‌توان برآورد کرد.

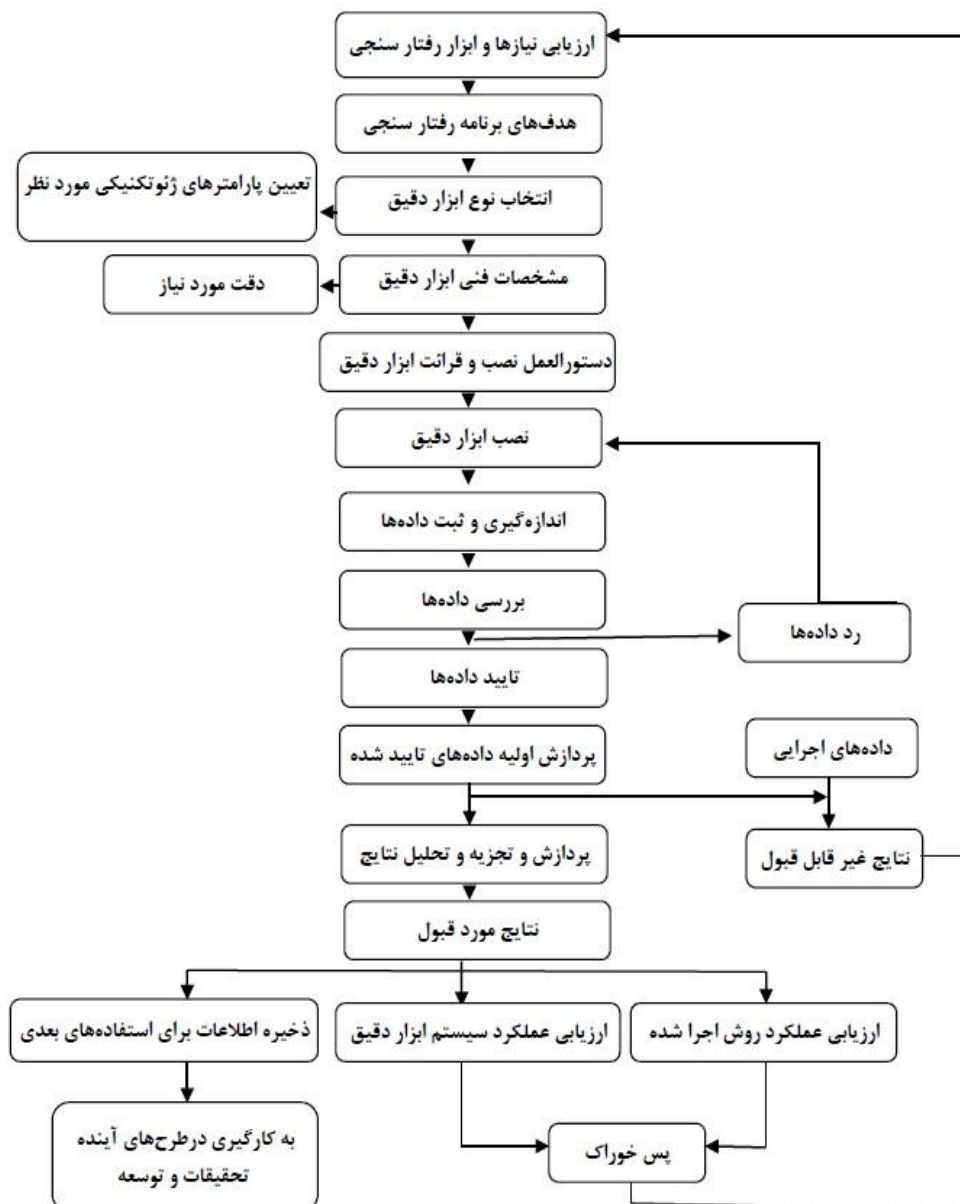
- در هنگام انتخاب ابزار دقیق، قابل اطمینان بودن داده‌های اندازه‌گیری از مهم‌ترین معیارهای انتخاب یک ابزار می‌باشد. برای پارامترهای مهم و حساس نباید از ابزار ارزان استفاده کرد بلکه ملاک انتخاب باید مکانیزم انجام رفتارنگاری توسط ابزار باشد. شکل (۳-۲) مراحل ساخت رفتارنگاری را نشان می‌دهد.



شکل (۲-۳) جایگاه رفتارنگاری در طی مراحل ساخت (Sakurai, 2010)

۳-۶- مراحل کار در رفتارسنجی

در طرح احداث فضاهای زیرزمینی، باید توجه داشت که هر پروژه متناسب با شرایط خاص خود مراحل و نحوه عملیات متفاوتی را دارد اما به طور کلی می‌توان یک فرایند کلی را برای رفتارسنجی به کار برد (مدنی، ۱۳۸۱) روند این مراحل در شکل (۳-۳) نشان داده شده است.



شکل (۳-۳) مراحل کار در رفتارسنجی (مدنی، ۱۳۷۹)

۳-۷- سیستم‌های رفتارسنجی^۱

همان‌طور که پیش‌تر نیز توضیح داده شد، شروع کار استفاده از ابزار دقیق در ژئومکانیک مربوط به دهه ۳۰ میلادی می‌باشد. در واقع هدف از نصب ابزار در سازه‌های مختلف کنترل وضعیت سازه و مشاهده تغییرات پارامترهای مختلف بسته به نوع سازه می‌باشد. یکی از عمده‌ترین نتایج رفتارسنجی،

^۱ -Monitoring System

استفاده از داده‌های مختلف ابزار دقیق برای تحلیل برگشتی و تعیین پارامترهای مدنظر می‌باشد. به طور مثال می‌توان با یک برنامه رفتارسنجی دقیق و استفاده از داده‌های مختلف آن پارامترهای ژئومکانیکی و تنش‌های برجای توده‌سنگ را نیز مشخص کرد. استفاده از این روش می‌تواند به طراحی‌های آینده و بهینه کردن سیستم‌های نگهداری کمک شایانی کند. برای انجام یک رفتارسنجی دقیق شناخت نیازهای مختلف سازه و طراحی، انتخاب و زمانبندی قرائت منظم یک امر الزامی در یک برنامه رفتارنگاری ایده‌آل می‌باشد. همان‌طور که پیش‌تر نیز توضیح داده شد، باید پاسخ دقیقی به سوالات و نیازهای یک طراحی سیستم رفتارنگاری داده شود. انتخاب ابزار نیز باید برمبنای نیازهای مختلف پروژه صورت پذیرد. در جدول (۱-۳) ابزارهای مختلف به همراه کاربرهای آن‌ها نیز آورده شده است. (شاهوردیلو، ۱۳۷۹).

جدول (۱-۳) پارامترهای مورد سنجش در رفتارسنجی (Sakurai, 1993)

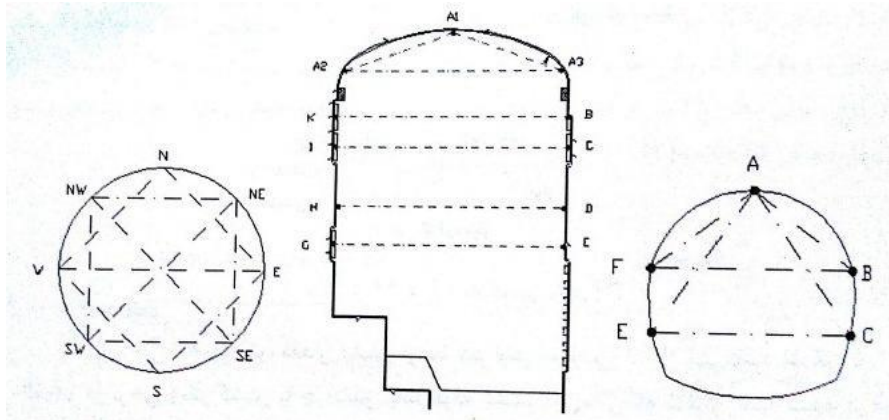
نام ابزار	کاربردها
کرنش‌سنج 	جهت اندازه‌گیری میزان جابه‌جایی در فضاهای زیرزمینی و سیستم نگهداری
درزه‌سنج 	ساختارهای جدا شده مثل ناپیوستگی را کنترل می‌کند مانند حرکت در درزه‌ها و شکستگی‌های زمین‌شناسی و...
انحراف‌سنج 	جهت کنترل حرکت جانبی سدهای خاکی و زمین‌لغزش‌ها، تغییر شکل دیواره سازه‌های زیرزمینی
انبساط‌سنج (کشیدگی سنج) 	نشست در فواصل متوالی را اندازه‌گیری می‌کند.
بارسنج 	جهت اندازه‌گیری بارها در سازه‌های زیرزمینی، سیستم نگهداری و... استفاده می‌شود

سلول فشار		برای ثبت تغییرات تنش در بتن، خاک، خاکریزها، نگهداری سازه‌ها و...
همگرایی سنج		تغییرات فاصله بین دو نقطه را اندازه می‌گیرد.
ترک سنج		برای کنترل حرکت ترک‌ها و درزه‌ها در سطح سازه‌های مختلف
پیزومتر		می‌توان مقدار فشار منفذی را بدست آورد.

۳-۷-۱- همگرایی سنجی^۱

ابزار همگرایی سنج در واقع سیستمی ارزان و بسیار پرکاربرد برای اکثر فضاهای ژئوتکنیکی می‌باشد. اساس کار سیستم همگرایی سنجی در واقع اندازه‌گیری میزان جابه‌جایی‌های نسبی سازه‌ها است. در فضاهای زیرزمینی از این سیستم بسیار زیاد استفاده می‌شود. همگرایی سنج شامل دو قسمت اصلی پین‌های همگرایی و همگرایی سنجی است. بسته به نوع سازه احداث شده از این سیستم به صورت سه نقطه‌ای یا پنج نقطه‌ای استفاده می‌شود (احمدی و شاهوردیلو، ۱۳۸۹). در شکل (۳-۴) انواع موارد استفاده ابزار همگرایی سنجی آورده شده است.

^۱-Convergence



شکل (۳-۴) انواع مقطع‌های همگرایی سنجی، تونل (راست)، مغار (وسط) و چاه (چپ)

۳-۷-۲- کشیدگی سنج^۱

این سیستم در واقع برای اندازه‌گیری میزان جابه‌جایی‌های رخ داده در یک سازه ژئوتکنیکی به کار می‌رود. بسته به نوع فعالیت به انواع تک‌نقطه‌ای^۲ و چند نقطه‌ای^۳ تقسیم می‌شوند.

دو نوع کاربرد این ابزار شامل کشیدگی سنج گمانه‌ای^۴ و کشیدگی سنج مدفون^۵ تقسیم‌بندی می‌شوند (احمدی و شاهوردیلو، ۱۳۸۹).

^۱ -Extensometer Tape

^۲ -Single point

^۳ -Multi-point

^۴ -Borehole Extensometer

^۵ -Embedded extensometer



شکل (۳-۵) اجزای تشکیل دهنده کشیدگی سنج گمانه‌ای و چندنقطه‌ای

۳-۷-۳- بارسنج^۱

بارسنج ابزاری برای ثبت نیروهای سازه‌ای است که ساختمانی شبیه سلول دارد و طوری نصب می‌شود که نیروهای سازه‌ای از سلول آن عبور نماید. از مهمترین زمینه‌های کاربرد بارسنج می‌توان به آزمایش‌های بارگذاری ستون‌ها، پیچ‌سنگ‌ها^۲ و رفتارنگاری بلند مدت مهاری‌های گیردار اشاره نمود. از بارسنج هم‌چنین برای اندازه‌گیری بارهای موقت و دائمی مهاری‌های کابلی در نگهداری فضاهای زیرزمینی استفاده می‌شود.

^۱ -Load cell

^۲ -Rock bolt



شکل (۳-۶) نمونه‌ای از بارسنج استفاده شده در تونل البرز

فصل چهارم

تحلیل برگشتی

طراحی سازه در سنگ و خاک به دو طریق انجام می‌گیرد که در عملکرد باهم تفاوت دارند. در روش اول اطلاعات تجربی به دست آمده از آزمایش‌های صحرایی و آزمایش‌های انجام شده در آزمایشگاه به عنوان ویژگی‌های ژئومکانیکی در نظر گرفته می‌شود و سپس براساس این اطلاعات شروع به ساختن سازه می‌کنند. این روش از نظر زمانی برای به‌دست‌آوردن پارامترهای مکانیکی سنگ یا خاک دارای محدودیت است. از این رو فرض می‌شود که بعد از طراحی، سنگ همان رفتاری را که در آزمایش‌ها نشان داده، از خود بروز می‌دهد و رفتار سنگ یا 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 سنگ در طراحی دیده شود، تغییری در طرح داده نمی‌شود. به این نوع طرح‌ریزی، طراحی صلب می‌گویند. در این روش هیچ هم-فکری بین اجراکننده قرارداد، مشاور و طراح پروژه وجود ندارد. با توجه به محدود بودن اطلاعات به-دست‌آمده از آزمایش‌های برجا و آزمایش‌های انجام شده در آزمایشگاه ممکن است در حین انجام پروژه مشکلات پیش‌بینی‌نشده‌ای به وجود بیاید. برای جلوگیری از این مسئله طراحان ممکن است راه‌حلهایی در پیش بگیرند که می‌توان به روش‌های زیر دسته‌بندی شوند (Sakurai, 1984).

- یک فاکتور اطمینان 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 باشند.

روش اولی باعث می‌شود که طرح از نظر اقتصادی دچار مشکل شود و روش دوم نیز غیرمطمئن می‌باشد. پس برای حل این مسائل باید چه اقدامی را در نظر گرفت؟ در حقیقت جزییات زمین‌شناسی به راحتی می‌توانند روی رفتار سنگی که نوع رفتار آن پیش‌بینی شده بود، تاثیر 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 و پک (۱۹۴۸) معرفی گردید. این راه‌حل به روش مشاهده‌ای معروف گردید که در

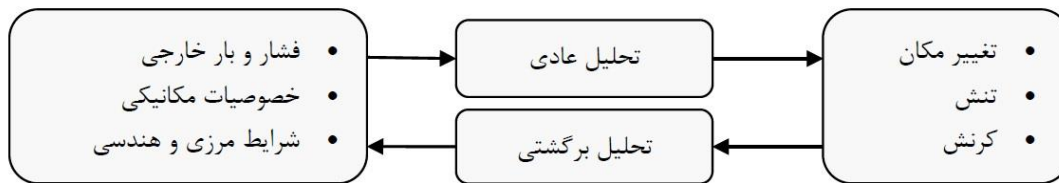
کارهای عظیم ژئوتکنیک و ساخت سدها و تونل‌ها کاربرد دارد. این کار نیاز به همکاری نزدیک مشاور و اجراکننده طرح دارد و باید سیستم اندازه‌گیری در سازه برپا گردد. حال می‌توان با توجه به نصب این دستگاه‌ها، رفتار سنگ یا خاک را در حین ساخت سازه و بعد از آن مشاهده کرد. می‌توان اطلاعات به دست آورده آمده در حین ساخت را با داده‌های به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها مقایسه کرد و هر نوع تفاوتی بین آن‌ها را تشخیص داد و پارامترهای مربوط به سنگ یا خاک را با توجه به این اختلافات تصحیح کرد. این امر باعث می‌شود که اندازه‌گیری و برداشت جدید از سنگ و یا خاک به دست آید. این نوع روش طراحی را روش انعطاف‌پذیر می‌نامند (Sakurai, 2017).

۴-۲- تحلیل برگشتی و تحلیل معمولی

در تحلیل‌های برگشتی، داده‌های ورودی در واقع مقادیر اندازه‌گیری شده توسط سیستم‌های رفتارنگاری مانند جابه‌جایی‌ها، تنش‌ها، فشارها و تغییرشکل‌ها می‌باشند. این درحالی است که پارامترهای خروجی معادل این روش، پارامترهای ژئومکانیکی شامل مدول الاستیسیته، نسبت پواسون، پارامترهای مقاومتی توده‌سنگ و تنش‌های برجا می‌باشد. این روش تجزیه و تحلیل در واقع کاملاً یک محاسبه معکوس از یک تجزیه و تحلیل عادی است، به‌طوری‌که آن را تجزیه و تحلیل برگشتی می‌نامند، در حالی‌که تحلیل‌های عادی را در واقع تجزیه و تحلیل رو به جلو می‌نامند. در طراحی سازه‌های سنگی و خاکی، تحلیل عادی برای محاسبه تنش‌ها، کرنش‌ها و تغییرمکان‌های توده‌سنگ انجام می‌شود. برای این نوع از تحلیل‌ها نیاز به داده‌های ورودی بسیار مانند پارامترهای ژئومکانیکی، وضعیت تنش‌های منطقه، نسبت پواسون و پارامترهای مقاومتی توده‌سنگ است.

از طرف دیگر، در تحلیل برگشتی، داده‌های ورودی نتایج اندازه‌گیری‌های مشاهده‌ای شامل فشار، تنش، جابه‌جایی و تغییرشکل‌های به‌وجود آمده در فضای مورد مطالعه است. در تحلیل برگشتی نتایج خروجی-های حاصل پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ و تنش‌های برجا می‌باشد. بدیهی است که، نتایج خروجی تحلیل برگشتی در واقع پارامترهای ورودی یک سیستم تحلیل عادی است. بنابراین به نظر می‌رسد که

تحلیل‌های برگشتی کاملاً یک محاسبه معکوس از تحلیل‌های عادی است. مقایسه روش تحلیل برگشتی و تحلیل عادی در شکل (۴-۱) مشخص شده است (Sakurai, 2017).



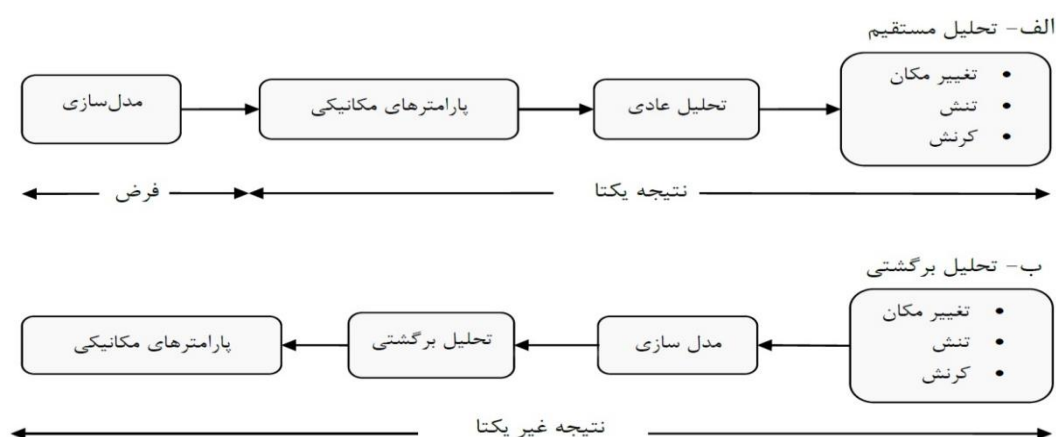
شکل (۴-۱) ارتباط تحلیل و معمولی و تحلیل برگشتی (Sakurai, 1993)

در تحلیل‌های عادی، ابتدا مدل مکانیکی توده‌سنگ‌ها مانند الاستیک، الاستوپلاستیک و یا هر مدل مدنظری ابتدا فرض می‌شود و پارامترهای آن مدل در آزمون‌های برجا تعیین می‌شود. پس از تعیین تمام پارامترهای ژئومکانیکی، می‌توان جابه‌جایی، کرنش و تنش‌های سنگ را به عنوان نتایج تحلیل عادی محاسبه کرد. این روش محاسبه یک رابطه یک به یک بین داده‌های ورودی و نتایج خروجی را فراهم می‌سازد. زیرا مدل‌سازی (فرض) قبل از تعیین داده‌های ورودی انجام می‌شود. همان‌طور که در شکل (۴-۲) نیز مشخص شده است، در تحلیل عادی بسیار مهم است که یک مدل رفتاری مناسب را برای توده‌های سنگ در نظر گرفت. از طرف دیگر در تحلیل برگشتی ابتدا داده‌های اندازه‌گیری برجا در حین ساخت به دست می‌آید. بدیهی است که پارامترهای ژئومکانیکی تعیین شده در تحلیل برگشتی کاملاً وابسته به مدل ژئومکانیکی خواهند بود. به عنوان مثال، اگر یک مدل الاستیک فرض شود، می‌توان مدول الاستیسیته را تعیین کرد. این بدان معناست که در تحلیل برگشتی نتایج به صورت یک به یک ظاهر نمی‌شوند ولی در تحلیل‌های عادی می‌توان به نتایج یکتایی دست یافت.

اکنون می‌توان نتیجه گرفت که تحلیل برگشتی صرفاً محاسبه معکوس تحلیل عادی نیست. مفهوم آن باید با تحلیل عادی متفاوت باشد به گونه‌ای که در تحلیل برگشتی باید مدل ژئومکانیکی را شناسایی کرد و پس از آن پارامترهای ژئومکانیکی را تخمین زد.

مدل ژئومکانیکی توده‌سنگ‌ها در طراحی سازه با روش تحلیل برگشتی ابتدا فرض می‌شود و سپس پارامترهای ژئومکانیکی تعیین می‌شوند. تحلیل برگشتی در واقع یک مسئله غیرخطی را با استفاده از فرضیات ساده شده حل می‌کند. در سال‌های اخیر این روش به یک راه‌حل پایدار از نقطه نظر ریاضی رسیده است (Sakurai, 2017).

تفاوت بین تحلیل برگشتی و معمولی در شکل (۴-۲) نمایش داده شده‌است. در این شکل دیده می‌شود که در تحلیل معمولی، به دست آمدن نتایج واحد حتمی است و این حتی در حالتی که رفتار واقعی سنگ و مدل یکسان نیستند نیز اتفاق خواهد افتاد، اما در مورد تحلیل برگشتی واحد بود نتایج حتمی نیست و این به آن علت است که مدل پس از جمع‌آوری اطلاعات ورودی در نظر گرفته می‌شود. برای بدست آوردن نتایج واحد از یک تحلیل برگشتی باید دقت زیادی اعمال شود تا مدل انتخاب شده نماینده رفتار واقعی محیط باشد.

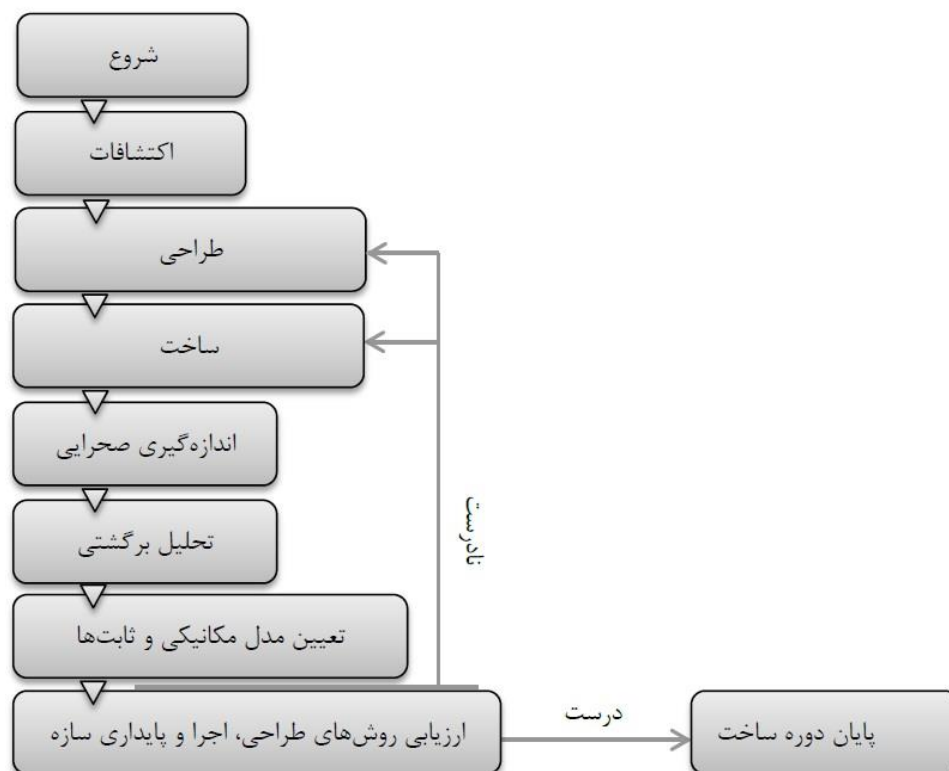


شکل (۴-۲) مقایسه بین تحلیل عادی و تحلیل برگشتی (Sakurai, 1993)

در تحلیل‌های عادی می‌توان از هر برنامه پیچیده رایانه‌ای استفاده کرد و مهم نیست که به چه مقدار داده ورودی نیاز است، البته به شرطی که همه داده‌ها را با آزمایش‌های برجا تعیین کرد. در حالی که در تحلیل برگشتی تنها تعداد محدودی از داده‌ها را می‌توان پیش‌بینی کرد. برای غلبه بر این مشکلات یک معادله اساسی از توده‌سنگ که در تحلیل برگشتی استفاده می‌شود، باید به اندازه کافی ساده باشد تا بتواند پارامترهای ژئومکانیکی معادله را از تعداد محدودی از داده‌های اندازه‌گیری شده میدانی دوباره محاسبه کند.

علاوه‌براین باید تاکید کرد، یکی از اهداف مهم اندازه‌گیری‌های میدانی در واقع نظارت بر وضعیت موجود سازه‌ها و پایداری آن‌ها است (Sakurai, 2017).

در شکل (۳-۴) مراحل طراحی و ساخت یک سازه نشان داده شده است.



شکل (۳-۴) مراحل طراحی و اجرا یک ساختار در روش مشاهده‌ای (Sakurai, 1993)

۴-۳- انواع روش‌های تحلیل برگشتی

یکی از عمده‌ترین مشکلات در تحلیل برگشتی رویکردهای مختلفی است که در طی مراحل مختلف کار به وجود می‌آید. این مشکلات را می‌توان با روش‌های معکوس و مستقیم معمولاً حل کرد (Cividini, et al, 1981). در روش معکوس، فرمول‌بندی به صورت معکوس روابط تحلیل عادی انجام می‌شود. از سوی دیگر در روش مستقیم، معادلات بر اساس روش‌های بهینه‌سازی و تکرار استوار است، به گونه‌ای که این مقادیر را با تکرار به حدی اصلاح کند که اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسبه شده به حداقل برسد. در هر دو روش معکوس و مستقیم، تعداد مقادیر اندازه‌گیری شده باید بیشتر از تعداد مقادیر ناشناخته باشد، در غیراین صورت نتایج را نمی‌توان به طور منحصر به فردی تعیین کرد. با این حال، تعیین دقیق این مقادیر اغلب به دلیل عدم قطعیت‌های مختلفی که معمولاً در حل مسائل مهندسی سنگ دخیل هستند، دشوار است. برای غلبه بر این مشکل، روش احتمالاتی نیز پیشنهاد می‌شود. یکی از مزیت‌های مهم این روش این است که نتایج نهایی از نظر آماری مانند میانگین و واریانس بیان می‌شوند (Sakurai, 2017).

۴-۳-۱- تحلیل برگشتی معکوس

در روش معکوس نیاز به یک فرمول‌بندی پیچیده ریاضی نیست. در این روش یک فرمول ریاضی به روش معکوس برای تحلیل تنش عادی به کار برده می‌شود. اصل و پایه این روش بر مبنای مواد الاستیک خطی بیان می‌شود. به طور مثال یک روش تحلیل برگشتی معکوس در فعالیت‌های ژئومکانیکی آزمایش بارگذاری صفحه‌ای است که در آن یک جابه‌جایی تحت نیروی خارجی اندازه‌گیری می‌شود. سپس می‌توان مدول یانگ را نیز تعیین کرد. در واقع در این روش از فرمول معکوس تحلیل تنش عادی استفاده شده است. علاوه بر این، باید توجه داشت که تعداد آزمایش‌های برجا باید بیشتر از تعداد پارامترهای مجهول باشد تا این که در دستگاه معادلات، تعداد مجهولات کمتر از تعداد معادلات شوند. مشکل عمده در روش معکوس، دستیابی به یک راه‌حل پایدار از لحاظ عددی برای مقادیر شدیداً پراکنده

اندازه‌گیری شده (که در مسائل مهندسی سنگ و خاک امری عادی است) می‌باشد. همچنین در صورت به کارگیری این روش در مسائل غیرخطی مشکلاتی بروز می‌نماید (Sakurai, 2003).

این روش به دلیل عدم نیاز به تکرار و در نتیجه کاهش زمان محاسبه، در کاربردهای مهندسی جایگاه ویژه‌ای پیدا نموده است. از آنجایی 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، دارد (Zhifa, 2000).

- تحلیل برگشتی ثابت‌های الاستیک مبتنی بر اجزاء محدود: این روش مبتنی بر روش اجزاء محدود پیشنهادی کاواناگ برای تحلیل برگشتی مدول الاستیک است و از الگوریتم حداقل مربعات برای تعیین مقدار بهینه پارامترهای مجهول استفاده می‌کند. با داشتن جابه‌جایی و معادلات و منحنی‌های به دست آمده می‌توان ماتریس سختی و سپس مدول بالک را محاسبه نمود.

- تعیین خواص مکانیکی توده‌های سنگی درزه‌دار با تحلیل برگشتی: اساس این روش که توسط تسوشیاما^۱ ارائه شده است، مطابق تئوری مکانیک شکست می‌باشد. در این روش ابتدا تانسور شکست برای توده‌سنگ درزه‌دار تعیین می‌شود. این روش، رفتار سنگ را الاستیک خطی و محیط را ایزوتروپ فرض می‌کند. مدول الاستیسیته و نسبت پواسون معلوم فرض می‌شود. این روش برای توده‌سنگ‌های درزه‌دار مناسب می‌باشد و با تحلیل برگشتی جابه‌جایی‌ها و بارهای اندازه‌گیری شده، خواص مکانیکی توده‌سنگ درزه‌دار به دست می‌آید. این روش مناسب فضاهایی است که در چند مرحله حفر می‌شوند. می‌توان جابه‌جایی‌ها و عکس‌العمل توده‌سنگ را در مراحل بعدی پیش‌بینی نمود (Kaiser, 1998).

¹ -Tsuchiama

- تعیین مقاومت توده سنگ و شعاع ناحیه پلاستیک با استفاده از داده‌های همگرایی: با توجه به این که اگر سنگ حالت الاستیک داشته باشد همگرایی در فاصله ۲ یا ۳ برابر قطر فضای زیرزمینی، از سینه کار منظور می‌گردد و اگر رفتار سنگ پلاستیک باشد این فاصله ۳ تا ۱۰ برابر قطر فضای زیرزمینی افزایش می‌یابد، با استفاده از داده‌های همگرایی سنج، منحنی‌های جابه‌جایی برحسب فاصله از سینه کار رسم می‌شود (Tanimoto & Fujiwara, 1998). با استفاده از این منحنی می‌توان شعاع ناحیه پلاستیک را با تقریب خوبی به دست آورد. همچنین با معلوم بودن مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ و زاویه اصطکاک داخلی، مقاومت نهایی توده سنگ با استفاده از معیار هوک و براون^۱ قابل ارزیابی است. در نتیجه در این روش داده‌های ورودی، همگرایی اندازه‌گیری شده، مقاومت تک‌محوری و زاویه اصطکاک داخلی سنگ بوده و هدف به دست آوردن شعاع ناحیه پلاستیک، مقاومت نهایی توده سنگ در نقطه شکست و بار وارد شده به سیستم نگهدارنده می‌باشد.

تحلیل برگشتی تنش‌های اولیه مبتنی بر اجزاء محدود (sakurai, 1993)، تحلیل برگشتی فشار زمین^۲ (قدیری، ۱۳۸۹)، تعیین چگونگی توزیع فشار روی سیستم نگهداری فضای زیرزمینی با استفاده از تحلیل برگشتی (Gioda, 1985) نیز جزء روش‌های تحلیل برگشتی معکوس هستند.

۴-۳-۲- تحلیل برگشتی مستقیم

فرمول‌بندی به کار رفته در روش مستقیم در واقع همانند تحلیل تنش عادی است. اساس روش تحلیل برگشتی به روش مستقیم بر مبنای بهینه‌سازی با استفاده از تکرار استوار است. در این حالت مسئله تحلیل برگشتی با استفاده از یک رابطه کمینه‌سازی طوری حل می‌شود که مقادیر آزمایشی

^۱ Hoek-Brown Criteria

^۲ -Earth Pressure

پارامترهای مجهول در الگوریتم تحلیل تنش، منجر به حداقل شدن اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسبه شده، می‌شود. مزایای این روش عبارتند از (Sigh, Bhawani, Goel , Rajnish , 2006):

آن را می‌توان بدون نیاز به اطلاع از ریاضیات پیچیده برای مسائل غیرخطی به کار برد.

الگوریتم‌های استاندارد برنامه‌سازی مانند سیمپلکس^۱ و روزنبرگ^۲ برای آن قابل کاربرد است.

قابلیت استفاده سریع از آن برای زمانی که داده‌های فراوانی احتیاج است، فراهم می‌آورد.

- روش سیمپلکس (چندضلعی انعطاف‌پذیر): 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 چندضلعی 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 مربوط 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 چندضلعی منجر شود و یا فرایند حداقل نمودن قطع گردد (اعصاری، ۱۳۸۴).

- 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 برهم کنش اندکی بین متغیرها وجود داشته باشد. تابع خطا تقریباً به موازات یک محور، گودی نشان می‌دهد. این امر مبنای روش روزنبرگ را مشخص می‌کند که در آن کاهش خطا براساس حرکت در راستای

¹ - Simplex

² - Rosenbrock

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).

- روش پاول^۱: 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 حداقل-سازی به طور خودکار به مسیر بهینه در ناحیه محتمل باز می‌گردد (Gioda, 1985).
- تحلیل برگشتی مستقیم با به کارگیری روش بهینه‌سازی: یکی از روش‌های پیشنهاد شده برای تحلیل برگشتی روش جستجوی مستقیم می‌باشد. روش جستجوی مستقیم، روش بهینه‌سازی بدون محدودیت می‌باشد (Joan, Yang, 2004).
- از میان روش‌های بهینه‌سازی موجود که در روش جستجو مستقیم به کار می‌رود روش تک-متغیره، تک‌متغیره جایگزین و روش جستجوی الگویی می‌باشد. با بررسی‌های انجام شده مشخص گردیده است، روش تک‌متغیره و روش تک‌متغیره 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 (Joan, Yang, 2004).

در روش مستقیم، استفاده از یک تابع خطا مانند معادله (۴-۱) برای به حداقل رساندن اختلاف بین داده‌های اندازه‌گیری شده و مقادیر ارزیابی عددی مرسوم است.

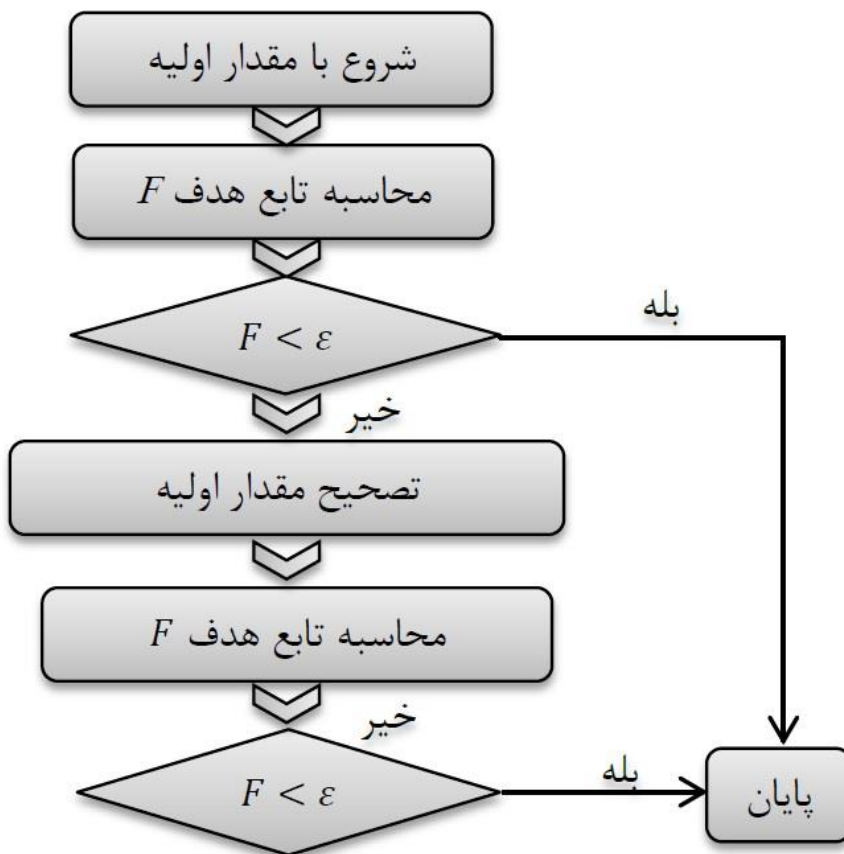
$$Error = \frac{\sum_{i=1}^N [u_i - u_i^*]^2}{\sum_{i=1}^N u_i^*} \quad (۴-۱)$$

¹ -Powell

در معادله بالا u_i^* و u_i به ترتیب مقادیر اندازه‌گیری شده و مقدار محاسبه شده در نقطه I می‌باشند. N تعداد نقاط اندازه‌گیری شده می‌باشد. شکل (۴-۴) روند کلی روش بهینه‌سازی تکرار را نمایش می‌دهد. مقدار اولیه که برای پارامتر مجهول X_i به کار می‌رود، مقداری است که معمولاً برای تحلیل معمولی به کار می‌رود. 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 زیر ارائه نمودند.

$$X_{i+1} = X_i + \lambda_i^* \cdot S_I \quad (۲-۴)$$

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



شکل (۴-۴) طرح کلی روش بهینه‌سازی تکرار (Jeon, Yang, 2004).

۴-۴- تحلیل برگشتی آماری

هر دو روش مستقیم و معکوس تحلیل برگشتی بر اساس اندازه‌گیری‌های آماری ارائه شدند، با این حال این اندازه‌گیری‌ها بسیار دشوار هستند زیرا مسائل مهندسی سنگ شامل مقادیر مختلف غیر قطعی می‌باشند. برای غلبه بر این مشکل، یک رویکرد احتمالاتی برای جلوگیری از این عدم قطعیت‌ها ارائه شده است. ویژگی مناسب این رویکرد این است که نتایج نهایی را به صورت آماری مانند میانگین و واریانس بیان می‌کند.

اطلاعات اندازه‌گیری‌های برجا به طور معمول تحت تاثیر خطاهای مختلف نظیر ماهیت مقادیر اندازه‌گیری شده مانند شرایط زمین‌شناسی، دستگاه‌های اندازه‌گیری مختلف و... هستند. به منظور ارزیابی تاثیر این خطاها بر روی پارامترهای مکانیکی محاسبه شده با تحلیل برگشتی، روش‌های مختلفی

ارائه شده است. بر این اساس، یک تکنیک شبیه‌سازی مانند مونت‌کارلو^۱ می‌تواند به راحتی برای این منظور استفاده شود. این تکنیک بسیار ساده است ولی نیازمند یک تلاش محاسباتی می‌باشد که با افزایش تعداد پارامترهای ناشناخته به سرعت افزایش می‌یابد. یک روش دیگر نیز روش بیزین^۲ می‌باشد. یک ویژگی معمول از رویکرد بیزین این است که می‌توان اطلاعات پیشین در مورد پارامترهای ناشناخته را در تحلیل برگشتی به همراه داده‌های حاصل از اندازه‌گیری‌های برجا معرفی کرد. در اکثر موارد، اطلاعات پیشین شامل تخمین پارامترهای ناشناخته براساس قضاوت مهندسی یا اطلاعات کلی در دسترس است. این منجر به یک روش کالیبراسیون^۳ عددی می‌شود که دانش ناشی از مشکلات مشابه قبلی را با نتایج تحقیقات برجا تلفیق می‌کند (Sakurai, 2017).

۴-۵- تحلیل برگشتی هوشمند^۴

همان‌طور که گفته شد، در روش‌های مختلف تحلیل برگشتی مستقیم، هدف نهایی تنظیم مقادیر ورودی روش‌های عددی (پارامترهای ژئومکانیکی) است، به نحوی که مقادیر خروجی حاصل (جابه‌جایی)، مطابقت قابل قبولی با جابه‌جایی‌های ثبت شده در رفتارسنجی داشته باشند.

از سال ۱۹۹۱ با کارهایی که لی و هائو^۵ در زمینه هوش مصنوعی انجام دادند، تحلیل برگشتی هوشمند به وجود آمد (Li, Shihui, Et al, 2002). همان‌طور که پیش‌تر نیز توضیح داده شد، توده‌سنگ دارای سیستم‌های غیرخطی بسیار پیچیده‌ای است که این پیچیدگی مربوط به شرایط ناهمسانگردی زمین می‌باشد. به منظور حل این مشکل، فنگ و همکاران در سال ۲۰۰۰ یک روش جدید را برای انجام

¹ -Mont-Carlo

² -Beyesin

³ -Calibration

⁴ -Intelligent Back Analysis

⁵ -Li & Shihui

تحلیل برگشتی هوشمند و به منظور تعیین پارامترهای ژئومکانیکی زمین با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی در نظر گرفتند.

در تحلیل برگشتی هوشمند، الگوریتم‌های بهینه‌ساز تکاملی به دلیل سرعت و دقت بالا جایگزین روش‌های بهینه‌سازی رایج برای تحلیل برگشتی مستقیم شده‌اند. با توجه به نحوه عملکرد الگوریتم‌های تکاملی برای بهینه‌سازی تابع هدف و لزوم محاسبه لحظه به لحظه تابع هدف، استفاده از نرم‌افزارهای طراحی شده بر مبنای روش‌های عددی در این روش‌ها غیرممکن می‌باشد. بنابراین مقدار تابع هدف مستقیماً توسط معادلات حاکم بر روش‌های عددی محاسبه می‌شود (Eclaircy- Miranda, Dias, 2006). Shang, Caudron, Correia, Costa, 2011. Shang, Cai, Hao, Wu, Li, 2002. Li, Yang, Hao, 2006).

برخی از کاربردهای الگوریتم‌های تکاملی به همراه نوع سیستم هوشمند در جدول (۴-۱) آورده شده است.

جدول (۴-۱) چند مورد از کاربرد الگوریتم‌های تکاملی همراه با محاسبه مستقیم تابع هدف توسط معادلات

حاکم بر روش‌های عددی برای تحلیل برگشتی

موضوع	پارامتر خروجی	ارائه دهنده و سال ارائه
تحلیل برگشتی هوشمند جابه‌جایی‌ها برای تونل‌سازی	E,K	Shang, Cai, Hao, Wu, Li, 2002
تحلیل برگشتی پارامترهای ژئومکانیکی به وسیله بهینه‌سازی مدل ۳ بعدی یک سازه زیرزمینی	E,k	Miranda, Dias, Eclaircy- Caudron, Correia, Costa, 2011
تحلیل برگشتی هوشمند جابه‌جایی‌های ثبت شده در تونل‌سازی	E, λ	Shang, Cai, Hai, Wu, Li , 2002

با توجه به دشوار و تخصصی بودن محاسبه مقدار تابع هدف مستقیماً توسط معادلات حاکم بر روش‌های عددی، اخیراً در روش‌های تحلیل برگشتی هوشمند سیستم‌های فازی و شبکه عصبی جایگزین محاسبه مستقیم تابع هدف توسط معادلات حاکم بر روش‌های عددی شده‌اند. برای آموزش سیستم‌های فازی و شبکه‌های عصبی از زوج‌داده‌های تولید شده توسط نرم‌افزارهای عددی با توجه به اطلاعات جمع‌آوری شده در منطقه مورد بررسی، استفاده می‌شود. سیستم‌های فازی و شبکه‌های عصبی بعد از یافتن رابطه غیرخطی موجود بین مقادیر ورودی روش‌های عددی (پارامترهای ژئومکانیکی) و مقادیر خروجی حاصل (جاب‌جایی)، می‌توانند لحظه به لحظه تابع هدف را محاسبه نموده و مقادیر حاصل را برای بهینه‌سازی تابع هدف در اختیار الگوریتم‌های تکاملی قرار دهند (Zhao, Yin, 2009. Hon, 2010. Jiang, Lee, Akutagawa, Yokota, 2008. Yu, Zhang, Yuan, 2007. Yang, Wu, Wang, Tang, 2011. Wang, Li, Shen, 2007).

برخی از کاربردهای روش‌های شبکه عصبی و الگوریتم‌های فازی برای تحلیل برگشتی در جدول (۲-۴) آورده شده است.

جدول (۲-۴) چند مورد از کاربرد الگوریتم‌های تکاملی همراه با محاسبه تابع هدف توسط سیستم‌های

فازی و شبکه‌های عصبی برای تحلیل برگشتی

موضوع	پارامتر خروجی	ارائه دهنده و سال ارائه
تحلیل برگشتی رفتار خطی و غیرخطی خاک تونل‌های کم-عمق با شبکه‌های عصبی	E,K	Lee, Akutagawa, Yokota, 2008
اصلاح پارامترهای خاک برای محاسبه نشست سد خاکی با شبکه‌های عصبی	E,G	Wang, Li, Shen, 2007
تعیین پارامترهای ژئومکانیکی توسط PSO, SVM	E,k	Zhao, Yin, 2009

به منظور تعیین دقیق پارامترهای ژئومکانیکی در منطقه مورد مطالعه نیاز است که داده‌های زیادی در تحلیل برگشتی استفاده شود. در این صورت، طبق نظر لی که این روش را با سایر روش‌های تحلیل برگشتی مقایسه نموده، 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

۴-۵-۱- الگوریتم بهینه‌سازی تجمعی ذرات^۱

الگوریتم بهینه‌سازی تجمعی ذرات در سال ۱۹۹۵ توسط دکتر جیمز کندی^۲ و دکتر راسل ابرهارت^۳ ارائه شد. اساس کار این الگوریتم در واقع مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی^۴، الگوریتم ژنتیک^۵ و بسیاری روش‌های دیگر از سیستم‌های زیستی جانوران الهام گرفته شده است. این الگوریتم در واقع براساس حرکات جمعی جانوران مانند پرندگان یا ماهی‌ها بنیان‌گذاری شده است (Yegiz, 2011).

این الگوریتم یک روش محاسبات تکاملی برای حل یک مسئله بهینه‌سازی پیوسته با یک روش غیرخطی است (Xiaohui, 2006 & Kennedy, 1995). ایده‌ی کلیدی در گروه پرندگان یا ماهی‌ها این است که، هر عضو از دسته می‌تواند از کشفیات و تجربیات قبلی تمام اعضای گروه در جریان جستجوی غذا بهره‌مند گردد. اگر منبع به طور غیرقابل پیش‌بینی در مسیرها توزیع شده باشد، این اشتراک اطلاعات توسط دسته‌ی پرندگان یا ماهی‌ها یک مزیت بسیار مهم می‌باشد. علاوه‌براین، پرندگان با

¹ - Particle Swarm Optimization (PSO)

² - Kennedy

³ -Eberhart

⁴ -Artificial Neural Networks (ANN)

⁵ -Genetic Algorithm (GA)

یکدیگر ارتباط دارند و قادرند پرنده‌ای را که در بهترین موقعیت قرار دارد، تشخیص دهند (Yegiz, 2011).

هر پرنده در الگوریتم PSO به عنوان یک ذره نامیده می‌شود و هر جواب مسئله، موقعیت این ذره در فضای جستجو است. تمام ذره‌ها دارای یک مقدار شایستگی هستند که توسط تابع شایستگی^۱ تعیین می‌شود. پرنده‌ای به غذا نزدیکتر است که شایستگی بیشتری داشته باشد. همچنین هر ذره سرعتی دارد که مسیر حرکت آن را به سوی ذره‌ی بهینه‌ی فعلی هدایت می‌کند. جمعیت تولید شده توسط این ذرات یک تجمع^۲ را ایجاد می‌کند. هدف از این الگوریتم بهینه کردن تابع شایستگی است (Yegiz, 2011).

این الگوریتم برای حل مسائل مختلفی در مهندسی کاربرد دارد. توانایی این الگوریتم در حل مسائل پیچیده که چندین جواب بهینه دارند، مناسب است. یکی از مزیت‌های این روش حل معادلاتی است که در روش‌های دیگر قابل حل نیست یا جواب مناسبی به سیستم نمی‌دهد. از دیگر کاربردهای این الگوریتم حل انواع مسائل بهینه‌سازی و همچنین مدل‌سازی است. از مزیت‌های مهم این روش نسبت به سایر روش‌های مشابه وجود جریان متداول اطلاعات بین اجزای مختلف الگوریتم است. (Clerc & Kennedy, 2002).

۴-۵-۱-۱- طرز کار الگوریتم بهینه‌سازی تجمع ذرات (PSO)

الگوریتم تجمع ذرات یک روش مبتنی بر حرکت جمعی ذرات است. در این تکنیک، هر ذره به تدریج در فضای جستجو حرکت می‌کند و اطلاعات را با سایر ذرات مبادله می‌کند. بعد فضای جستجو برابر با تعداد متغیرهای نامشخص مسئله است. در این فضای جستجو ذرات براساس بهترین موقعیت

¹ -Fitness Function

² -Swarm

تجربه شده‌ی شخصی خودشان و بهترین موقعیت تجربه شده در کل گروه به سمت موقعیت جدید حرکت می‌کنند. قانون به روز کردن سرعت و موقعیت به ترتیب توسط روابط (۳-۴) و (۴-۴) بیان شده است.

$$v_{p.d}^{K+1} = \omega v_{p.d}^K + c_1 r_1 (x_{p.d}^{ind} - x_{p.d}^k) + c_2 r_2 ((x_d^{glo} - x_{p.d}^k)) \quad (3-4)$$

$$x_{p.d}^{k+1} = x_{p.d}^k + v_{p.d}^{K+1} \quad (4-4)$$

در معادلات بالا p ذره را مشخص می‌کند، d جهت جستجو است، k شماره‌ی تکرار را نمایش می‌دهد، v سرعت ذره و x موقعیت هر ذره است. به علاوه، x^{ind} و x^{glo} مناطقی از فضای جستجو که تابع هدف^۱ در آن مقادیر بهینه را به دست می‌آورد، نشان می‌دهد. x^{ind} بهترین موقعیت یافت شده توسط هر ذره منفرد است، حال آنکه x^{glo} بهترین موقعیت یافت شده توسط گروه ذرات است. r_1 و r_2 دو عدد تصادفی با توزیع یکنواخت بین (۰، ۱) هستند که سبب می‌شوند نوعی گوناگونی در جواب‌ها به وجود آید و به این نحو جستجوی کاملی روی فضا انجام پذیرد. c_1 و c_2 ثابت‌های مثبتی هستند که پارامترهای جستجو^۲ نامیده می‌شوند و معمولاً به صورت برابر در بازه‌ی (۲، ۱/۵) انتخاب می‌شوند. هرچه این دو ثابت بزرگتر انتخاب شوند همگرایی سریع‌تر اتفاق می‌افتد اما امکان گیر افتادن در جواب‌های محلی بیشتر می‌شود. ω فاکتور اینرسی^۳ می‌باشد که در بازه‌ی (۰/۹، ۰/۴) تعیین می‌گردد. این فاکتور برای کنترل اثری که تاریخچه‌ی سرعت‌ها بر روی سرعت فعلی دارد تعیین می‌گردد. فاکتور وزن اینرسی بهتر است به صورت دینامیک تعریف شود، بدین ترتیب که ابتدا بهتر است بزرگتر باشد تا امکان یافتن جواب‌های مناسب در همان محل بیشتر شود و رفته رفته مقدار آن کاهش یابد تا همگرایی بهتری را سبب شود (Clerc & Kennedy, 2002).

¹ -Objective Function

² -Search Parameters

³ -Factor of Inertia

کلرک و کندی^۱ در سال ۲۰۰۲ روشی ارائه کردند که به کمک آن قادر خواهد بود پارامترهای الگوریتم را محاسبه نماید. در این روش ابتدا دو مقدار مثبت Φ_1 و Φ_2 را به گونه‌ای انتخاب کرد که جمع مقادیر مذکور بزرگتر از ۴ باشد. حال مقدار x از رابطه‌ی (۵-۴) محاسبه می‌گردد.

$$x = \frac{2}{\phi - 2 + \sqrt{\phi^2 - 4\phi}} \quad (۵-۴)$$

$$\begin{cases} \omega = x \\ c_1 = x\phi_1 \\ c_2 = x\phi_2 \end{cases} \quad (۶-۴)$$

در این روش مقدار پارامترهای الگوریتم یک مقدار ثابت خواهد بود و خاصیت دینامیک بودن را ندارد. اما روش دیگری که مورد استفاده‌ی بسیاری از محققان قرار گرفته است، استفاده از شکل کاهشی ضرایب یادگیری و فاکتور اینرسی به صورت خطی است، روابط (۷-۴ تا ۹-۴) شکل محاسبه‌ی ضرایب را نشان می‌دهند.

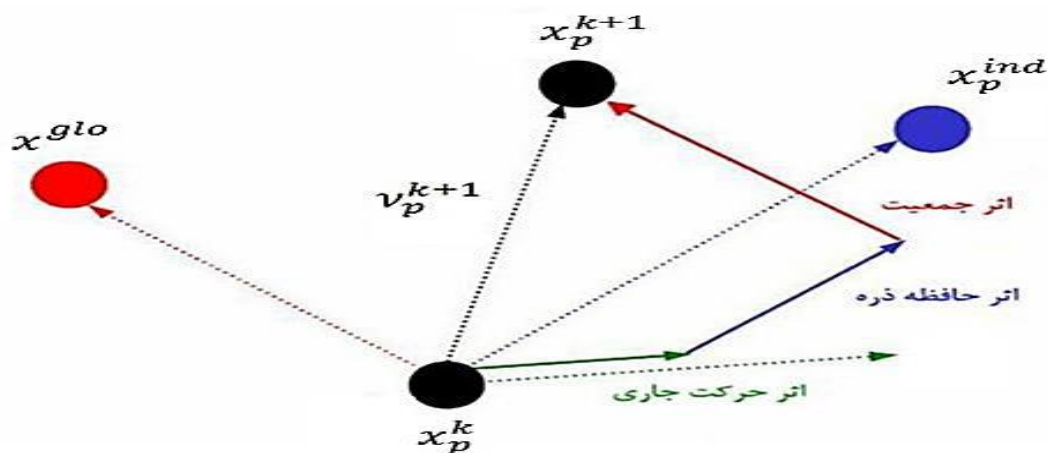
$$\omega = \omega_{max} - (\omega_{max} - \omega_{min}) \frac{k}{k_{max}} \quad (۷-۴)$$

$$c_1 = c_{1min} + (c_{1max} - c_{1min}) \frac{k}{k_{max}} \quad (۸-۴)$$

$$c_2 = c_{2min} + (c_{2max} - c_{2min}) \frac{k}{k_{max}} \quad (۹-۴)$$

که در آن ω_{min} ، c_{1max} و c_{2max} مقادیر نهایی، k شماره‌ی تکرار فعلی و k_{max} حداکثر تکرار می‌باشد. این روش به صورت یک تصاعد حسابی عمل می‌کند و مزیت مهم آن این است که تغییرات ضرایب کوچک بوده و حد بالا و پایین ضرایب نیز مشخص است، در عمل نیز کارایی این روش به اثبات رسیده است و بسیاری از آن را توصیه کرده‌اند. شکل (۵-۴) نحوه‌ی به‌روز شدن موقعیت ذرات را در الگوریتم بهینه‌سازی تجمع ذرات، نشان می‌دهد.

¹ - clerc & Kennedy



شکل (۵-۴) نحوه‌ی به روز شدن موقعیت ذره در الگوریتم PSO

الگوریتم PSO پروسه را با ارزیابی تابع هدف ادامه می‌دهد که این تابع نشان می‌دهد که مقدار پارامتر یا تخصیص مقادیر به آن با چه کیفیتی است. در هربار جابه‌جایی ذرات براساس موقعیت جدید ذره، مقدار تابع هدف برای آن ذره محاسبه و به آن اختصاص می‌یابد. این موضوع نشان‌دهنده‌ی اهمیت انتخاب تابع هدف برای الگوریتم است. اگر تابع هدف، میانگین مربع خطا (MSE) و هدف، کاهش این تابع به مینیمم مقدار باشد، می‌توان تابع هدف را به صورت رابطه (۱۰-۴) نوشت.

$$\min f(\cdot) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i^{Obs} - Y_i^{Est})^2 \quad (۱۰-۴)$$

که Minf به حداقل میانگین مربع خطا دلالت می‌کند، Y_i^{Obs} مقدار مشاهده شده (مقدار واقعی)، Y_i^{Est} مقدار تخمین زده شده توسط مدل و N تعداد مشاهدات است.

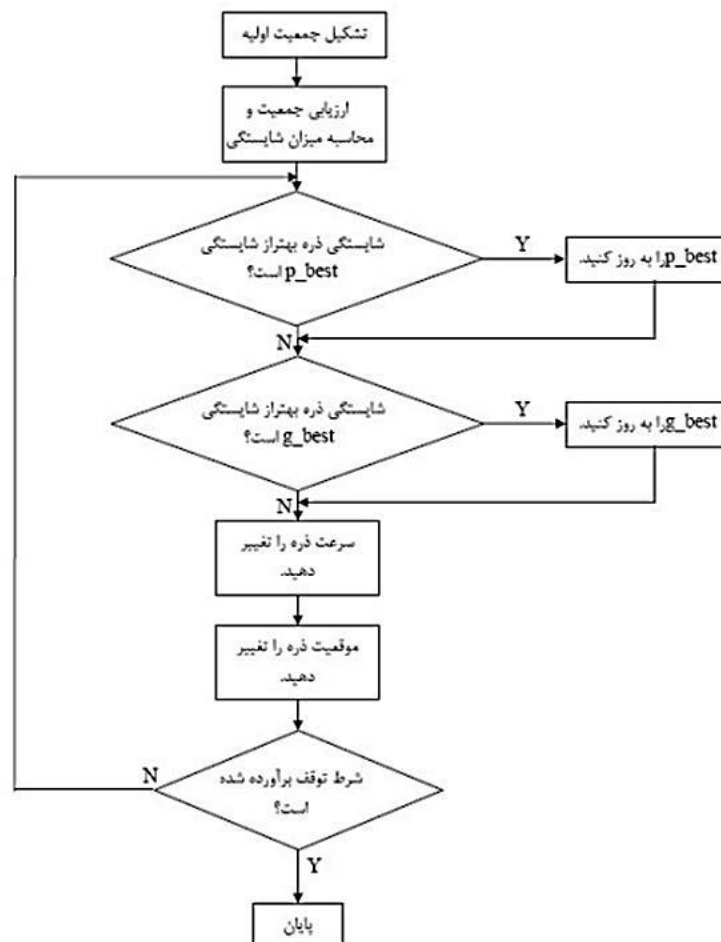
فرایند الگوریتم PSO تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که شرط توقف برآورده شود. به‌طور کلی چهار شرط برای توقف الگوریتم وجود دارد.

- ✓ تعیین مدت زمان مشخص برای اجرای برنامه
- ✓ رسیدن به تعداد معینی از تکرار در الگوریتم
- ✓ ادامه‌ی الگوریتم تا زمانی که مقدار تابع هدف به یک مقدار معین برسد.

✓ تعیین حد مشخصی از همگرایی برای ذرات؛ بدین ترتیب که الگوریتم تا زمانی ادامه پیدا می‌کند

که اختلاف بین بهترین و بدترین مقدار تابع هدف برای ذرات در یک تکرار به حد معینی برسد.

روند مربوط به مراحل محاسبات در الگوریتم PSO در شکل (۴-۶) آورده شده است.



شکل (۴-۶) روند مراحل محاسبات، در الگوریتم بهینه‌سازی تجمع ذرات

۴-۵-۲- روش الگوریتم بهینه‌سازی ماشین بردار پشتیبان^۱ SVM

الگوریتم SVM اولیه در سال ۱۹۶۳ توسط واپنیک^۲ ابداع شد و در سال ۱۹۹۵ برای حالت غیر

خطی نیز تعمیم داده شد.

^۱ -Support Vector Machine

^۲ -Vladimir Vapnik

این الگوریتم بر مبنای یادگیری و برای طبقه‌بندی و رگرسیون استفاده می‌شود. الگوریتم ماشین بردار پشتیبان یکی از روش‌های نسبتاً جدید است که برای حل مسائل پیچیده نسبت به روش‌های قدیمی‌تر مانند شبکه‌های عصبی کارایی بالاتری دارد. الگوریتم بهینه‌سازی ماشین بردار پشتیبان یک روش آموزشی است که بر اساس کمینه‌سازی ریسک ساختاری میان داده‌های ورودی و خروجی ارتباط ایجاد می‌کند. این الگوریتم برخلاف روش‌های ابتدایی مانند شبکه عصبی مشکلی در گرفتاری کمینه‌های محلی ندارد. در واقع روش‌های شبکه عصبی بر مبنای کاهش خطا و ریسک تجربه استفاده می‌شوند. این روش براساس داده‌های آموزشی از یک پارامتر ورودی با استفاده از یک تابع به یک عدد واقعی نگاشت می‌کند. برای رفع مشکل انجام کار در فضای بزرگ، از یک تابع کرنل استفاده می‌شود. این تابع علاوه بر این امر می‌تواند مشکل غیرخطی بودن نگاشت را نیز برطرف کند. در واقع هدف این الگوریتم تخمین پارامترهای وزن و بایاس تابعی است که بهترین تطابق را با داده‌ها داشته باشد (Smola, et al, 2004).

۴-۵-۲-۱- روش کار الگوریتم ماشین بردار پشتیبان (SVM)

با فرض اینکه ۱ داده آموزشی وجود داشته باشد و هر ورودی x دارای تعداد D ویژگی باشد، یعنی دارای D تعداد بعد باشد و هر نقطه دارای مقدار ویژه‌ای نظیر Y باشد، هدف پیدا کردن تابع رگرسیونی خواهد بود که بین ورودی و خروجی رابطه‌ی (۴-۱۱) را برقرار کند.

$$f(x, w) = (xw) + b \quad (۴-۱۱)$$

برای به دست آوردن تابع f محاسبه مقادیر بردار وزن w و بایاس b ضروری است، در ابتدا یک تابع تلفات با ناحیه پوششی ε نیز به صورت رابطه‌ی زیر تعریف می‌شود: تابع L_ε تابع تلفات وپنیک است. با استفاده از تابع تلفات وپنیک پارامترهای کنترل‌کننده تابع پاسخ بهینه ماشین بردار پشتیبان شامل وزن و بایاس به دست خواهد آمد (Dibike, et al, 2001).

$$L_\varepsilon(y) = |y - f(x, w)|_\varepsilon = \begin{cases} 0 & \text{if } |y - f(x, w)|_\varepsilon \leq \varepsilon \\ |y - f(x, w)|_\varepsilon - \varepsilon & \text{otherwise} \end{cases} \quad (۴-۱۲)$$

بدین منظور رابطه‌ی (۱۳-۴) باید کمینه شود:

$$R(C) = \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l L_{\varepsilon}(y_i, f_i(x, w)) \quad (13-4)$$

به منظور تشریح بهتر، رابطه‌ی (۱۳-۴) به صورت مجموعه روابط (۱۴-۴) نوشته می‌شود:

$$\text{Min} \quad (14-4)$$

$$\phi(w, \zeta^0, \zeta) = \frac{1}{2} \|w\|^2 + C(\sum_1^i \zeta^0 + \sum_1^i \zeta$$

Sub.

$$y_i - ((wx) + b) \leq \varepsilon + \zeta^0$$

$$((wx_i) + b) - y_i \leq \varepsilon + \zeta^0, i = 1, 2, 3, \dots, l$$

$$\zeta^0, \zeta \geq 0$$

در روابط (۱۳-۴) و (۱۴-۴)، C پارامتر ثابت بوده و مقدار آن باید بوسیله کاربر مشخص شود، در

واقع این پارامتر وظیفه ایجاد تعادل و تغییر وزن‌های جریمه ناشی از اغماض، متغیر ε را برعهده دارد.

در عین حال نیز بیشینه اندازه حاشیه جدایش را تعیین می‌کند. ε خطای مورد قبول در تلفات، $\|w\|^2$

نرم بردار وزن و ζ^0 متغیرهای اسلگ هستند. این مساله با استفاده از روش لاگرانژ قابل حل است، لذا با

تبدیل به تابع لاگرانژ، به صورت بیشینه کردن معادله (۱۵-۴) بازنویسی می‌شود:

$$L_p(a_i, a_i^*) = -\frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^l (a_i - a_i^*)(a_i - a_i^*) x_i x_j - \varepsilon \sum_{i=1}^l (a_i + a_i^*) + \quad (15-4)$$

$$\sum_{i=1}^l (a_i - a_i^*) y_i$$

که $L_p(a_i, a_i^*)$ تابع لاگرانژ و مقادیر داخل پرانتز، ضرایب لاگرانژ هستند و شرایط آن به صورت

رابطه‌ی (۱۶-۴) است:

$$\sum_{i=1}^l (a_i - a_i^*) = 0 \rightarrow 0 \leq a_i, a_i^* \leq C, i = 1, 2, \dots, l \quad (16-4)$$

با حل معادله (۱۶-۴)، می‌توان تابع ماشین بردار پشتیبان را با استفاده از تابع کرنل به صورت

زیر محاسبه کرد:

$$f(x, w) = w_0 x + b = \sum_{i,j=1}^l (a_i - a_i^*) x_i x + b_0 \quad (۱۷-۴)$$

با تعیین ضرایب لاگرانژی معادله پاسخ نهایی، مطابق روابط (۱۸-۳) و (۱۹-۳) خواهد داشت (Dibike et al, 2001):

$$w_0 x = \sum_{i,j=1}^l (a_i - a_i^*) x_i x \quad (۱۸-۴)$$

$$b_0 = -\frac{1}{2} w [x_r + x_s] \quad (۱۹-۴)$$

در این روابط w و b_0 مقادیر بهینه بردار وزن و بایاس بوده، x_r و x_s نیز دو بردار پشتیبان هستند. داده‌هایی که ضرایب لاگرانژ متناظر با آن‌ها غیر صفر است، به عنوان بردار پشتیبان شناخته می‌شوند. از نظر هندسی این داده‌ها دارای خطای پیش‌بینی $\pm \epsilon$ هستند. ϵ تعداد بردارهای پشتیبان را کنترل می‌کند. نهایتاً این بردارهای پشتیبان هستند که تابع رگرسیونی نهایی با پاسخ بهینه را تعیین می‌کنند. پارامتر ϵ می‌تواند مقادیر صفر تا بی‌نهایت را پذیرش کند، مقادیر بزرگ ϵ بردارهای پشتیبان را کاهش می‌دهد که توأم با عریض شدن باند بوده و دامنه خطای مجاز را بالا می‌برد. مقادیر کوچک ϵ نیز بردارهای پشتیبان را افزایش داده و احتمال بیش‌آموزش را بالا می‌برد. همانطور که گفته شد، مساله رگرسیون خطی با استفاده از توابع کرنل قابل تبدیل به غیرخطی است. توابع کرنل چندجمله‌ای در برخی مسائل ژئوتکنیکی به طرز موفقیت‌آمیزی به کار گرفته شده‌اند (Goh, 2007).

۴-۶- نتیجه‌گیری

با توجه به مباحث مطرح شده در این فصل و توضیح شرایط هریک از روش‌های تحلیل برگشتی، می‌توان نتیجه گرفت امروزه با پیشرفت شبکه‌های هوشمند که در واقع براساس الگوریتم‌های مختلفی همچون شبکه‌های عصبی و ژنتیک پایه‌گذاری شده‌اند، نتایج کار با استفاده از این روش‌ها به مراتب دقیق‌تر و همچنین با سرعت بالاتری برآورد خواهد شد. با توجه به اینکه در مطالعات مشابه از روش‌های مستقیم یا بعضاً از روش‌های معکوس استفاده شده است، همچنین سرعت عمل و معایبی که هریک از این روش‌ها دارند، در این پژوهش از روش الگوریتم‌های هوشمند و به ویژه الگوریتم‌های PSO و SVM

استفاده خواهد. روش‌های آماری همان‌طور که پیش‌تر نیز بحث شد، دارای دقت پایین‌تری نسبت به روش‌های دیگر هستند، علاوه بر این روش‌های معمول قابل استفاده نظیر روش‌های مستقیم و معکوس نیز سرعت و دقت کمتری را برخوردار هستند. استفاده از الگوریتم‌های هوشمند با توجه به مطالعات گذشته و کارهای مشابه نشان داده است دقت و سرعت به مراتب بالاتری نسبت به روش‌های دیگر دارد. بنابراین در این پژوهش از روش‌های جدیدتر و دقیق‌تر الگوریتم‌های هوشمند استفاده خواهد شد.

فصل پنجم

مشخصات ساختگاه مورد مطالعه

۵-۱-مقدمه

در این فصل به معرفی پروژه تونل البرز، پرداخته می‌شود. در این قسمت نواحی مورد مطالعه شامل ایستگاه‌های رفتارسنجی، گزارش‌های مربوطه و مشخصات هریک از ایستگاه‌ها نیز پرداخته خواهد شد. با تفکیک نواحی مختلف تونل البرز از منظر لیتولوژی، زمین‌شناسی مهندسی (گسل، چین‌خوردگی و...) وزن روباره و پارامترهای مهم ژئومکانیکی، مقادیر مختلف جابه‌جایی در منطقه مورد مطالعه بررسی خواهد شد. مشخصات مختلف در ساخت و همچنین انتخاب نوع سیستم‌های نگهداری در این فصل نیز از موارد قابل اشاره خواهد بود. همچنین با مطالعه گزارش‌های مختلف ابرابندی نواحی پرمخاطره‌تر ارزیابی می‌شوند. در این فصل، علاوه بر معرفی ساختگاه مورد مطالعه از منظر زمین‌شناسی، به گزارش‌ها و قرائت‌های مختلف ابرابندی نیز اشاره خواهد شد. علاوه بر این شناخت مناطق پرمخاطره برای انتخاب مقاطع مناسب جهت مدل‌سازی عددی کمک خواهد کرد.

۵-۲-معرفی تونل البرز

طرح اولیه برای احداث یک آزادراه میان تهران و مازندران از سال ۱۳۵۳ شمسی آغاز شده است. به دلیل مشکلات مختلف شروع آغاز عملیات احداثی آن پس از ۲۰ سال و از سال ۱۳۷۷ آغاز شده است. آزادراه تهران شمال یک طرح ۱۲۱ کیلومتری است که با هدف کاهش ترافیک و ایجاد یک راه امن با تقسیم به ۴ قطعه در حال احداث و بهره‌برداری است. در حال حاضر قطعه‌های ۱ و ۴ به بهره‌برداری رسیده است. مطابق طرح اولیه، مسیر این آزادراه از تقاطع غیرهم‌سطح بزرگ‌راه‌های آزادگان و همت آغاز شده و در امتداد دره‌ی کن پس از گذشتن از حاشیه روستای سولقان به مرور از مناطق کوهستانی توچال عبور کرده و سپس به وسیله تونل بلند تالون این رشته‌کوه را قطع می‌کند. ادامه مسیر در دامنه‌های شمالی آن، در منطقه شهرستانک قرار می‌گیرد. با اجرای این قسمت طول ۶۰ کیلومتر از مسیر فعلی به ۳۲ کیلومتر کاهش می‌یابد. پس از آن، مسیر موازی با جاده قدیم ادامه یافته و در دره سرهنگ وارد تونل البرز می‌شود. این تونل بلندترین تونل مسیر و بلندترین تونل راه ایران نیز می‌باشد.

ادامه مسیر نیز به موازات جاده قدیم ادامه یافته و در پایان با یک تقاطع غیرهمسطح به کمربندی چالوس-تنکابن متصل می‌شود (جنرال مکانیک، ۱۳۹۳).

تونل البرز که در واقع ساختگاه مورد مطالعه نیز در این تحقیق می‌باشد، در قطعه دوم این آزادراه قرار گرفته است. طول این تونل ۶۳۸۷ متر و بزرگ‌ترین تونل راه ایران می‌باشد. این تونل جهت ارتباطی سریع و ایمن در حال ساخت و ساز می‌باشد.

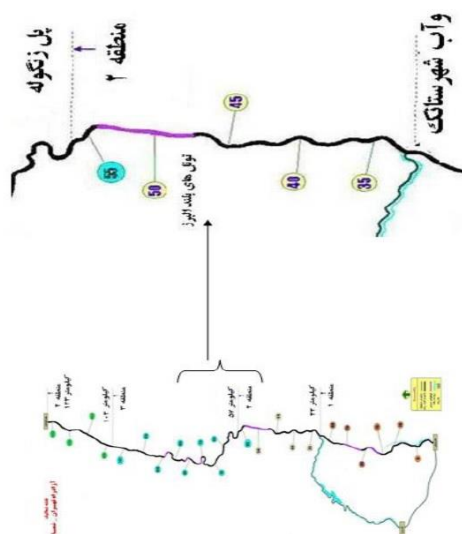
تونل البرز، بخشی از پروژه آزادراه تهران-شمال می‌باشد که به منظور ایجاد ارتباط سریع، ایمن و کم‌هزینه بین شهرهای تهران و چالوس در حال ساخت و ساز می‌باشد. این مجموعه شامل دو تونل موازی رفت و برگشت و یک تونل سرویس می‌باشد. قطر دهانه تونل سرویس این منطقه ۵/۵ متر می‌باشد که به وسیله دستگاه حفاری تمام مقطع (TBM)^۱ حفاری شده است. تونل البرز از دو دهانه اصلی حفاری تشکیل شده است. این دهانه‌ها موسوم به دهانه شمالی و جنوبی هستند. قطر تقریبی تونل البرز تقریباً برابر با ۱۲ متر بوده و شیب این تونل‌ها برابر با ۱/۳ است (جنرال مکانیک، ۱۳۹۳).

در ادامه در شکل (۵-۱) الف: محل تونل البرز واقع در قطعه دوم آزادراه تهران-شمال، شکل (۵-۱) ب: موقعیت جاده‌ای بین شهری این تونل و در شکل (۵-۱) ج: نمایی از دهانه جنوبی تونل البرز، نمایش داده شده است.

¹ -Tunnel Boring Machine (TBM)



ب



الف



ج

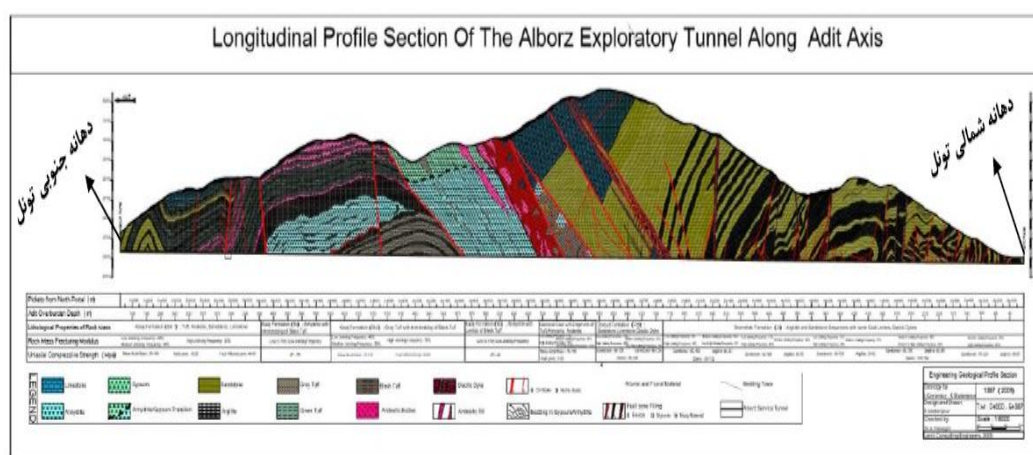
شکل (۵-۱) الف: تونل البرز در منطقه ۲ پروژه آزادراه تهران-شمال، ب: محل تقریبی تونل البرز، ج: نمایی از دهانه جنوبی تونل البرز و تونل دسترسی (جنرال مکانیک، ۱۳۹۳).

۵-۲-۱- وضعیت زمین‌شناسی منطقه

تونل البرز از لحاظ زمین‌شناسی در سازند شمشک و کرج قرار دارد. تونل اکتشافی تونل البرز به وسیله TBM به قطر ۵/۵ متر و طولی معادل تونل البرز حفاری شده است. از آنجاکه طول تونل زیاد است، بنابراین حفاری از دو طرف تونل در حال انجام است که به دو دهانه شمالی و جنوبی منسوب است. برداشت زمین‌شناسی-مهندسی تونل اکتشافی البرز از دهانه شمالی توسط زمین‌شناسان روسی و ایرانی انجام شده است. ضمن برداشت زمین‌شناسی، پارامترهای ذیل تعیین و ثبت شده‌اند: ۱- لیتولوژی

سنگ‌ها ۲- نوع کنتاکت‌های موجود بین واحدهای مختلف سنگی ۳- وجود چین‌خوردگی و تخریب‌های تکتونیکی و پارامترهای مربوطه ۴- درجه درزه‌داری و پارامترهای مربوطه (عرض بازشدگی درزه‌ها، نوع پرکننده، طول درزه، مشخصات سطح جداره درزه‌ها و غیره) ۵- مشخصات چینه‌بندی سنگ‌ها، گسل‌ها و درزه‌ها ۶- آبدهی و دبی آب زیرزمین ۷- موارد نشت گار ۸- درجه هوازدگی سنگ‌ها و سایر متغیرها.

لازم به ذکر است که حفاری تونل اکتشافی البرز در بیش‌تر نواحی محدوده مورد بررسی پس از حفاری چال و گمانه پیشگام صورت گرفته است. غالباً چال‌های پیشگام افقی (بدون مغزه‌گیری) به عمق ۲۵-۳۵ متر و بعضاً گمانه‌های پیشگام (همراه با مغزه‌گیری) حفاری گردیده است. لیتولوژی مسیر تونل در دهانه شمالی عمدتاً از توف‌ها (سیاه، سبز و خاکستری)، آندزیت (سبز و خاکستری)، انیدریت، سنگ آهک، ماسه‌سنگ، آرژلایت و گابرو تشکیل شده است. مقاومت فشاری تک‌محوره تخمین زده شده برای این سنگ‌ها از ۲۰ تا ۱۲۰ مگاپاسکال متغیر است. طولانی‌ترین گسل در متر ۵۳۶۱-۵۳۳۹ قرار دارد که از برش سیمانته شده تشکیل شده است و دبی آب ورودی به تونل از این گسل تقریباً زیاد است که شرایط را برای مچاله‌شوندگی سنگ‌های این مسیر مهیا می‌سازد (جنرال مکانیک، ۱۳۹۳). در شکل (۵-۲) پروفیل طولی این تونل به نمایش درآمده است.



شکل (۵-۲) پروفیل طولی از تونل اکتشافی تونل البرز در امتداد محور تونل (جنرال مکانیک، ۱۳۹۳).

۵-۲-۲- حفاری و سیستم نگهداری

در این تونل از روش تونل سازی اتریشی استفاده می شود. جهت حفاری از سیستم آتشباری کنترل شده استفاده می شود. مقطع تونل به شکل نعل اسبی است که فرایند حفاری آن در دو مرحله انجام می شود. ابتدا قسمت بالایی حفاری شده و سیستم های نگهداری نصب می شوند. پس از پایدارسازی قسمت بالایی، قسمت پایینی تونل حفر شده و عملیات مشابه قسمت بالا تکرار می شود. سیستم های نگهداری این تونل شامل ۴ نوع اصلی و دو نوع فرعی می باشد. نصب سیستم های نگهداری بسته به وضعیت زمین شناسی مسیر تونل انجام شده است. به طور کلی سیستم نگهداری شامل راک بولت های^۱ ۴/۵ متری، فورپولینگ^۲ مش فولادی، شاتکریت^۳ و لتیس گیردر^۴ می شود. ضخامت پوشش نهایی بتنی متغیر است و در مواردی به ۶۰ سانتی متر نیز می رسد. مشخصات سیستم های نگهداری در جدول (۵-۱) آورده شده است (جنرال مکانیک، ۱۳۹۳).

انواع سیستم های نگهداری مورد استفاده در تونل اصلی البرز به ۴ دسته اصلی (B, C, D, E) تقسیم می شود. سیستم نگهداری نوع C در واقع شامل دو دسته فرعی (C1, C2) می باشد. تفاوت انواع سیستم های نگهداری مختلف بستگی به شرایط زمین شناسی مختلف منطقه دارد. با توجه به گزارش های مربوطه می توان گفت بیش از ۸۰ درصد تحکیم های مورد استفاده در تونل اصلی البرز از نوع C و به ندرت از سیستم های نگهداری نوع D و E استفاده شده است.

سیستم نگهداری نوع B شامل شاتکریت با ضخامت ۵ سانتی متر، لایه مش فولادی و راک بولت نوع ۱ می باشد. در سیستم نگهداری C1 نیز ضخامت لایه شاتکریت ۱۵ سانتی متر، ۱ لایه مش فولادی و راک بولت نوع ۱ می باشد. در سیستم نگهداری C2 نیز علاوه بر اینکه از قاب فولادی به صورت لتیس

^۱ -Rock Bolt

^۲ -Forepoling

^۳ -Shotcrete

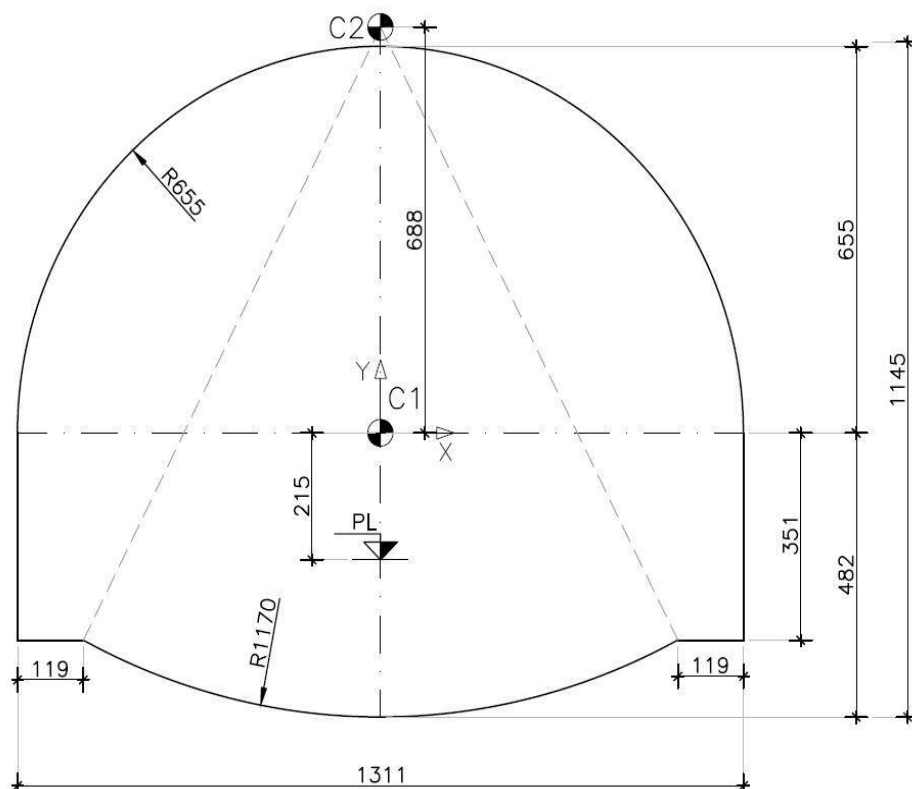
^۴ -Lattice Grider

گریدر استفاده می‌شود، مش فولادی ۲ لایه، شاتکریت ۲۵ سانتی‌متری و راک بولت نوع ۲ نیز استفاده می‌شود. در سیستم‌های نگهداری نوع D و E نیز علاوه بر موارد مذکور ضخامت لایه شاتکریت به ۳۰ سانتی‌متر افزایش پیدا می‌کند. همچنین سیستم نگهداری ثانویه شامل قاب‌های فلزی نیز به همراه لایه دوم شاتکریت و مش فولادی علاوه بر نصب راک‌بولت‌ها نیز استفاده شده است، که به دلیل آنکه در مقطع‌های موردنظر استفاده نشده است، به آن‌ها پرداخته نخواهد شد (GDE, 2015).

جدول (۵-۱) مشخصات سیستم‌های نگهداری تونل البرز (GDE, 2015).

مشخصات	نوع سیستم
Class: c20/25 E= 10 GPa	شاتکریت
Size: (ϕ 6mm, 100mm*100mm)	مش فولادی
Length= 4.5m 2.5*2.5m Φ =25mm	راک بولت (نوع ۱)
Length= 4.5m 1.5*1.5m Φ =25mm	راک بولت (نوع ۲)
Type: PS95 H=141mm Space: 1.25m	لتیس گریدر

در نواحی گسلی و توده‌سنگ ضعیف، عمل تحکیم چتری و تزریق انجام می‌شود. همچنین در محل‌هایی که آب حضور دارد، زهکشی انجام شده است. در شکل (۵-۳) یک مقطع عرضی از تونل همراه با ابعاد آن آورده شده است (جنرال مکانیک، ۱۳۹۳).



شکل (۳-۵) مقطع عرضی تونل البرز (جنرال مکانیک، ۱۳۹۳).

۳-۵- تشریح گروه‌های خاکی و سازندهای موجود

در این قسمت، با استفاده از آزمایشات انجام شده شامل دانسیته، جذب آب، مقاومت تراکمی و کششی تک‌محوری و مدول تغییر شکل‌پذیری توده‌سنگ، ویژگی‌های مختلف ژئومکانیکی و فیزیکی چهار نوع سنگ اصلی در پروژه تونل البرز تعیین شده‌اند. این مقادیر در جدول به ترتیب در جدول (۲-۵) و جدول (۳-۵) آورده شده است (یساقی، ۱۳۸۲).

جدول (۵-۲) دامنه مقادیر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی نمونه سنگ‌های مسیر تونل البرز (یساقی،

(۱۳۸۲)

ویژگی	ماسه‌سنگ	سنگ آهک	سنگ گچ	ماسه‌سنگ
وزن مخصوص (Ton/m ³)	۲/۷۸ _ ۲/۴۹	۲/۶۹ _ ۲/۴۹	۲/۲۹ _ ۲/۱	۲/۶۷ _ ۲/۴۷
جذب آب (%)	۳/۱۵ _ ۱/۲۸	۳/۰۵ _ ۱/۳۴	۵/۶ _ ۳/۷۹	۲/۶۵ _ ۲/۴۵
مقاومت تراکمی (MPa)	۷۵_۵۵	۸۰_۶۰	۷۰_۴۰	۱۰۰_۸۰
مقاومت کششی (MPa)	۸/۸_ ۶/۲	۸/۹_ ۶/۴	۵/۲ _ ۶/۹	۱۱/۷ _ ۱۰/۱
مدول دگرشکلی (GPa)	۱۰/۷ _ ۸/۹	۱۱/۵ _ ۹/۶	۸/۶ _ ۷/۲	۱۲/۷ _ ۱۱/۲

با توجه به پروفیل طولی به دست آمده از تونل البرز که در شکل (۵-۱) نشان داده شده است، سازندهای موجود به همراه پارامترهای ژئومکانیکی هر سازند در جدول (۵-۳) نشان داده شده است. این ویژگی‌ها در ۶ سازند مختلف با استفاده از دادهای تونل‌های اکتشافی به دست آمده‌اند (گزارش شرکت GDE، ۲۰۱۵).

جدول (۳-۵) سازندهای موجود به همراه پارامترهای ژئومکانیکی در طول مسیر تونل البرز (گزارش شرکت

GDE, ۲۰۱۵).

سازند	نماد	کیلومتر از (KM)		RMR	GSI	UCS (MPa)	γ (KN/m ³)	روپاره (m)
شمشک	Js	۰+۰۰۰	۲+۴۸۸	۶۰-۴۴-۳۰	۶۸-۴۵-۲۰	۱۹۵-۸۱-۱۰	۲۹-۲۶/۳-۲۴	۶۲۰-۶۵
گسل شمشک				۴۰-۳۱-۲۷	۳۸-۲۵-۸			
درود	Pdr	۲+۴۸۸	۳+۰۲۳	۵۶-۴۴-۲۹	۶۶-۴۷-۲۳	۱۷۶-۸۴-۲۴	۲۹-۲۶/۷-۲۲	۸۷۵-۷۴۰
گسل				۴۷-۳۵-۱۸	۴۹-۳۴-۱۴			
کندوان		۳+۰۲۳	۳+۵۰۰	۶۷-۵۲-۲۰	۷۸-۵۴-۳۸	۱۳۵-۷۳-۹	۲۹-۲۷/۵-۲۵	۸۷۰-۶۸۰
گسل				۴۵-۳۴-۲۰	۵۶-۳۸-۲۳			
کرج	Eq	۳+۵۰۰	۳+۹۴۴	۷۵-۷۰-۶۲	۹۱-۷۶-۶۵	۶۰-۴۲-۲۳	۲۹-۲۸/۸-۲۳	۶۸۰-۵۹۰
کرج	Ekt3	۳+۹۴۴	۴+۹۴۸	۶۴-۵۳-۴۰	۸۲-۵۴-۳۸	۱۳۵-۹۳-۴۷	۳۰-۲۶/۵-۲۵	۶۱۰-۴۸۰
کرج	Eq	۴+۹۴۸	۵+۴۲۶	۷۸-۷۰-۶۱	۷۸-۷۰-۶۵	۵-۶۸-۱۱۳	۲۴-۲۷/۶-۳۰	۵۸۰-۳۹۰
گسل کرج				۵۴-۴۳-۱۸	۶۰-۴۸-۲۰			
کرج	Ekt1	۵+۴۲۶	۶+۳۸۷	۵۶-۴۶-۳۲	۶۲-۴۹-۳۲	۱۲۷-۷۹-۲۹	۲۸-۲۷/۳-۲۶	۳۹۰-۸۵
گسل کرج				۴۰-۳۷-۳۲	۳۸-۳۴-۲۶			
*مقادیر به صورت کمترین-میانگین-بیشترین درج شده است.								
*برای مقدار ارتفاع روباره مقادیر به صورت کمترین-بیشترین درج شده است.								

۵-۴- ابزارهای موجود در تونل البرز

همان‌طور که پیش‌تر در فصل سوم به تشریح ابزارهای موجود و همچنین تفسیر آن‌ها پرداخته شد، در این فصل با استفاده از داده‌های موجود در تونل البرز، به تشریح ابزارها و همچنین موقعیت نصب آن‌ها در سازندهای مختلف پرداخته خواهد شد. تعداد ایستگاه‌های ابزاربندی در دهانه شمالی ۷ مورد و در دهانه جنوبی ۱۱ مورد می‌باشد. لیست دستگاه‌ها به همراه تعداد و موقعیت سازبندی هر ابزار در جدول (۵-۵) نمایش داده شده است.

جدول (۵-۴) مشخصات و موقعیت ابزارهای نصب شده در تونل البرز

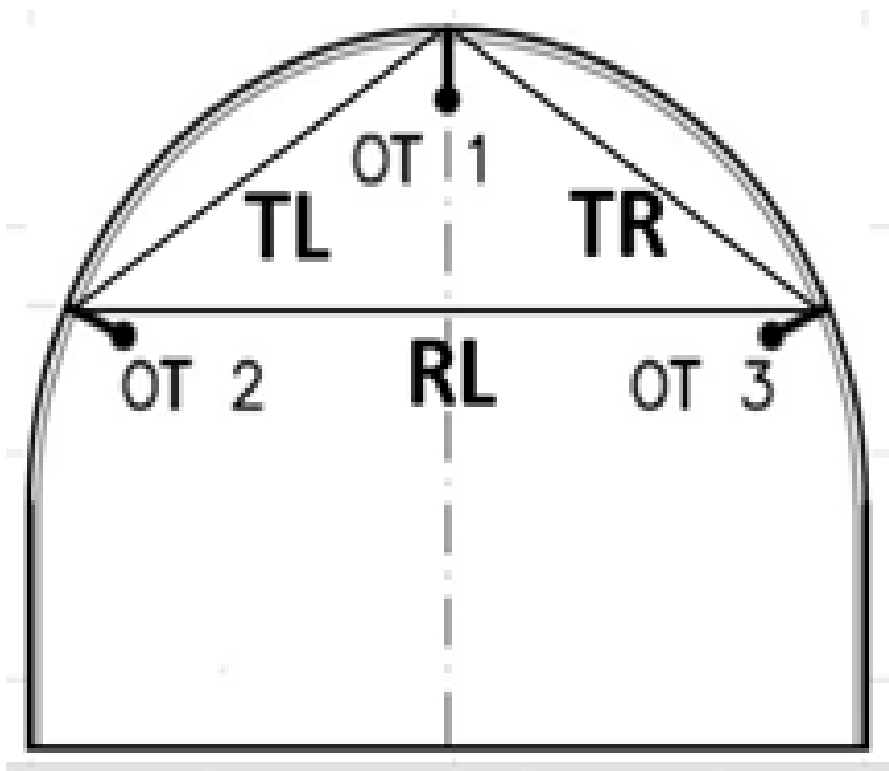
نام ایستگاه	نوع ابزار	تعداد ابزار	موقعیت	کیلومتر نصب	سازند
IN 001	همگرایی سنج	۵	پرتال شمالی	۵۳+۸۷۵	شمشک (Js)
	کشیدگی سنج سه نقطه‌ای	۳ (دیواره چپ و راست، سقف)			
	بارسنج	۳ (دیواره چپ و راست، سقف)			
IN 002	همگرایی سنج	۵	پرتال شمالی	۵۳+۸۵۱	شمشک (Js)
IN 003	همگرایی سنج	۳	پرتال شمالی	۵۳+۷۵۱	شمشک (Js)
IN 004	همگرایی سنج	۳	پرتال شمالی	۵۳+۵۳۹	شمشک (Js)
IN 005	همگرایی سنج	۳	پرتال شمالی	دستک	شمشک (Js)
IN 006	همگرایی سنج	۳	پرتال شمالی	۵۳+۳۸۰	شمشک

(Js)					
شمشک (Js)	۵۳+۹۷۴	پرتال شمالی	۴	همگرایی سنج	IN 007
کرج (Ekt1)	۴۸+۵۶۰	پرتال جنوبی	۳	همگرایی سنج	IS 001
			۳ (دیواره چپ، راست و سقف)	کشیدگی سنج سه نقطه‌ای	
			۳ (دیواره چپ، راست و سقف)	بارسنج	
کرج (Eq)	۴۸+۸۱۴	پرتال جنوبی	۳	همگرایی سنج	IS 003
کرج (Eq)	۴۹+۲۶۵	پرتال جنوبی	۳	همگرایی سنج	IS 004
کرج (Ekt3)	۴۹+۲۸۵	پرتال جنوبی	۳	همگرایی سنج	IS 005
کرج (Ekt3)	۴۹+۳۰۱	پرتال جنوبی	۳	همگرایی سنج	IS 006
کرج (Ekt3)	۴۹+۳۳۰	پرتال جنوبی	۳	همگرایی سنج	IS 007
کرج (Ekt3)	۴۹+۳۷۹	پرتال جنوبی	۳	همگرایی سنج	IS 008
کرج (Ekt3)	۴۹+۴۵۹	پرتال جنوبی	۳	همگرایی سنج	IS 009
کرج (Ekt3)	۴۹+۶۰۶	پرتال جنوبی	۳	همگرایی سنج	IS 010
کرج (Ekt3)	۴۹+۹۳۸.۹۰	پرتال جنوبی	۳	همگرایی سنج	IS 011

IS 012	همگرایی سنج	۳	پرتال جنوبی	۵۰+۶۸۸	کرج (Eq)
--------	-------------	---	-------------	--------	-------------

۵-۵- رفتارنگاری در تونل البرز

رفتارنگاری در پروژه تونل البرز در حال حاضر شامل همگرایی سنجی به منظور اندازه گیری میزان جابه جایی نسبی نقاط موجود در دیواره تونل نسبت به یکدیگر می باشد. در پروژه تونل البرز سیستم همگرایی سنجی سه نقطه ای شامل یک نقطه در تاج تونل و یک نقطه در هر یک از دیواره های سمت راست و چپ تونل می باشد. نمایی شماتیک از محل قرارگیری نقاط اندازه گیری در شکل (۴-۵) نشان داده شده است. مقادیر بحرانی جابه جایی در تونل البرز در نقشه شماره TSFC-ALB-D-GEN-MON- R-001-A00 ارائه شده است. این مقادیر در جدول (۵-۵) نشان داده شده اند. در جدول (۵-۶)، عملیات مورد نیاز در صورت فراتر رفتن مقادیر جابه جایی از حدود بحرانی نشان داده شده اند.



شکل (۴-۵) شماتیک نقاط ابزار همگرایی سنجی در تونل البرز

جدول (۵-۵) حدود بحرانی جابه‌جایی

تیپ تحکیم اولیه	جابه‌جایی بصری برای اندازه‌گیری همگرایی			
	جابه‌جایی طراحی (mm)	حدود (mm)		
		(۱) رسیدگی	(۲) هشدار	(۳) اعلام خطر
B	جزیی	>۳		
C1				
C2	۵	~۵	~۶	~۷.۵
D	۳/۵	۳/۵	~۴/۶	~۵/۸
E	۵/۷	~۵/۷	~۶/۹	۸/۱۱

جدول (۶-۵) عملیات مورد نیاز در صورت فراتر رفتن مقادیر جابه‌جایی از حدود بحرانی

تحکیم اولیه		
سطح	عملیات فوری	عملیات مهم
سطح ۱ (رسیدگی)	انجام روزانه قرائت‌ها بهبود سیستم رفتارنگاری در صورت نیاز	ارزیابی نرخ جابه‌جایی‌ها انجام عملیات بر اساس نتایج ارزیابی
سطح ۲ (هشدار)	بررسی قرائت‌ها جلسه داخلی پیمانکار افزایش قرائت‌ها جمع‌آوری اطلاعات زمین- شناسی و احتمالات مربوط به عوامل فیزیکی نصب تحکیمات بیشتر در صورت نیاز	براساس نتایج حاصل از بررسی‌ها عملیات خاص در نظر گرفته شود

سطح ۳ (اعلام خطر)	بررسی قرائت‌ها جلسه داخلی پیمانکار اطلاع‌رسانی به کارفرما عملیات ساخت و ساز متوقف شده و تقویت تحکیم انجام شود عملیات مورد نیاز تصمیم- گیری شده و اجرا می‌گردد	عملیات مورد نیاز در جلسه مخصوص این موضوع تعیین شود. عملیات ساخت و ساز تنها در صورتیکه تقویت تحکیم موثر باشد مجددا شروع شود
----------------------	--	--

۵-۶- تحلیل داده‌های رفتارنگاری در تونل البرز برای مقاطع انتخاب شده

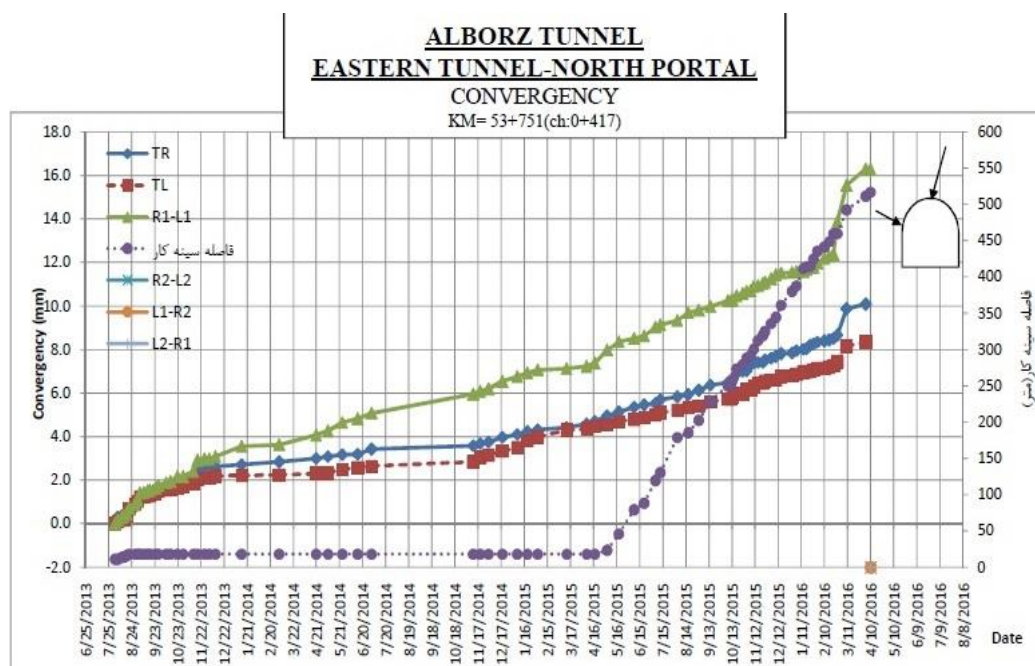
گزارش زیر با توجه به برداشت‌های ابزار دقیق در ایستگاه‌های نصب شده در تونل اصلی شرقی تهیه و تدوین شده است. منحنی‌های ارائه شده در این گزارش براساس آخرین قرائت‌های انجام شده (تا تاریخ ۱۳۹۵/۱/۳۱)، پردازش و رسم شده‌اند. در تفسیر این داده‌ها از واقعیت‌های ژئومکانیکی موجود در مسیر تونل‌ها، وضعیت زمین‌شناسی، فعالیت‌های اجرایی انجام شده در تونل، استفاده شده است. وضعیت پایداری تونل و چگونگی رفتار توده سنگ پیرامون آن، با استناد بر منحنی‌های رفتارسنجی، تجربه در موارد مشابه و قضاوت مهندسی ارائه گردیده است.

به عنوان یک روش مرسوم جهت حذف خطاهای سیستماتیک، در صورت مشاهده اولین تغییرات غیر محسوس در داده‌های یک ایستگاه ابزار دقیق کلیه احتمالات ممکن از نظر عدم آسیب‌پذیری ایستگاه از جهت برخورد ماشین‌آلات، دقت در قرائت و اندازه‌گیری مجدد، کالیبره بودن دستگاه قرائت هم‌چنین انجام قرائت مجدد با پریودهای زمانی کوتاه‌تر مد نظر قرار می‌گیرد تا احتمال بروز هرگونه خطای انسانی و ابزاری به صفر برسد.

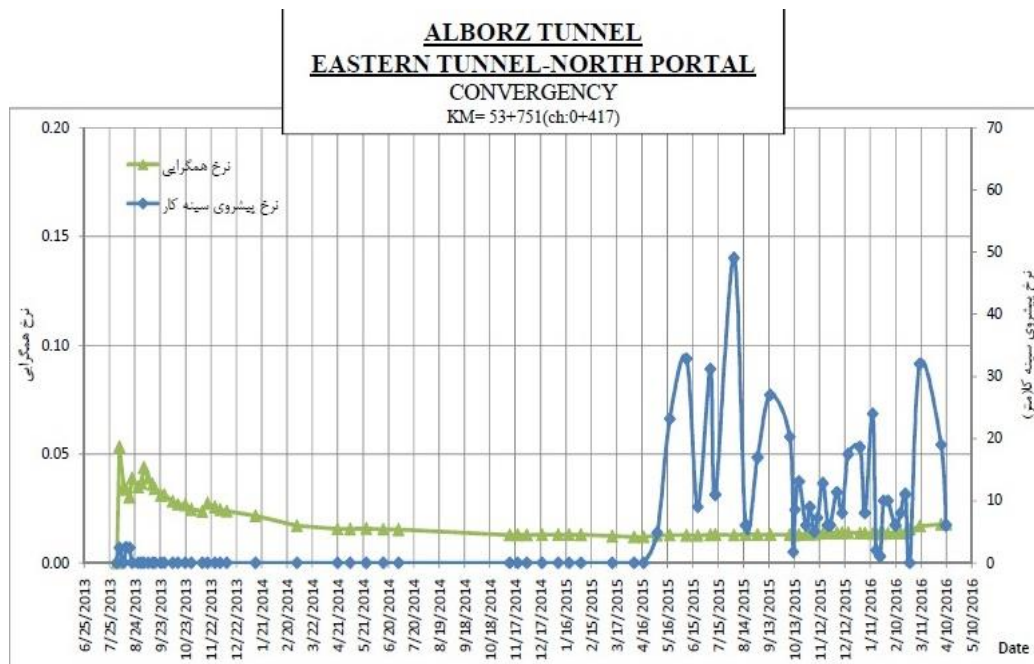
در مواردی ممکن است موانع فیزیکی از قبیل دپو بودن مصالح، مستقر بودن ماشین‌آلات حفاری در موقعیت ایستگاه ابزار دقیق یا تخریب پین‌های همگرایی سنجی در حین عملیات اجرائی تونل مانع از قرائت یک یا دو امتداد از امتدادهای ایستگاه همگرایی سنجی گردد که مشاهده عدم وجود اطلاعات در بعضی از ردیف‌های قرائت، می‌تواند ناشی از عوامل مذکور باشد.

یکی از موارد قابل توجه در نمودارهای همگرایی سنجی تونل البرز زمان نصب آن‌ها نیز می‌باشد. با توجه به این که نصب این سیستم‌ها پس از حفاری و اعمال نگهداری موردنظر در مقاطع بوده است، لذا داده قابل دسترسی از ابزار دقیق برای جابه‌جایی‌های قبل از نصب دستگاه‌ها موجود نمی‌باشد (گزارش ابزاربندی تونل البرز، ۱۳۹۶).

در شکل‌های (۵-۵) تا (۵-۱۰) نمودارهای داده‌های همگرایی سنجی ایستگاه‌های مقطع‌های انتخاب شده برای تحلیل برگشتی ابزار دقیق تونل البرز آورده شده است.



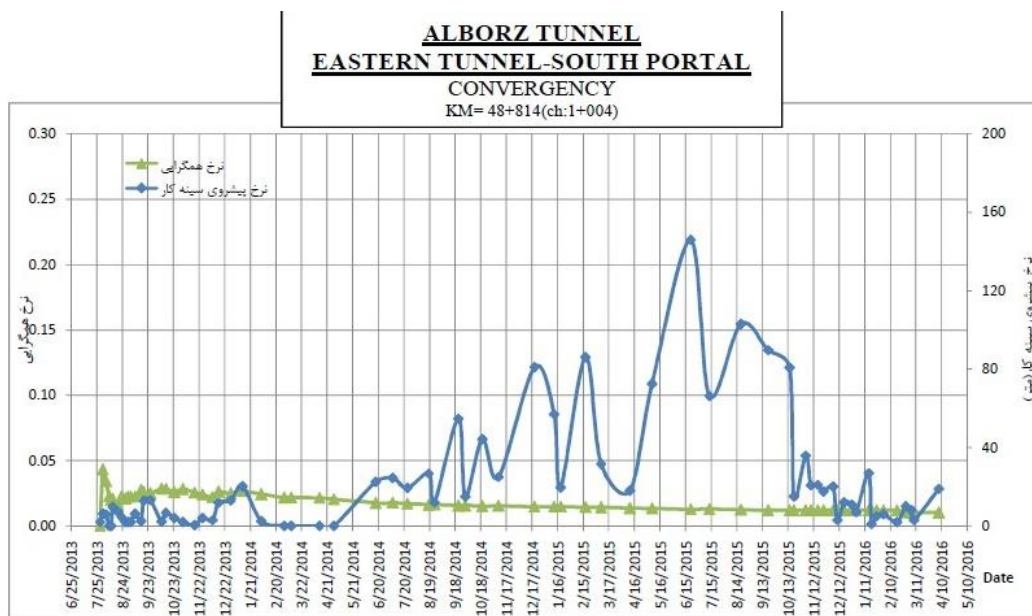
شکل (۵-۵) نمودار قرائت‌های ابزار همگرایی سنجی ایستگاه IN003



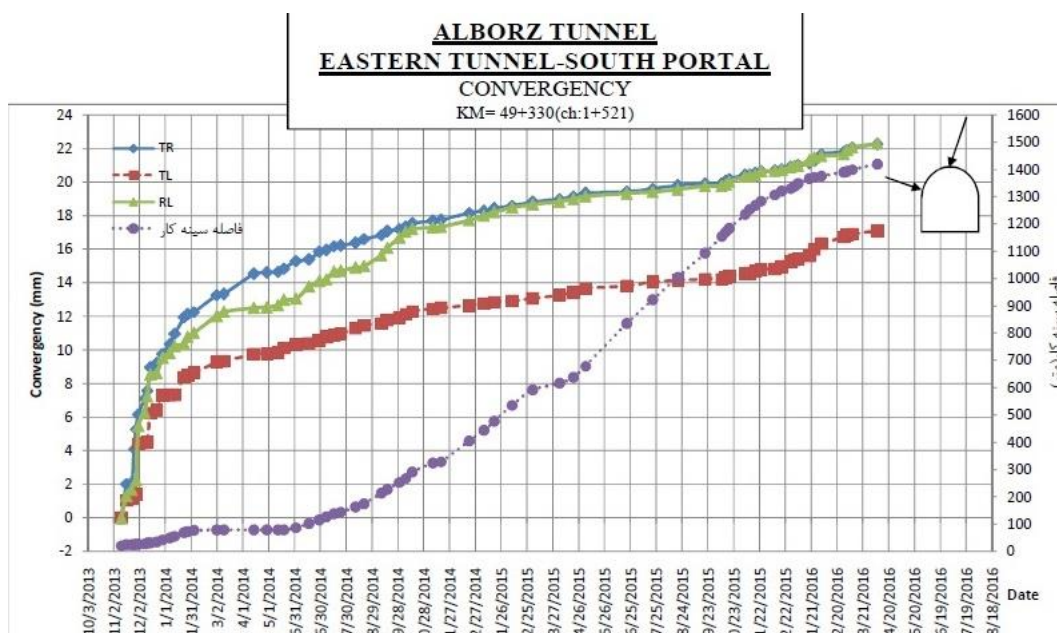
شکل (۵-۶) نمودار نرخ همگرایی در برابر نرخ پیشروی سینه کار در ایستگاه IN003



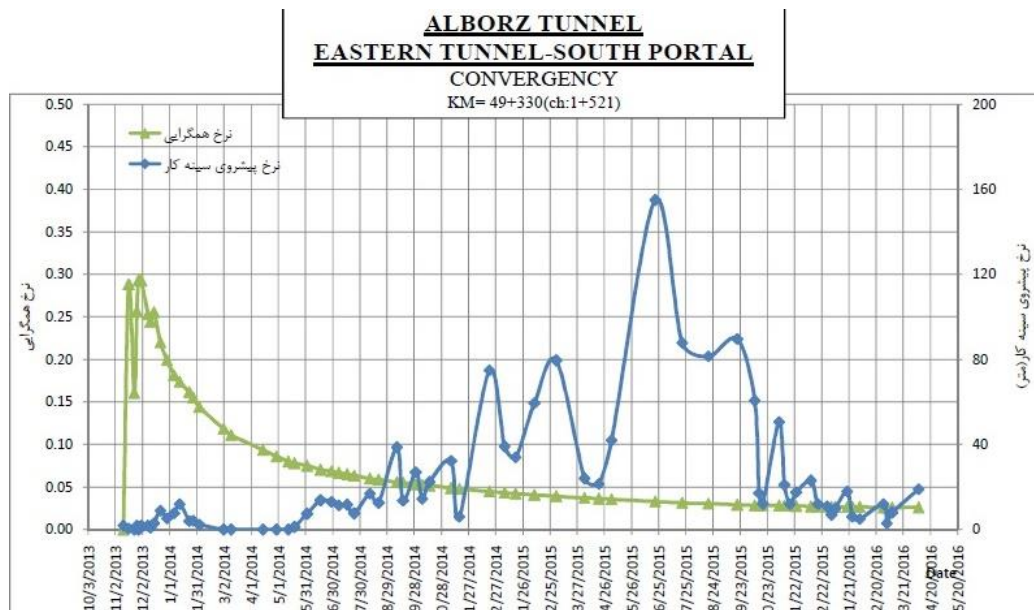
شکل (۵-۷) نمودار قرائت‌های ابزار همگرایی سنجی ایستگاه IS003



شکل (۵-۸) نمودار نرخ همگرایی در برابر نرخ پیشروی سینه کار در ایستگاه IS003



شکل (۵-۹) نمودار قرائت‌های ابزار همگرایی سنجی ایستگاه IS007



شکل (۵-۱۰) نمودار نرخ همگرایی در برابر نرخ پیشروی سینه کار در ایستگاه IS007

در نمودارهای همگرایی سنجی مربوط به مقاطع منتخب برای انجام این پژوهش، کاملاً روشن است که در تمامی مقاطع موردنظر، مقدار جابه‌جایی در دیواره و تاج تونل روندی افزایشی دارد اما با توجه به روش پیشنهادی بنیادین و نمودارهای مربوط به نرخ همگرایی نسبت به سینه کار، کاملاً مشخص است که سیستم نگهداری نصب شده در مقاطع از وضعیت مطلوبی برخوردار است و نیاز به اقدامات بیشتر در این مقاطع وجود ندارد. برخی از افزایش‌ها و یا کاهش‌های ناگهانی در نمودارهای فوق ناشی از خطاهای مرتبط و یا کالیبره نبودن دستگاه‌های رفتارنگاری می‌باشد. بنابراین روند کلی تغییرات همگرایی در ایستگاه‌های مذکور قابل قبول می‌باشد.

فصل ششم

مدل سازی عددی و تحلیل برگشتی
هوشمند تونل البرز

در طی دهه گذشته استفاده از روش‌های عددی مختلف نظیر روش المان محدود^۱، روش المان مرزی^۲ و روش المان مجزا^۳ در زمینه ژئومکانیک گسترش چشم‌گیری داشته است. در سالیان گذشته و با پیشرفت سیستم‌های کامپیوتری و نیاز طراحی سازه‌های ژئومکانیکی به روش‌های عددی استفاده از این روش، توسعه یافته است. با این وجود هنوز هم در طراحی فضاهای زیرزمینی بزرگ، تونل‌ها و سدها نیازمند دقت کافی و قضاوت مهندسی دقیقی می‌باشد. به عبارت دیگر اعتبار و صحت اطلاعات خروجی حاصل از روش‌های عددی بسته به میزان دقت در فرایند جمع‌آوری داده‌های ورودی و آزمایش‌های صحرایی دارد. در واقع شناخت وضعیت دقیق پارامترهای ژئومکانیکی، حالت تنش‌های برجا، وضعیت نفوذپذیری و اندازه‌گیری تغییرشکل‌پذیری امری دشوار است. به منظور کاهش اختلاف میان مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده توسط روش‌های عددی، بایستی اندازه‌گیری‌های برجا انجام شده و این اطلاعات به منظور استفاده در طراحی مورد ارزیابی قرار گیرد. این اطلاعات باید با دقت اندازه‌گیری شده تا بتواند رفتار واقعی سنگ را به میزان قابل قبولی پیش‌بینی کند (بروجنی، ۱۳۸۴).

تخمین پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ روش‌های گوناگونی دارد. یکی از این روش‌ها، روش تحلیل برگشتی می‌باشد. در گذشته استفاده از تحلیل‌های برگشتی با روش‌های ابتدایی و ساده انجام می‌شدند که علاوه بر هزینه‌بر بودن، زمان زیادی را نیز شامل می‌شد. امروزه استفاده از الگوریتم‌های هوشمند جایگزین روش‌های قدیمی تحلیل برگشتی شده است.

در این فصل تحلیل برگشتی تونل البرز به کمک روش‌های هوشمند و با استفاده از مدل‌سازی عددی انجام می‌شود.

¹ -Finite Element Method

² -Boundary Element Method

³ -Distinct Element Method

۶-۲- روش مدل سازی عددی

روش های عددی در فعالیت های مهندسی ژئوتکنیکی از ابتدای دهه ۵۰ مورد توجه قرار گرفتند. از اولین روش های عددی در این زمینه می توان به روش اجزا محدود اشاره کرد. پس از آن و با گسترش فعالیت های کامپیوتری و استفاده از سیستم های سریع روش های عددی نیز وارد مرحله تازه ای شدند به طوری که امروزه می توان برای هر پروژه روش های متعددی را نیز یافت (Huton, 2004). برای مدل سازی توده سنگ یا خاک روش های عددی تحلیل تنش به دو دسته تقسیم می شود:

۱. روش های مرزی^۱ یا انتگرالی^۲:

در این روش ها، تنها مرز خارجی تونل یا حفاریات زیرزمینی به اجزاء کوچکی تقسیم شده و توده سنگ از لحاظ ریاضی به عنوان یک محیط پیوسته نامحدود در نظر گرفته می شود. متداول ترین روش این دسته، روش المان مرزی است. از آن جا که تعداد المان مرزی که در این روش به کار گرفته می شود، محدود است لذا به حجم حافظه کامپیوتر کمتری نیاز دارد.

۲- روش های محیطی یا دیفرانسیلی^۳

در این روش ها، توده سنگی به المان ساده هندسی تفکیک می شود که هریک از ویژگی های خاص خود را دارند و مجموعه این المان فرعی، رفتار کلی این سنگ را بیان می کنند. این گروه شامل روش های زیر می شوند:

روش اجزا محدود^۴

روش تفاضل محدود^۵

روش اجزاء مجزا^۶

¹ -Boundary Method

² -Integral

³ -Differential Method

⁴ -Finite Element Methods

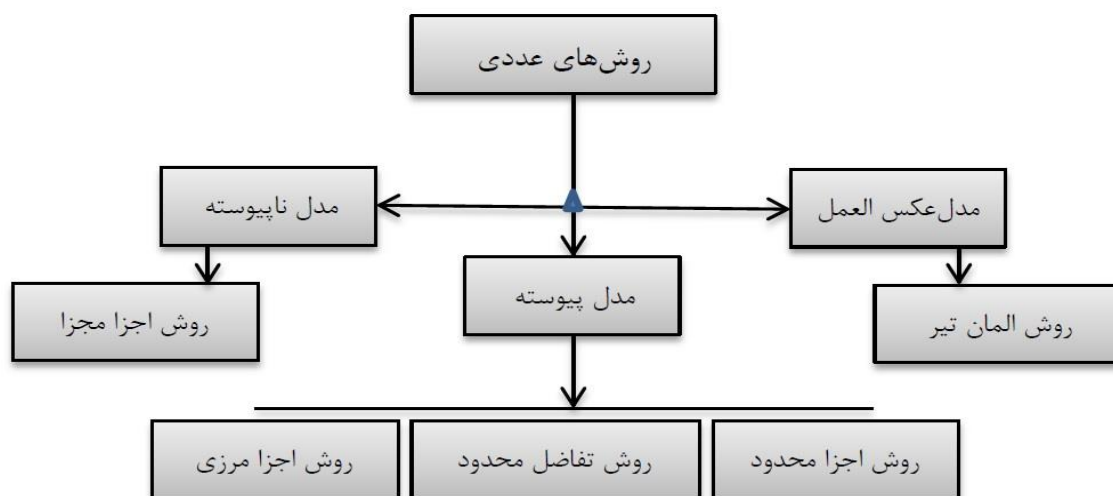
⁵ -Finite Difference Methods

⁶ -Distinct Element Methods

روش اجزاء مرزی

در دو روش اول، توده سنگ به عنوان یک محیط پیوسته در نظر گرفته می شود، در صورتی که در روش المان مجزا، هریک از قطعات سنگی به عنوان عنصر مجزایی مدل سازی می شوند.

در روش های محیطی کوشش بسیاری برای ایجاد یک شبکه بندی صورت می پذیرد تا تقسیم بندی توده سنگ به اجزای کوچک به طور بهینه انجام شود. در مورد شبیه سازی های پیچیده مانند آنچه در فضاهای متعدد نزدیک به هم وجود دارد شبکه بندی می تواند بسیار مشکل باشد. در حال حاضر با ورود برنامه های رایانه ای که دارای گزینه مش بندی هستند، امکان شبکه های بسیار بهینه فراهم شده است (قدیری، ۱۳۸۹). در شکل (۴-۶)، روش های عددی برای مدل سازی توده سنگ و خاک نشان داده شده است.



شکل (۶-۱) انواع روش های عددی (Huton, 2004).

در روش اجزاء مرزی شرایط روی سطح مرز می تواند به موقعیت تمام نقاط در سرتاسر باقی مانده سنگ حتی تا بی نهایت مربوط شود. به عنوان مقایسه، روش اجزاء محدود شرایط چند نقطه درون توده سنگ را به موقعیت درون ناحیه ای بسته که توسط این نقاط تشکیل شده (المان) مرتبط می سازد.

روش اجزا محدود برای حل مواردی که با مواد با خواص ناهمگن و غیرخطی ارتباط دارند مناسب است، زیرا هر جزئی رفتار مواد خاص خود را مدل می‌کند (Huton, 2004).

۳-۶- انتخاب مناسب‌ترین روش عددی

برای انجام یک طراحی به‌وسیله روش‌های عددی باید معایب و محاسن هریک از روش‌های ذکر شده با توجه به اهداف پروژه مشخص شود. اولین و مهم‌ترین گام برای حل مسئله به‌وسیله روش‌های عددی انتخاب محیط پیوسته و ناپیوسته می‌باشد. این مسئله در اولین مرحله می‌تواند تاثیر زیادی در فرایند مدل‌سازی بگذارد. فاکتورهای مختلفی برای شناسایی این دو محیط و انتخاب نوع روش عددی ارائه شده است. اگر توده‌سنگ کم‌درزه و دارای حفاری‌های نسبتاً بزرگی باشد، به طوری که تغییرشکل-پذیری توده‌سنگ بیش از تغییرشکل‌پذیری در امتداد درزه‌ها باشد، در چنین حالتی می‌توان مدل را پیوسته فرض نمود و بنابراین فرضیه پیوستگی مناسب خواهد بود. در نتیجه روش تفاضل محدود و روش اجزا محدود مناسب است. در صورتی که فاصله‌داری درزه‌ها مرتبه‌ای از ابعاد حفاری باشد، در چنین حالتی تغییرشکل‌پذیری در امتداد درزه‌ها، بیشتر از تغییرشکل‌پذیری درون بلوک خواهد بود، بنابراین تئوری ناپیوستگی بسیار مناسب خواهد بود (Sinha, 1989). با توجه به این که در این پایان‌نامه مورد مطالعه در توده‌سنگ حفاری می‌شود، محیط پیوسته در نظر گرفته شده است. بنابراین از نرم‌افزار $FLAC^{3d}$ و $FLAC^{2d}$ ^۱ برای انجام محاسبات عددی در این پژوهش استفاده شده است.

۴-۶- معرفی نرم‌افزار FLAC

نرم‌افزار FLAC یک برنامه تفاضل محدود از مجموعه نرم‌افزارهای شرکت آیتسکا^۲ می‌باشد که برای محیط‌های پیوسته به کار می‌رود. این برنامه بر اساس تحلیل محاسبات لاگرانژی استوار است که برای مدل‌سازی تغییرشکل‌های بزرگ مناسب می‌باشد. با این نرم‌افزار می‌توان مدل رفتاری سازه‌های

^۱ -Fast Lagrangian Analysis of Continua

^۲ -Itasca

خاکی، سنگی و یا سایر مواد را که دارای جریان پلاستیک در هنگام رسیدن به حد تسلیم هستند، شبیه‌سازی کرد. این مدل‌های رفتاری که از پیش تعریف شده می‌باشند، مدل‌های متنوعی را در بر می‌گیرند که شامل مدل تهی (فضای خالی) برای نمایش حفاری‌ها در شبکه، تا مدل‌های تسلیم برشی و حجمی برای نمایش رفتار کرنش سختی و کرنش نرمی و نمایش گسیختگی برشی غیرقابل برگشت و غیرخطی است. برای تجزیه و تحلیل تنش‌ها و تغییر مکان‌ها، مواد را به صورت شبکه‌هایی سه بعدی یا دوبعدی که از المان‌های چندوجهی تشکیل شده است، تعریف می‌کنند. به عنوان مثال محلی که قرار است سازه زیرزمینی در آن حفر شود، به وسیله‌ی شبکه‌ای از المان‌ها نمایش داده می‌شود. این شبکه توسط کاربر طوری طراحی می‌شود که مشابه شکل سازه‌ی موردنظر باشد. هر المان مطابق با یک قانون تنش-کرنش خطی یا غیرخطی و در واکنش به نیروهای وارده یا شرایط مرزی رفتار می‌کند. المان‌ها براساس قانونی که از پیش تعیین می‌شوند، می‌توانند رفتارهای خطی یا غیرخطی از خود نشان دهند و به تسلیم برسند یا جریان یابند. بنابراین شبکه به صورت کرنش بزرگ، تغییر شکل خواهد یافت.

این برنامه از قابلیت‌های زیادی برای تحلیل مسائل برخوردار است که عمده‌ترین کاربرد آن در مسائل ژئوتکنیک می‌باشد. با استفاده از این نرم‌افزار می‌توان مسائل مربوط به سازه‌های زیرزمینی و سطحی مانند طراحی تونل‌ها، پی‌ها و شمع‌ها، شیروانی‌های معدنی و عمرانی و نیروگاه‌هایی که در اعماق زمین قرار دارند را مدل‌سازی کرد. علاوه بر این می‌توان اندرکنش سازه‌هایی مانند پوشش تونل، پیچ-سنگ‌ها^۱، قطعات تسلیم‌پذیر و شمع‌های صفحه‌ای با سنگ یا خاک درون‌گیر را به کمک این نرم‌افزار شبیه‌سازی کرد و اثرات آن‌ها را بر روی پایداری سازه‌های زیرزمینی یا سطحی بررسی نمود.

در این نرم‌افزار امکان مدل‌سازی سطح ناپیوستگی یا سطح لغزش وجود دارد. سطوح ناپیوستگی، سطوحی هستند که امکان لغزش یا جداشدگی آن‌ها وجود دارد. از این رو برای شبیه‌سازی گسل‌ها، درزه‌ها یا مرزهای اصطکاکی استفاده می‌شوند. با استفاده از این نرم‌افزار می‌توان پیوستگی کامل بین

¹ -RockBolt

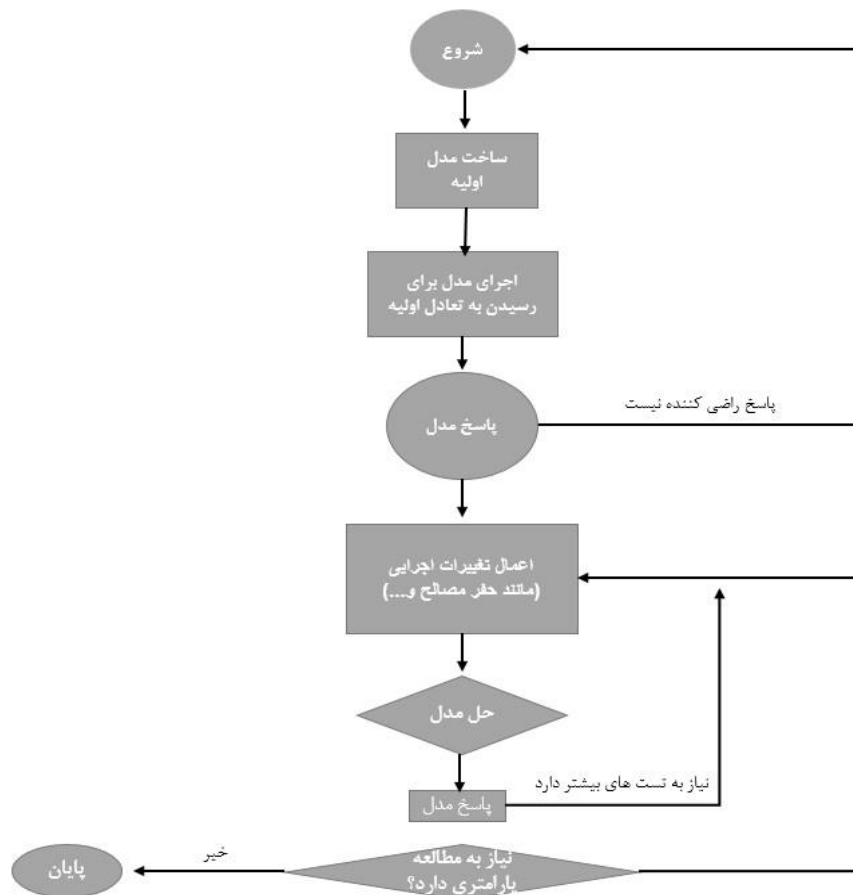
جامد تغییر شکل پذیر متخلخل و یک سیال لزج را که در منافذ آن جریان دارد، مدل سازی کرد. این سیال می تواند از قانون ایزوتروپیک^۱ یا غیر ایزوتروپیک داری پیروی کند. همچنین می توان هر دو نوع جریان یکنواخت و غیر یکنواخت سیال را مدل سازی کرد. علاوه بر این ها یک مدل حرارتی به عنوان یکی از قابلیت های FLAC در دسترس است. یکی از ویژگی های نرم افزار دو بعدی FLAC توانایی استفاده از حالت گرافیکی آن می باشد (کرمی و همکاران، ۱۳۹۱).

۶-۴-۱- مراحل مدل سازی عددی در نرم افزار FLAC

مراحل حل مدل سازی در نرم افزار FLAC به صورت زیر می باشد:

- مدل کردن مساله
 - ایجاد شبکه سه بعدی با توجه به شکل مقطع حفاری و ترتیب حفر آن
 - تعیین شرایط اولیه و مرزی
 - تعریف مدل رفتاری و خصوصیات مواد
 - محاسبه جهت رسیدن به تعادل اولیه
 - حفر مواد و یا تغییر شرایط مرزی
 - محاسبه جهت رسیدن به حالت پایدار
 - تکرار برای تغییرات اضافی
- در شکل (۶-۲) روند حل مسئله در نرم افزار FLAC نشان داده شده است.

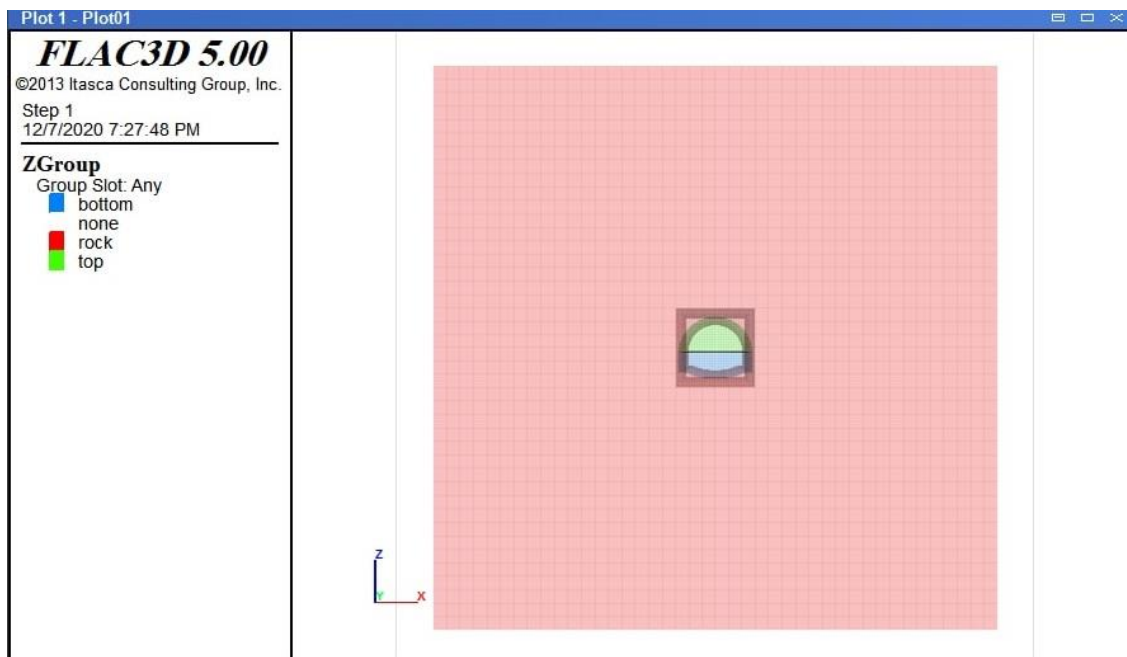
¹ -Isotropic



شکل (۶-۲) روند حل مسئله در نرم افزار FALC (کرمی و همکاران، ۱۳۹۱).

۵-۶- مدل سازی عددی تونل البرز

مدل سازی تونل البرز با استفاده از نرم افزار سه بعدی FLAC انجام شده است. همان طور که پیش تر توضیح داده شد، مدل سازی عددی شامل چندین مرحله مختلف است که به ترتیب برای مدل سازی تونل از آن استفاده شده است. هندسه مدل ساخته شده و شرایط مرزی اولیه در شکل (۵-۳) نشان داده شده است.



شکل (۳-۶) مدل سازی عددی سه بعدی تونل البرز

مدل سازی انجام شده همان طور که در شکل (۳-۶) نیز مشخص است، به صورت تمام مقطع انجام شده است. بدین منظور با استفاده از هندسه تونل اصلی که در فصل پنجم نیز نشان داده شد، انجام شده است.

انتخاب محدوده مناسب از شرایط زمین در اطراف تونل با توجه به ایده اولیه در این رابطه مربوط می شود. بدین صورت که، حل دقیق ریاضی در محیط های پیوسته الاستیک، تا ۳ برابر قطر یک فضای زیرزمینی برآورد می شود. بدین ترتیب در صورتی که زمین به صورت الاستیک رفتار کند، در فاصله ۳ برابر قطر فضای زیرزمینی، تنش ها به وضعیت اولیه خود می رسند. با توجه به بررسی های انجام شده برای یک محیط پیوسته الاستو-پلاستیک اگر ابعاد مدل حدود ۸ تا ۱۰ برابر ابعاد حفره باشد، تحت شرایط مرزی متفاوت درصد خطا به حداقل ممکن کاهش خواهد یافت (قدیری، ۱۳۸۹). قطر فضای حفاری مورد بررسی، در حدود ۱۲ متر می باشد (جنرال مکانیک، ۱۳۹۳) و با توجه به این مسئله ابعاد مدل به صورت یک فضای ۵۰ در ۵۰ متر در نظر گرفته شده است.

در ادامه به صورت تفصیلی مراحل مدل سازی آورده شده است.

۶-۵-۱- انتخاب مقطع مناسب جهت انجام مدل سازی عددی

برای انجام مدل سازی عددی جهت انجام فرایند تحلیل برگشتی، باید مقاطع مناسبی که دارای اطلاعات کاملی هستند، پایش شده و استفاده شوند. با مطالعه گزارش های مختلف زمین شناسی و هم-چنین داده های ابزار دقیق تونل البرز، سه مقطع جهت انجام مدل سازی عددی استفاده شدند. از بین ایستگاه های دهانه شمالی، ایستگاه IN003 و از بین ایستگاه های دهانه جنوبی، ایستگاه های IS005 و IS007 جهت فرایند مدل سازی عددی انتخاب شدند.

مشخصات سازندهای مورد مطالعه به طور کلی در فصل قبل آورده شده است. با مطالعه دقیق گزارش های زمین شناسی منطقه پارامترهای مورد استفاده در این سیستم به صورت کامل در جدول (۶-۱) آورده شده است. انتخاب این مقاطع با توجه به تفاوت های سازندی که دارند، باعث می شود سیستم تحلیل برگشتی برای سازندهای موجود الگوی مناسبی را نیز داشته باشد. هم چنین نوع تحکیم مورد استفاده در این سه ایستگاه، تیپ تحکیم C می باشد که همان طور که پیش تر نیز توضیح داده شد، بیش از ۸۰ درصد تیپ های تحکیم استفاده شده در تونل البرز از همین نوع می باشد.

جدول (۶-۱) مقادیر اولیه مورد استفاده برای انتخابی مدل سازی عددی.

نام ایستگاه	سازند (نماد)	UCS (MPa)	GSI	وزن مخصوص (kn/m ³)	لیتولوژی	E (Mpa)	ضریب پواسون
IN003	شمشک (Js)	۱۰_۸۱_۱۹۵	۳۰_۴۵_۶۸	۲۴_۲۶/۳_۲۹	آرژلیت- ماسه سنگ	۳۵۰۰_۸۰۰۰	۰/۲۴_۰/۱۶
IS003	کرچ (eq)	۵_۶۸_۱۱۳	۳۸_۶۵_۷۸	۲۴_۲۶/۵_۳۰	توف- ماسه سنگ	۴۰۰۰_۷۶۰۰	۰/۲۵_۰/۲۳
IS007	کرچ (Ekt ^۳)	۴۷_۹۳_۱۳۵	۳۵_۵۲_۸۲	۲۵_۲۶/۵_۳۰	توف خاکستری	۵۶۰۰_۱۱۰۰۰	۰/۲۴_۰/۱۶

۶-۵-۲- انتخاب مناسب‌ترین مدل رفتاری

پس از آن که هندسه اولیه و شرایط مرزی مشخص شدند، باید یک مدل رفتاری مناسب برای انجام محاسبات در نظر گرفته شود. در اکثر مطالعات مشابه، مدل رفتاری انتخاب شده، مدل رفتاری موهر-کلمب^۱ بوده است. برای آن که در این مطالعه نتایج تحلیل برگشتی به صورت دقیق‌تری به دست آید، به مقایسه مدل‌های رفتاری موهر-کلمب و هوک-براون^۲ پرداخته شده است.

تحلیل جابه‌جایی در اطراف فضاها و زیرزمینی یکی از مسائل مهم در طراحی این‌گونه سازه‌ها می‌باشد. انتخاب مدل رفتاری مناسب که نتایج نزدیک‌تری به واقعیت نیز داشته باشد، می‌تواند در حل صحیح مدل‌های عددی کمک کند. با توجه به این که معیار هوک-براون مقادیر ورودی بیشتری نسبت به معیار موهر-کلمب لحاظ می‌کند، مدل طراحی شده با استفاده از این معیار به شرایط واقعی زمین نزدیک‌تر بوده که همین مسئله سبب بالاتر بودن دقت محاسبات و قابل اطمینان‌تر بودن طراحی می‌باشد. چنانچه در فعالیت‌های مهندسی مبنای انتخاب سیستم نگهداری معیار هوک-براون باشد، سیستم نگهداری مورد نیاز نسبت به مقادیر پیش‌بینی شده معیار موهر-کلمب باید دارای ظرفیت بیشتری باشد. با توجه به اینکه در عمده تحلیل‌های مهندسی و طراحی مبتنی بر روش موهر-کلمب پارامترهای معادل این مدل رفتاری با استفاده از برازش خطی مدل هوک انجام می‌شود، پیشنهاد می‌شود که برای سازه‌های زیرزمینی مهم، از مدل رفتاری هوک و براون و بصورت مستقیم استفاده شود (بنی‌جمالی و همکاران، ۱۳۹۹). رابطه کلی هوک-براون به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^{0.5} \quad (۱-۶)$$

با توجه به مطالب گفته شده، در این پژوهش مد رفتاری هوک-براون به عنوان مدل رفتاری مورد نظر برای انجام آنالیز عددی انتخاب شده است. حدود مقادیر توده‌سنگ‌های مورد استفاده در این پژوهش

^۱ -Mohr-Coloumb Criteria

^۲ -Hoek-Brown Criteria

با توجه به شرایط موجود و استفاده از مماس خطی هوک برای آنالیزهای عددی در جدول (۲-۶) آورده شده است. این مقادیر براساس داده‌های سنگ بکر منطقه مورد مطالعه برآورد شده است. حدود مقادیر توده‌سنگ علاوه بر مقدار GSI و UCS سنگ، به مقدار M_i که مرتبط با خواص لیتولوژی سنگ بکر نیز می‌باشد، مربوط است. این مقدار با توجه به داده‌های موجود در هر سازند برآورد شده و قرار داده شده است.

جدول (۲-۶) حدود مقادیر پارامترهای توده‌سنگ مورد استفاده در آنالیز عددی.

مقطع	حدود GSI	حدود Md	حدود S
IN003	۶۸_۴۵_۳۰	۶ _ ۰/۵۷۵	۰/۰۲۸۶ _ ۰/۰۰۰۴
IS003	۷۸_۶۸_۳۸	۶/۸ _ ۰/۸	۰/۰۸۶۸ _ ۰/۰۰۰۹
IS007	۸۲_۵۲_۳۵	۷ _ ۰/۷	۰/۲ _ ۰/۰۰۰۷

۳-۵-۶- اعمال شرایط مرزی و اعمال تنش‌ها

برای اعمال تنش‌های اولیه، از داده‌های موجود در گزارش‌های ابزاربندی استفاده شده و از حاصل ضرب چگالی در ارتفاع روباره استفاده شده است. رابطه (۲-۶) نحوه به‌دست‌آوردن تنش قائم را نشان می‌دهد.

$$\sigma_v = \gamma H \quad (۲-۶)$$

برای به‌دست‌آوردن مقدار تنش افقی نیز می‌توان از روابط مربوط به تنش‌ها استفاده کرد. علاوه بر این حدود مقادیر K نیز برای هر مقطع مشخص شده است. برای آن‌که مقادیر نسبت تنش‌ها به صورت دقیق‌تری استفاده شود، از روابط مخصوص به آن‌ها استفاده می‌شود. روابط معمول قابل استفاده

شامل رابطه‌های ترزاقی، شئوری^۱ و هوک و براون می‌باشد. در عمده مسائل مهندسی فضا‌های زیرزمینی از روابط ترزاقی و شئوری استفاده می‌شود. حدود مقدار نسبت تنش‌ها نیز در این پژوهش با استفاده از این دو رابطه به دست آمده است. روابط مربوط در جدول (۳-۶) آورده شده است.

جدول (۳-۶) روابط مختلف مورد استفاده برای بدست آوردن نسبت تنش‌های افقی به قائم (شریف‌زاده،

۱۳۹۰).

شماره رابطه	نام رابطه	فرمول رابطه
۱	ترزاقی	$k = \frac{\nu}{1 - \nu}$
۲	شئوری	$k = 0.33 + 9.5E_n(0.001 + \frac{1}{Z})$
۳	هوک براون	$\frac{100}{Z} + 0.3 < K < \frac{1500}{Z} + 0.5$

با توجه به شرایط معرفی شده در بخش‌های قبلی و پارامترهای مربوط به هر مقطع می‌توان حدود مقدار نسبت تنش‌ها را از روابط ترزاقی و شئوری به دست آورد. برای آن که نتایج دقیق‌تر باشد، میانگین مقادیر به دست آمده از دو رابطه برای مقاطع مورد استفاده لحاظ شده است. مقادیر پارامترهای ورودی و میانگین محاسبه شده برای هر مقطع در جدول (۴-۶) آورده شده است.

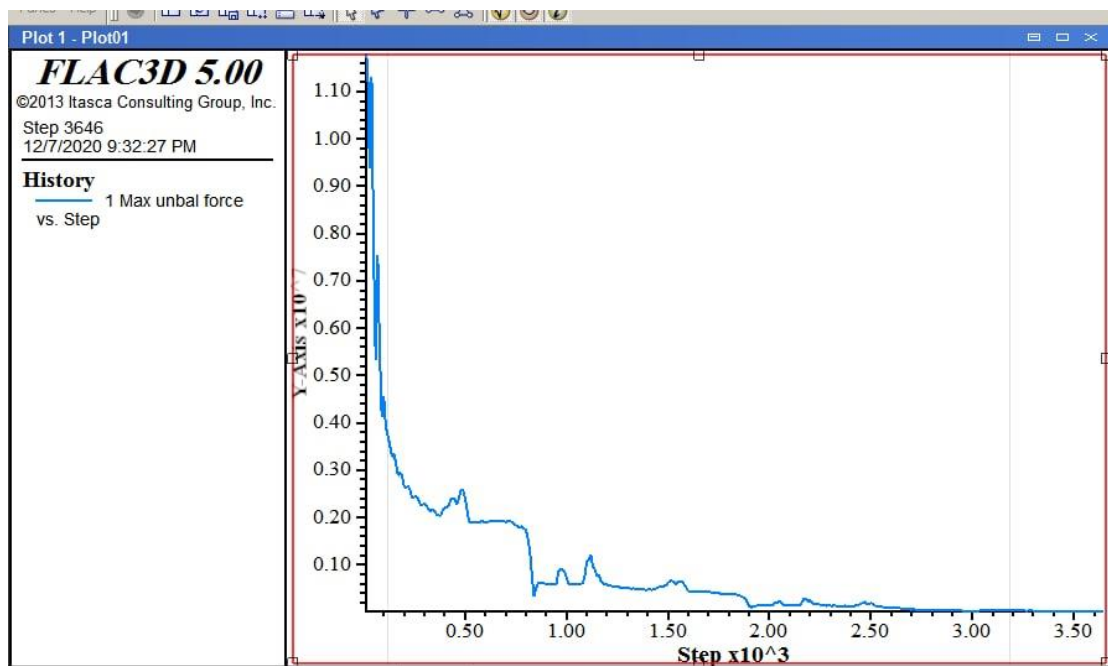
¹ -Sheoury

جدول (۴-۶) حدود مقادیر نسبت تنش‌های محاسبه شده برای هر مقطع

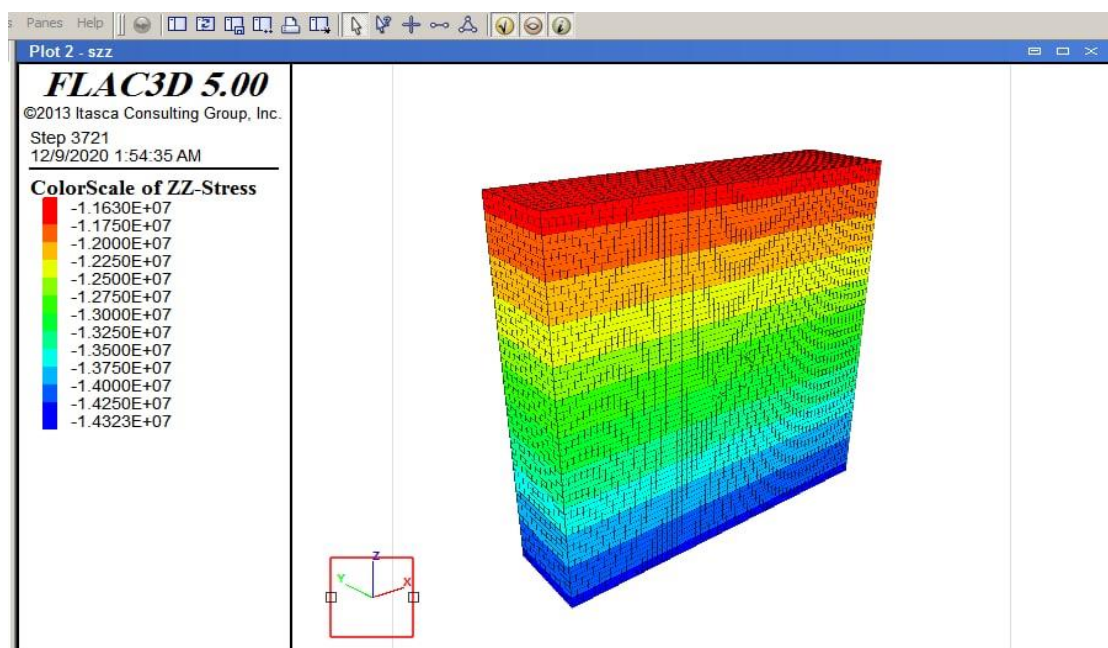
مقطع	حدود E(MPa)	حدود ضریب پواسون	ارتفاع روباره (m)	میانگین K
IN003	۸۰۰۰_۳۵۰۰	۰/۲۴_۰/۱۶	۱۲۰	۰/۴۹_۰/۳۳
IS003	۷۶۰۰_۵۷۰۰	۰/۲۵_۰/۲۳	۳۹۰	۰/۴۷_۰/۳۳
IS007	۱۱۰۰۰_۵۸۰۰	۰/۲۴_۰/۱۶	۵۸۰	۰/۴۸_۰/۳

۴-۵-۶- تعادل اولیه در مدل

پیش از این که حفاری مدل آغاز گردد، مدل اجرا می‌شود. این کار برای تطبیق شرایط برجا با شرایط مدلسازی و براساس پیشنهاد (ITASCA) صورت می‌گیرد. در این مرحله نشان داده می‌شود که مدل‌سازی صورت گرفته صحیح است یا خیر؟ ثابت شدن جابه‌جایی‌ها، به صفر میل کردن نیروهای نامتعادل‌کننده و سرعت گره‌ای و در صورت وجود تنش‌های برجا، یکنواخت شدن کانتورهای تنش‌های برجا از عوامل اصلی برای اثبات حل صحیح مسئله می‌باشد. پس از این مرحله و در صورت درستی نتایج، باید جابه‌جایی‌ها و سرعت گره‌ها در مدل صفر شود. در شکل (۴-۶) نیروهای نامتعادل‌کننده نشان داده شده است. در شکل (۵-۶) نیز کانتورهای تنش‌های افقی نشان داده شده است.



شکل (۴-۶) نمودار نیروهای نامتعادل کننده در مدل سازی عددی



شکل (۵-۶) کانتورهای تنش های برجای افقی قبل از حفاری تونل

۵-۵-۶- حفاری و اعمال سیستم نگهداری

پس از آن که جابه جایی های اولیه و سرعت های گره ای در مدل صفر شوند، حفاری تونل برای مقطع بالا انجام می شود. مقدار گام حفاری برای تونل البرز و در مقاطع مورد استفاده در این پژوهش،

۱/۲۵ متر می باشد. برای انجام حفاری، ابتدا بخش بالایی حفاری شده و مدل دوباره به تعادل خواهد رسید. سپس سیستم نگهداری با توجه به هریک از مقاطع مختلف برای بخش بالایی اعمال می شود. سپس مدل به تعادل رسیده و این مراحل دوباره برای مقطع پایینی نیز تکرار خواهد شد.

برای انجام کار تحلیل برگشتی باید هرآنچه را در واقعیت برای ساخت سازه موردنظر اتفاق افتاده در مدل سازی نیز اعمال شود. بنابراین در این مرحله نیز هر نوع سیستم نگهداری که در واقعیت برای تونل ها اجرا شده است، در مدل سازی هم باید سعی شود که آن سیستم نگهداری اعمال شود. برای مقاطع مختلف انتخاب شده، از سیستم تحکیم نوع C استفاده شده است که مشخصات کلی آن در فصل پنجم و در جدول (۵-۱) نیز آورده شده است. در مقاطع انتخاب شده از سیستم نگهداری شامل ترکیب مش فولادی و شاتکریت و سپس نصب راک بولت های تزریقی استفاده شده است. خصوصیات سیستم نگهداری استفاده شده در مدل ها در جدول (۵-۶) و (۶-۶) آورده شده است.

جدول (۵-۶) خصوصیات راک بولت استفاده شده در مدل سازی (GDE, 2015).

مقدار	خصوصیات (واحد)
۴.۵	طول میلگرد (m)
۲۵	قطر میلگرد (mm)
۲۰۰	مدول الاستیسیته (GPa)
۱۹۰	مقاومت کششی (Kn)
۱.۵*۱.۵	آرایش راک بولت (m)

شکل (۶-۶) خصوصیات شاتکریت و مش فولادی استفاده شده در مدل سازی (GDE,2015).

مقدار	خصوصیات (واحد)
۱۵-۲۵	ضخامت شاتکریت (cm)
۲۰	مدول یانگ ۲۸ روزه بتن (GPa)
۰.۲	ضریب پواسون بتن
۰.۹	مقاومت کششی بتن (MPa)
۲۵	وزن مخصوص بتن (Kn/m^3)
($\phi 6\text{mm}$, 100mm*100mm)	مش فولادی

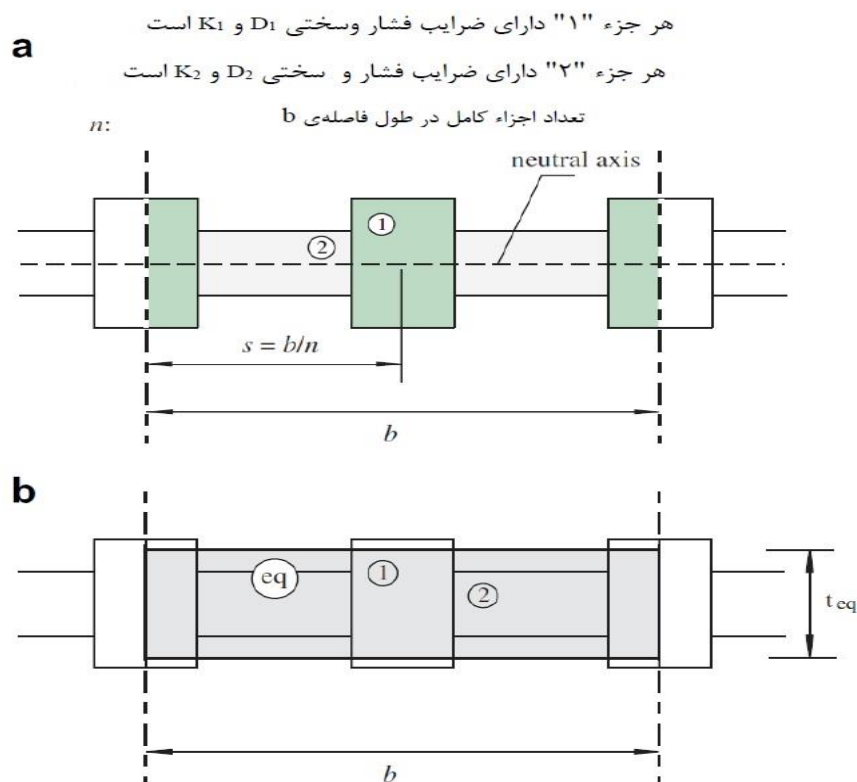
برای مدل سازی شاتکریت و مش فولادی در فرایند مدل سازی لازم است که از روش حل مقاطع مختلط استفاده شود. این روش به خوبی در تحلیل های مهندسی سازه شناخته شده است. رفتار لایه نگهدارنده ی تونل که مقطع متشکل از دو ماده ی مختلف است، براساس تئوری ارتجاعی پوسته ها و رفتار تیرهای منحنی به شکل (۶-۶) خواهد بود (باسلیقه و همکاران، ۱۳۹۲).

شکل (۶-۶) نشان دهنده ی ترکیب دو ماده ی مختلف برای استفاده از این روش می باشد. این مقطع نشان دهنده ی لایه نگهدارنده به عرض b ، شامل n واحد از ماده ی ۱ (مثلا مجموعه پروفیل های فولادی) و n واحد از ماده ی ۲ (به عنوان مثال شاتکریت) است. باید توجه کرد که n واحد از هریک از مواد در امتداد عرض b وجود دارد. این بیان به این معناست که هریک از واحدها با فاصله ی $s=b/n$ از یکدیگر قرار گرفته اند. هریک از واحدها با تعاریفی برای ضرایب فشار به ترتیب D_1 و D_2 و ضرایب

انعطاف‌پذیری به ترتیب K_1 و K_2 نشان داده شده‌اند. در به‌دست آوردن این روابط از فرض تقارن نسبت به محور افقی مشترک (محور خنثی مقطع) استفاده گردیده است (Torres & Diredrich, 2008).

پارامترهای ضرایب فشار D و انعطاف‌پذیری K به شکل زیر تعریف می‌شوند:

$$D = \frac{EA}{1-\nu^2} \quad (3-6)$$



شکل (۶-۶) نمایش نمادین معادل‌سازی یک مقطع از لایه نگهدارنده شامل مواد مختلف ۱ و ۲ (Torres &

Diredrich, 2008).

رابطه‌ی (۴-۶) برای تعیین K در مقطع در حالت کرنش صفحه‌ای می‌باشد:

$$K = \frac{EA}{1-\nu^2} \quad (4-6)$$

در روابط E مدول الاستیسیته، A سطح مقطع، I ممان اینرسی و ν نسبت پواسون ماده است. پس از محاسبه روابط بالا ضخامت مقطع معادل (t_{eq}) و مدول الاستیسیته معادل (E_{eq}) از روابط زیر به دست می آید.

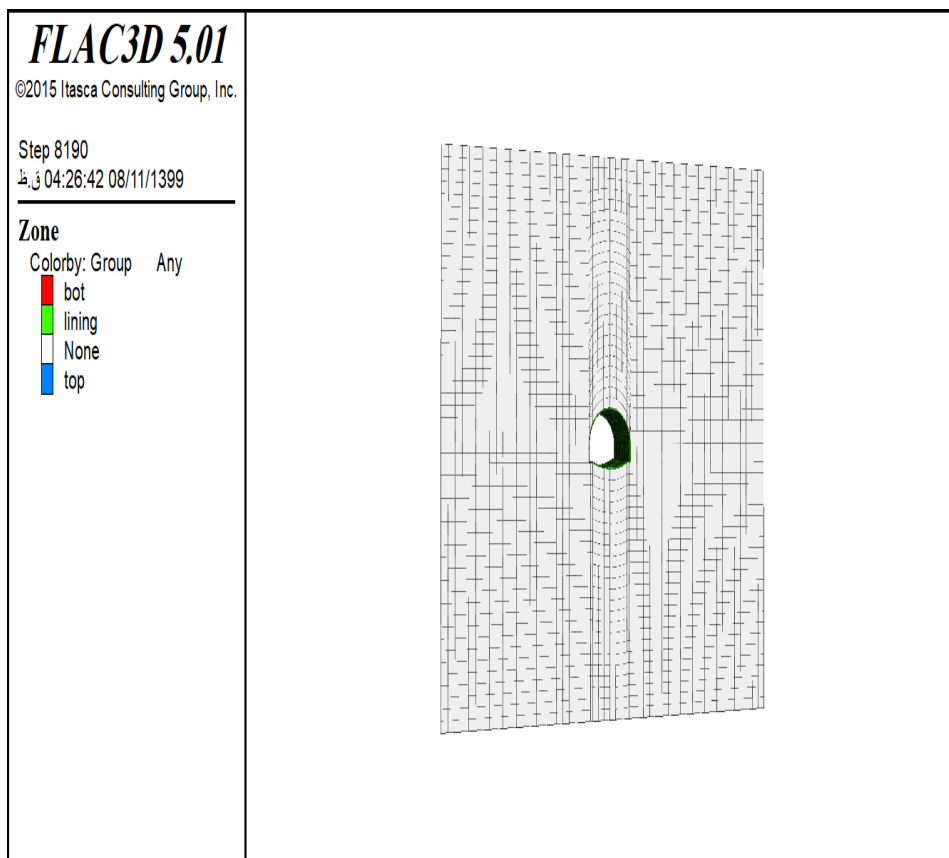
$$t_{eq} = \sqrt{12 \frac{K_1 + K_2}{D_1 + D_2}} \quad (۵-۶)$$

$$E_{eq} = \frac{n(D_1 + D_2)}{bt_{eq}} \quad (۶-۶)$$

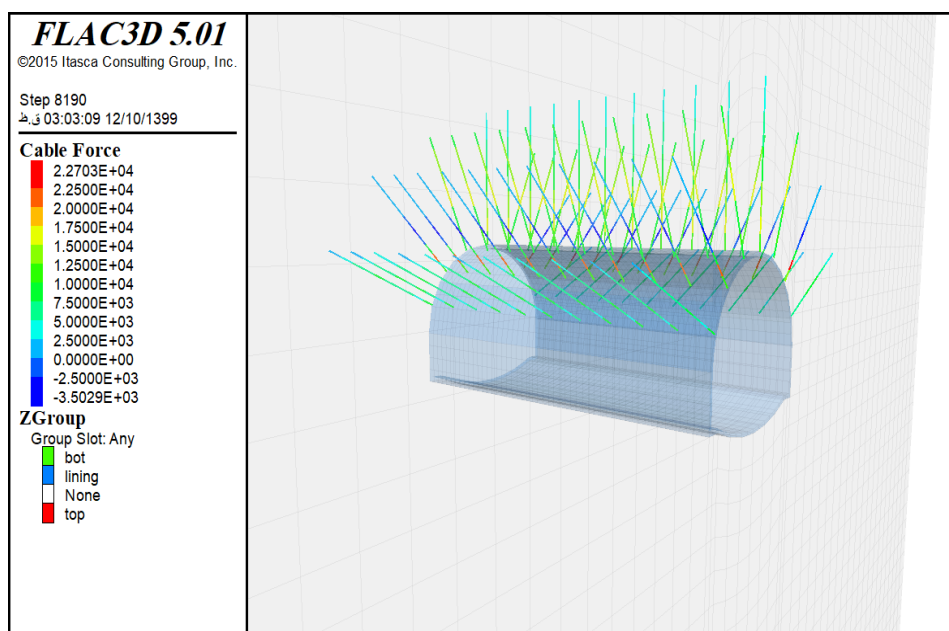
لازم به ذکر است که برای اعمال سیستم‌های نگهداری به مدل، از المان کابل^۱ برای نصب راک-بولت و از المان پوشش^۲ برای مدل‌سازی مقطع معادل شامل شاتکریت و مش فولادی استفاده شده است. تصویر مدل حفاری شده و سیستم نگهداری اعمال شده در مقطع تونل در شکل (۶-۷) و شکل (۶-۸) نشان داده شده است.

^۱ -Cable

^۲ -Liner



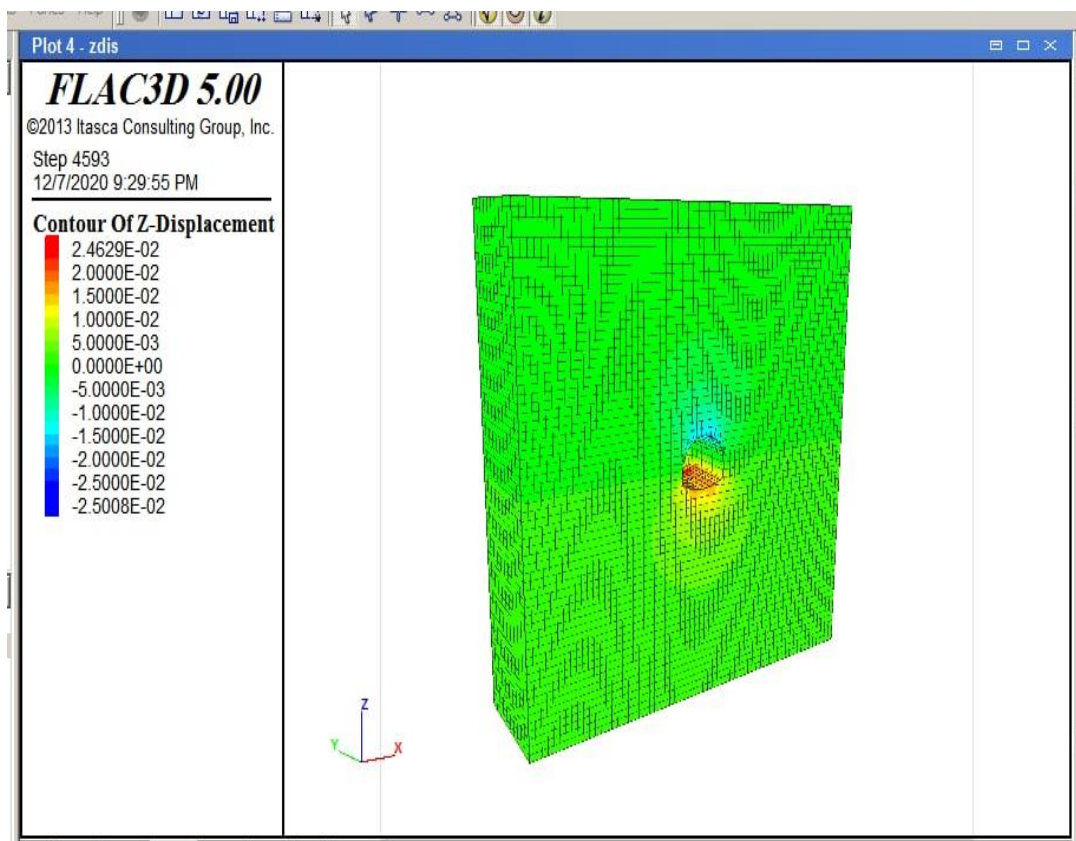
شکل (۷-۶) حفاری انجام شده در مدل سازی عددی تونل البرز



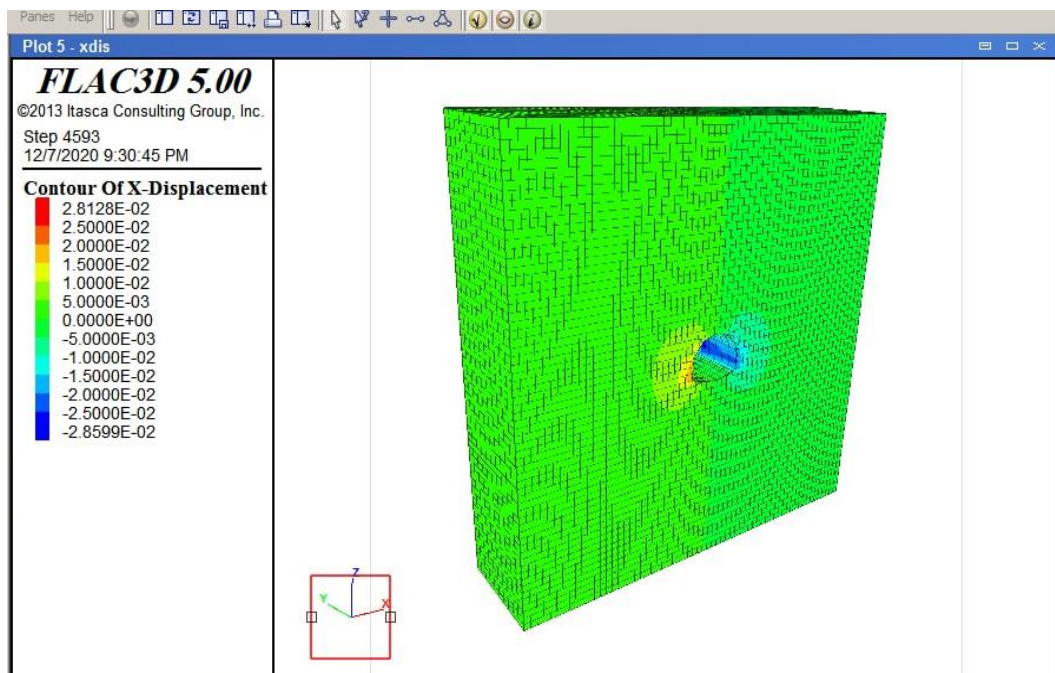
شکل (۸-۶) تصویر سیستم های نگهداری اعمالی با استفاده از نرم افزار FLAC

۶-۵-۷- بررسی نتایج آنالیز عددی

با در نظر گرفتن روند پیشرفت حفاری در تونل، مقادیر جابه‌جایی برای هر سه مقطع در دو دیواره راست و چپ تونل و سقف تونل برآورد شده است. هدف از انجام آنالیز عددی همان‌طور که پیش‌تر نیز توضیح داده شد، رسیدن به مقادیر مختلف جابه‌جایی‌ها در تونل به منظور برآورد پارامترهای ژئومکانیکی و تنش‌های برجای توده‌سنگ می‌باشد. بدین منظور برای برآورد سیستم منطقی آنالیز برگشتی باید مدل‌های مختلفی برآورد شود، تا سیستم آنالیز برگشتی بهترین پارامترها را پیش‌بینی کند. هدف از انجام مدل‌سازی مختلف، تولید زوج‌داده‌های ورودی-خروجی و تعیین شرایط موجود در ایستگاه‌های رفتارنگاری تونل البرز است. نمودارهای شکل‌های (۶-۹) و (۶-۱۰) مقدار جابه‌جایی‌های حاصل از مدل-سازی عددی را به ترتیب در جابه‌جایی‌های قائم و افقی را به همراه کانتورهای جابه‌جایی نشان می‌دهد



شکل (۶-۹) نتایج جابه‌جایی‌های قائم حاصل از مدل‌سازی عددی در تونل البرز



شکل (۶-۱۰) نتایج جابه‌جایی‌های افقی حاصل از مدل‌سازی عددی در تونل البرز

۶-۶-۶- تحلیل برگشتی تونل البرز

پس از آن‌که مدل‌های عددی ساخته شود و شرایط کلی منطقه به وسیله روش عددی تخمین زده شود، می‌توان تحلیل برگشتی تونل را انجام داد. بدین منظور ابتدا مدل‌های مختلفی از سه مقطع انتخاب شده تجزیه و تحلیل می‌شود. شرایط‌های مختلفی که می‌تواند در منطقه روی دهد، تجزیه و تحلیل می‌شود و سپس می‌توان با استفاده از یک روش تحلیل برگشتی مقادیر واقعی را تخمین زد. در این پژوهش همان‌طور که پیشتر نیز گفته شد، روش تحلیل برگشتی به صورت هوشمند و با استفاده از الگوریتم‌های PSO و SVM انجام خواهد گرفت. در ادامه به روند انجام تحلیل برگشتی پرداخته خواهد شد.

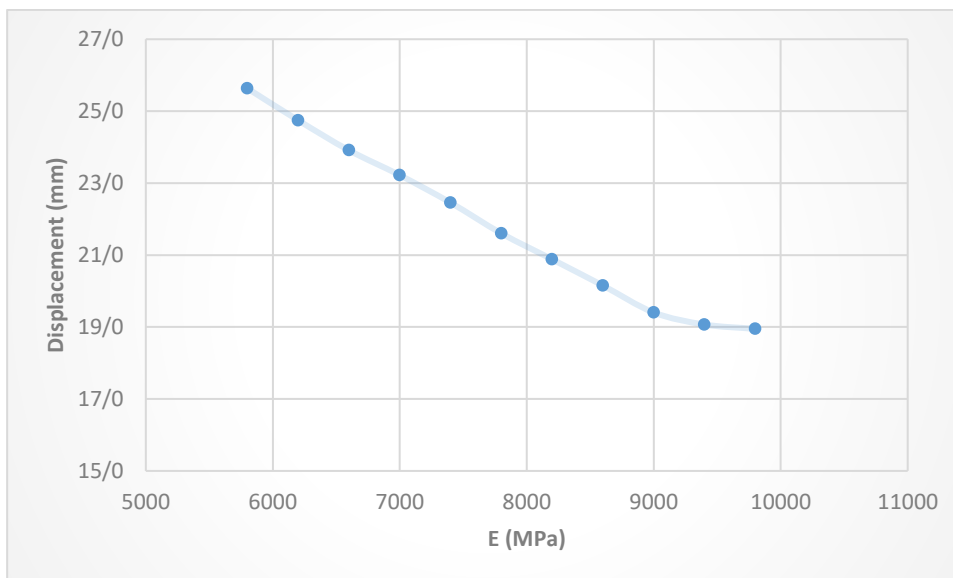
۶-۶-۱- تولید داده‌های ورودی و خروجی جهت انجام تحلیل برگشتی

یک سیستم تحلیل برگشتی شامل یکسری داده‌های ورودی و یکسری خروجی‌های متناظر با آن است. برای تولید این ورودی‌ها برای طراحی سیستم هوشمند تحلیل برگشتی در این مطالعه، ورودی‌های سیستم به شرح زیر می‌باشد:

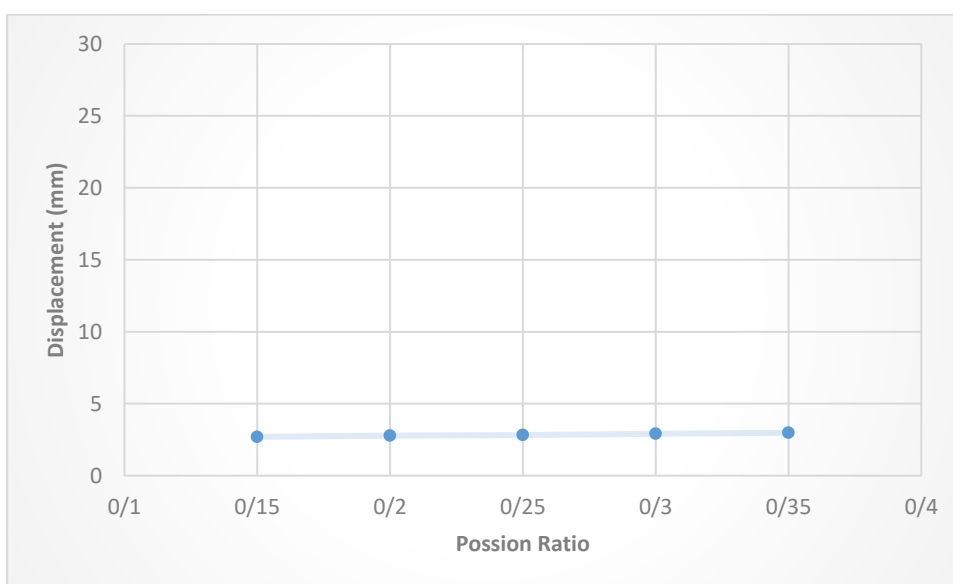
- مدول الاستیسیته
- ضریب پواسون
- مقدار M_d
- مقدار S
- نسبت تنش‌ها

برای تحلیل حساسیت در سیستم هوشمند تحلیل برگشتی موردنظر، خروجی متناظر با ورودی-های ذکر شده شامل جابه‌جایی سقف و دیواره‌های تونل البرز می‌باشد. در واقع اگر تعداد پارامترهای ورودی بیشتر باشد، نیاز به زمان بیشتری برای انجام محاسبات لازم خواهد بود. در واقع زمان لازم برای انجام تحلیل برگشتی وابسته به تعداد پارامترهای ورودی است. بنابراین هرچه تعداد پارامترهای ورودی بیشتر باشد، به همین میزان روند و زمان انجام محاسبات نیز بیشتر خواهد بود. با توجه به این باید در چنین حالتی اگر متغیری اثر زیادی بر روی جابه‌جایی ندارد از سیستم حذف شود تا سرعت عملیات بالاتر رود (قیاسی فریز، ۱۳۸۹).

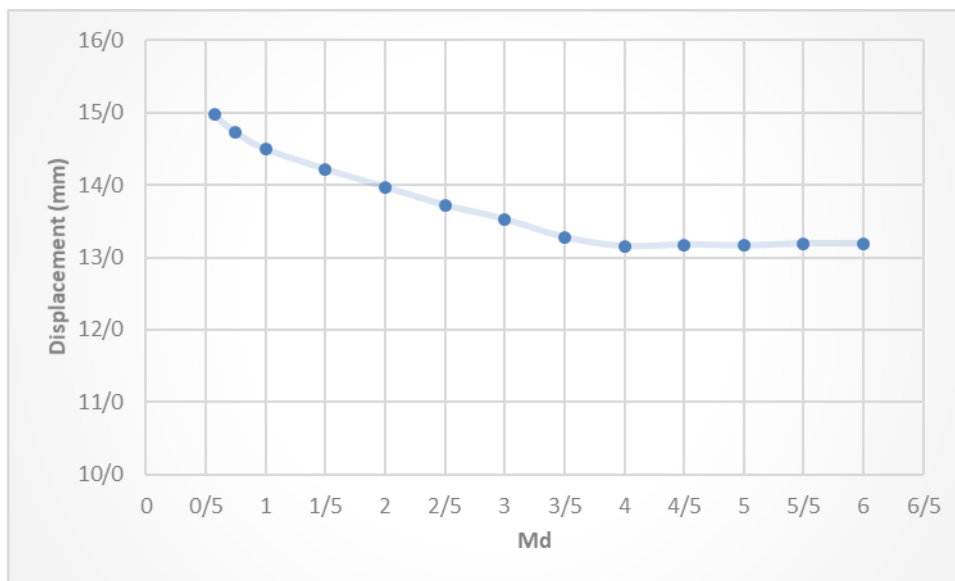
جهت تعیین ورودی‌هایی که اثر مثبت و معنی‌داری در پیش‌بینی سیستم ندارند، از تحلیل حساسیت استفاده شد. بدین منظور میزان تاثیرات ناشی از تغییرات هر پارامتر ورودی بر خروجی با استفاده از نرم‌افزار FLAC بر روی یک محیط یکسان و در شرایط یکسان بررسی شد، نتایج حاصل از تحلیل حساسیت برای هر پارامتر، در شکل‌های (۶-۱۱) تا (۶-۱۵) آورده شده است. در نمودارهای ذکر شده محور افقی پارامترهای مدول الاستیسیته، نسبت تنش‌ها، ضریب پواسون و پارامترهای مدل رفتاری هوک-براون می‌باشد، هم‌چنین محور قائم مقدار جابه‌جایی افقی بر حسب میلی‌متر است.



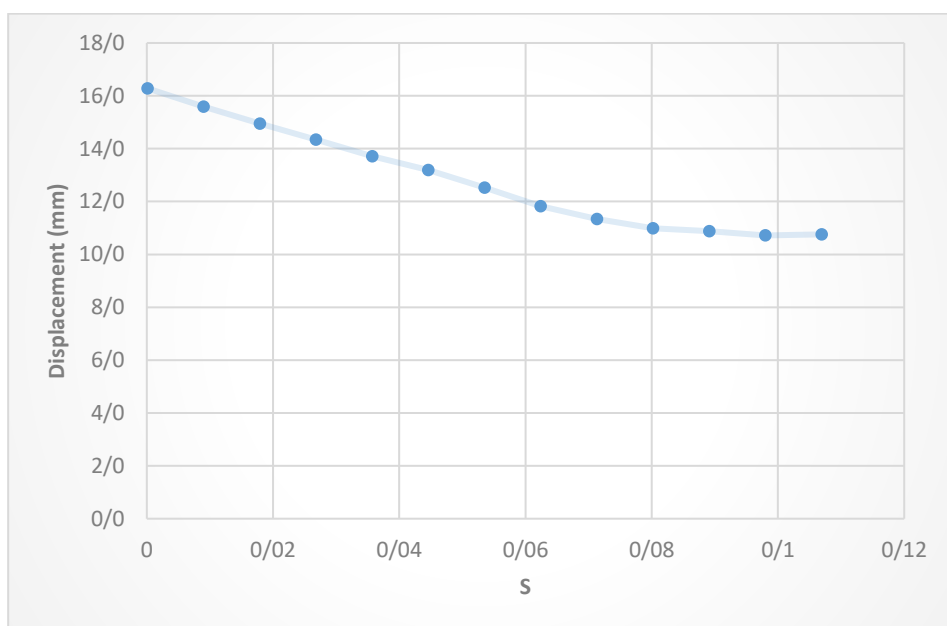
شکل (۱۱-۶) نمودار تحلیل حساسیت برای پارامتر مدول الاستیسیته در برابر جابه‌جایی



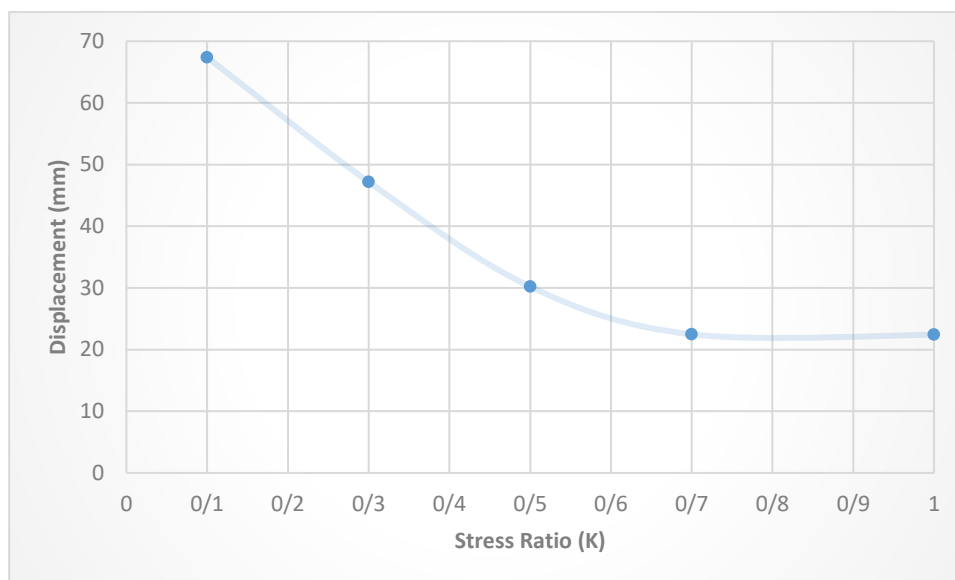
شکل (۱۲-۶) نمودار تحلیل حساسیت ضریب پواسون در برابر جابه‌جایی



شکل (۶-۱۳) نمودار تحلیل حساسیت پارامتر M_d در برابر جابه‌جایی



شکل (۶-۱۴) نمودار تحلیل حساسیت پارامتر S در برابر جابه‌جایی



شکل (۶-۱۵) نمودار تحلیل حساسیت پارامتر k در برابر جابه‌جایی

با توجه به نتایج تحلیل حساسیت مشاهده شد که پارامترهای مدول الاستیسیته، نسبت تنش‌ها، M_d و S تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر روی سیستم دارند اما پارامتر ضریب پواسون تاثیر چندانی بر روی جابه‌جایی‌های حاصل ندارد. نکته قابل توجه در نمودارهای شکل (۶-۱۳) و (۶-۱۴) آن است که نمودار روند جابه‌جایی‌ها برای این مقادیر از نقطه‌ای تقریباً بی اثر می‌شود. این مورد با توجه به اینکه هر دو پارامتر رابطه مستقیمی با GSI دارند، قابل توجه خواهد بود، یعنی روند نمودار نشان می‌دهد که در مقادیر بالای GSI تاثیر جابه‌جایی بسیار کم و قابل چشم‌پوشی می‌باشد. با توجه به مقادیر به دست آمده از نمودارهای ذکر شده، می‌توان گفت از حدود GSI بالاتر از ۴۵ تقریباً تاثیر مقادیر پارامترهای هوک-براون بی اثر می‌باشد اما با توجه به اینکه قبل از این مقدار تاثیر زیادی در روند جابه‌جایی‌ها دارند در سیستم تحلیل برگشتی قرار خواهند گرفت. بنابراین پارامترهای M_d ، S ، مدول الاستیسیته و نسبت تنش‌ها به عنوان ورودی‌های مدل در نظر گرفته شدند.

۶-۶-۲- تولید زوج داده‌های مورد نیاز برای طراحی سیستم تحلیل برگشتی هوشمند

برای انجام یک تحلیل برگشتی صحیح، نیاز به تعدادی زوج داده‌های ورودی و خروجی متناظر با آن می‌باشد. انتخاب یک مجموعه آموزشی مناسب، از اهمیت زیادی برخوردار است و باید دامنه مناسبی

مشخص است که بلافاصله پس از حفاری تونل مقدار جابه‌جایی در توده‌سنگ اطراف تونل بسیار زیاد است. در این باره و برای حل این مشکل در مدل‌سازی‌های عددی اغلب از دو روش استفاده می‌شود.

اگر روش مدل‌سازی عددی به صورت دوبعدی انجام شود، می‌توان مقادیر ترخیص تنش محاسبه شده را برای تاثیر سه‌بعدی سینه‌کار و هم‌چنین تعیین جابه‌جایی‌های اولیه و اضافه کردن آن‌ها به مقادیر اندازه‌گیری شده نهایی در ابزار دقیق را اضافه کرد. اما با توجه به این که این روش با خطاهای محاسباتی زیادی روبرو هست و از روابط تجربی مختلفی استفاده می‌کند، مسلماً بسیار دقیق نیست. روش دیگر اصلاح نتایج ابزار استفاده از روش مدل‌سازی سه‌بعدی می‌باشد. در روش سه‌بعدی با توجه به گام حفاری می‌توان اثر سه‌بعدی سینه‌کار بر روی جابه‌جایی‌ها را به راحتی مدل کرد. روش دیگری که بسیار دقیق‌تر می‌تواند این فاصله را محاسبه و به اصلاح نتایج کمک کند، استفاده از نتایج ابزار دقیق است. به این صورت که با استفاده از زمان اولین قرائت و فاصله از سینه‌کار می‌توان آزادی تنش و تغییر شکل را تا زمان اولین قرائت به دست آورد.

برای حل مشکل دوم، روابطی ارائه شده‌اند تا مقادیر همگرایی به جابه‌جایی تبدیل شوند. در این پژوهش نیز از این روابط برای تبدیل همگرایی به جابه‌جایی استفاده شده است.

$$U_{I-R} = 2u \quad (7-6)$$

$$U_{C-R} = \sqrt{(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2} - \sqrt{[(X_1 + u) - (X_2 + u)]^2 + [(Y_1 + v) - (Y_2 + v)]^2} \quad (8-6)$$

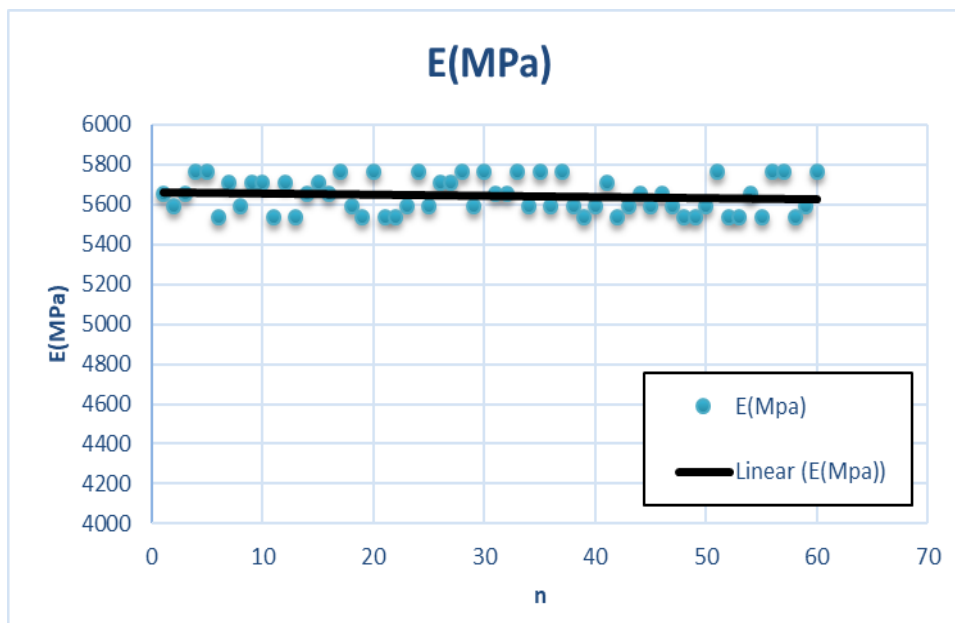
که در آن‌ها مقادیر u و v به ترتیب جابه‌جایی افقی و قائم هستند. مقدار همگرایی دیواره‌ها، U_{C-R} مقدار همگرایی تاج به دیواره‌ها و مقادیر مربوط به x و y به ترتیب برای مختصات افقی و قائم هریک از نقاط نصب دستگاه ابزار همگرایی سنجی می‌باشد.

با توجه به توضیحات فوق و مقادیر به دست آمده از داده‌های ابزار دقیق تونل البرز مقادیر نهایی جابه‌جایی ابزارها به صورت اصلاح شده بر مبنای روش‌های مذکور در آنالیز برگشتی استفاده شده است.

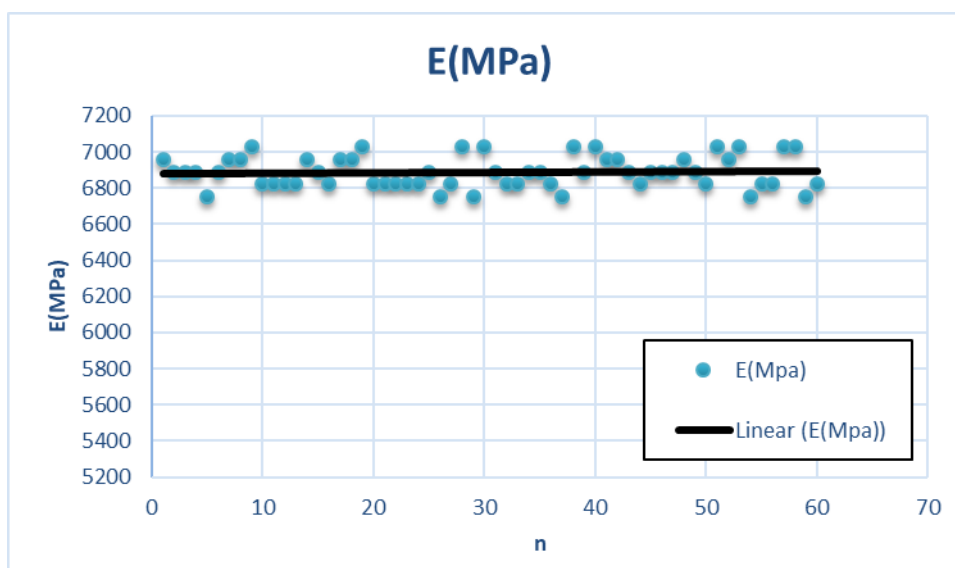
۳-۶-۶- طراحی سیستم تحلیل برگشتی هوشمند با استفاده از روش PSO

هدف طراحی یک سیستم هوشمند تحلیل برگشتی با استفاده از روش PSO تعیین یک رابطه غیرخطی بین مقادیر ورودی و خروجی می‌باشد. این رابطه با استفاده از فرایند کدنویسی در محیط نرم‌افزار Matlab طراحی می‌شود. با توجه به روابط ارائه شده در فصل چهارم می‌توان رابطه غیرخطی بین ورودی‌ها و خروجی‌ها را تعیین کرد. روابط (۳-۴) و (۴-۴) در واقع فرایند اصلی این روش می‌باشند. با استفاده از این روابط می‌توان بهترین موقعیت یافت شده توسط گروه ذرات را پیدا کرد. پس از این مرحله و با استفاده از روابط (۴-۶) تا (۴-۹) که بعداً ارائه شدند، می‌توان مقادیر را به صورت یک تصاعد حسابی پیدا کرد. این الگوریتم، فرایند را تا یافتن تابع هدف ادامه می‌دهد. این فرایند تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که شرط توقف برآورده شود. این شرایط در فلوچارت مربوط به مراحل محاسبات در الگوریتم PSO در شکل (۴-۶) آورده شده است.

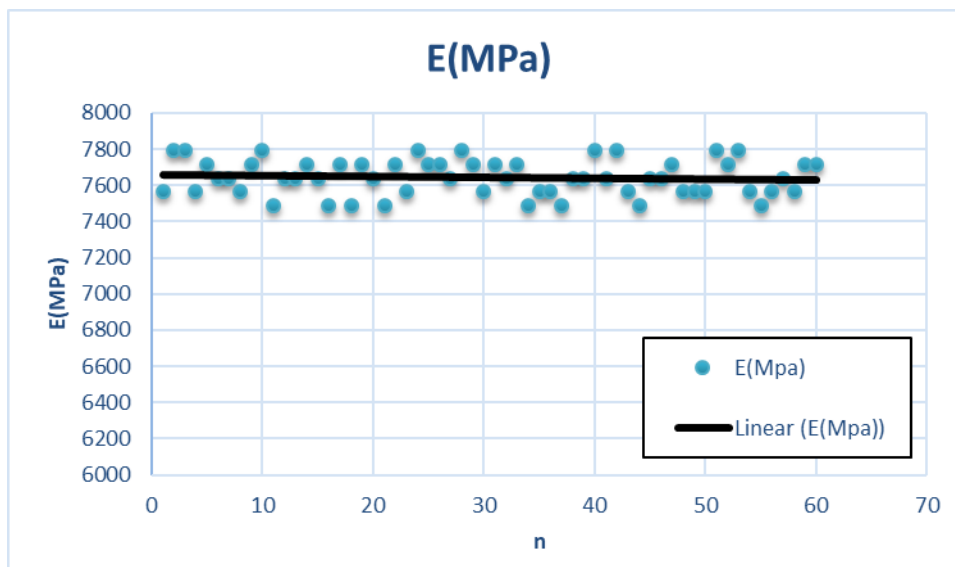
پس از آن که شرایط ذکر شده انجام شد، مقدار تابع هدف نیز برآورد می‌شود. با استفاده از این شرایط حالا می‌توان مقادیر واقعی ثبت شده در ابزاربندی را وارد سیستم کرد. نتایج به‌دست آمده برای هر مقطع و به تفکیک برای هر پارامتر مطابق شکل‌های (۶-۱۶) تا (۶-۲۷) می‌باشد. این مقادیر برای هربار جستجوی الگوریتم برآورد شده است و رگرسیون خطی آن نیز در آن‌ها نشان داده شده است.



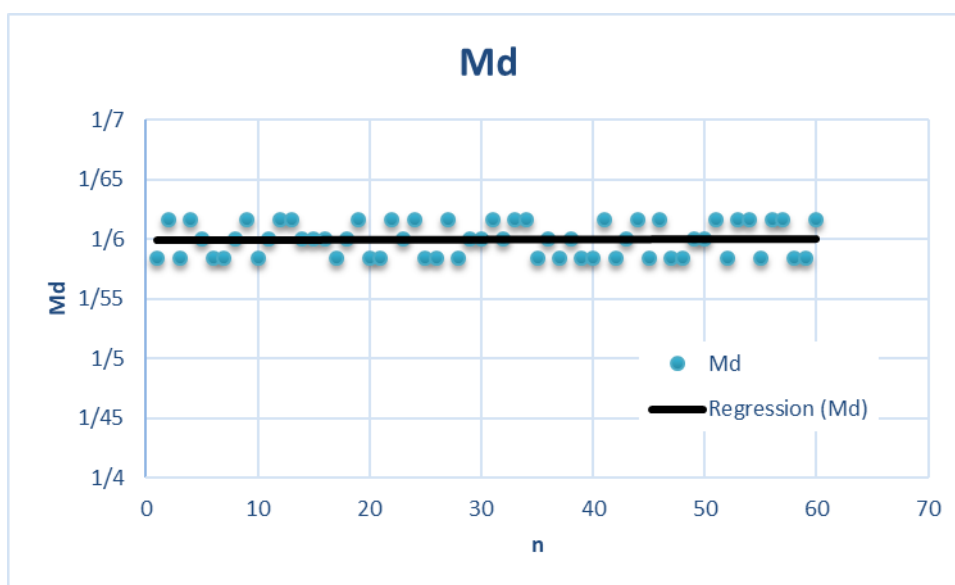
شکل (۶-۱۶) نمودار جستجوی مقدار مدول الاستیسیته با استفاده از الگوریتم PSO برای ایستگاه IN003



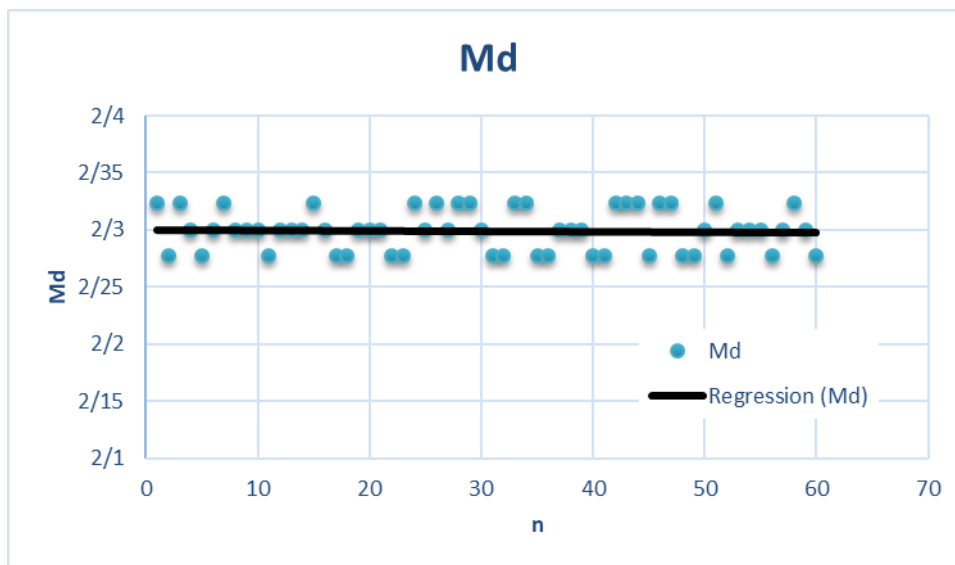
شکل (۶-۱۷) نمودار جستجوی مقدار مدول الاستیسیته با استفاده از الگوریتم PSO برای ایستگاه IS003



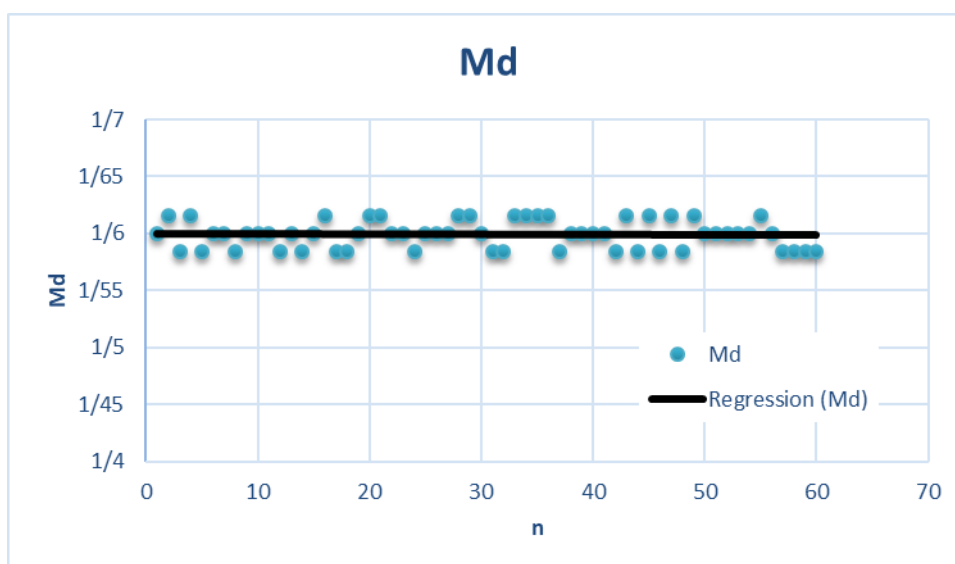
شکل (۶-۱۸) نمودار جستجوی مقدار مدول الاستیسیته با استفاده از الگوریتم PSO برای ایستگاه IS007



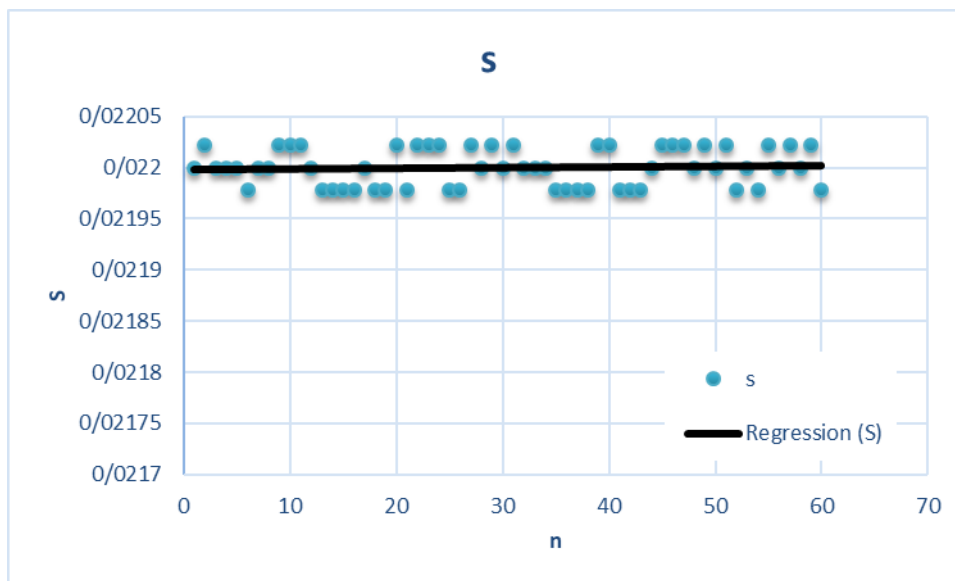
شکل (۶-۱۹) نمودار جستجوی مقدار M_d با استفاده از الگوریتم PSO برای ایستگاه IN003



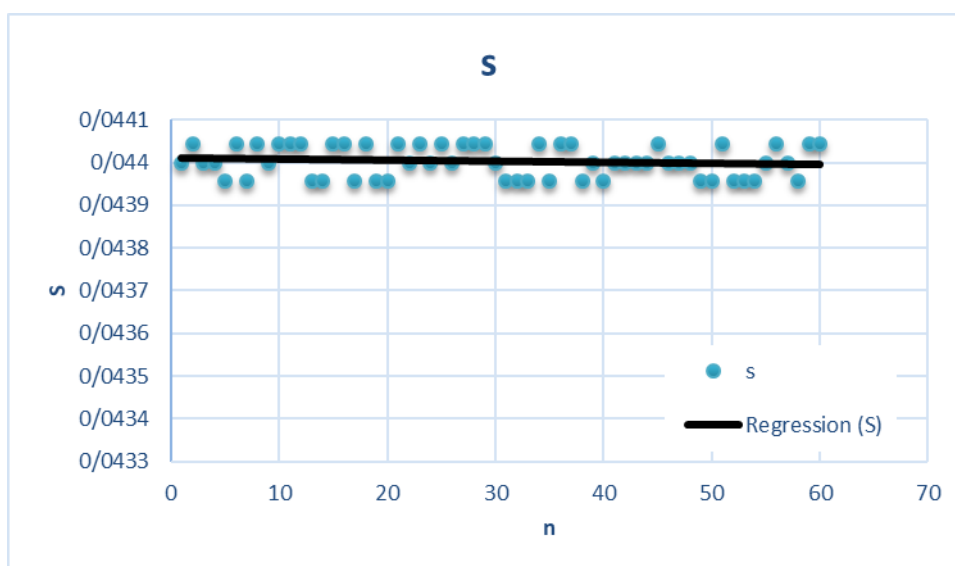
شکل (۶-۲۰) نمودار جستجوی مقدار M_d با استفاده از الگوریتم PSO برای ایستگاه IS003



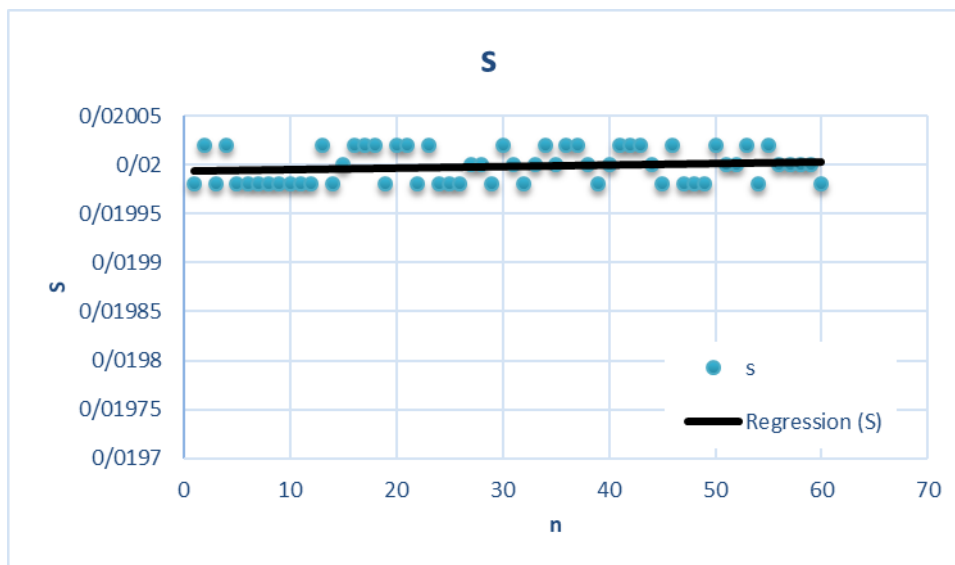
شکل (۶-۲۱) نمودار جستجوی مقدار M_d با استفاده از الگوریتم PSO برای ایستگاه IS007



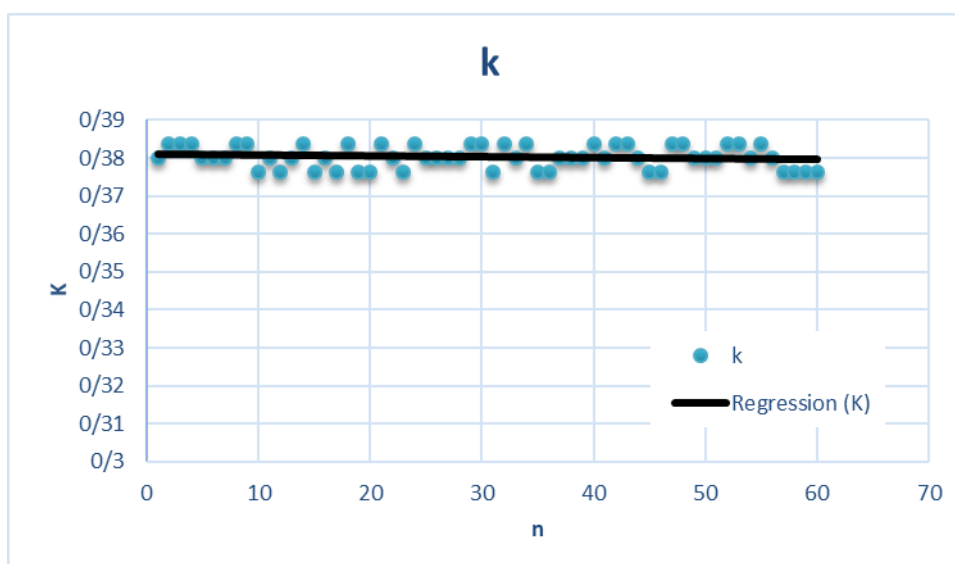
شکل (۶-۲۲) نمودار جستجوی مقدار S با استفاده از الگوریتم PSO برای ایستگاه IN003



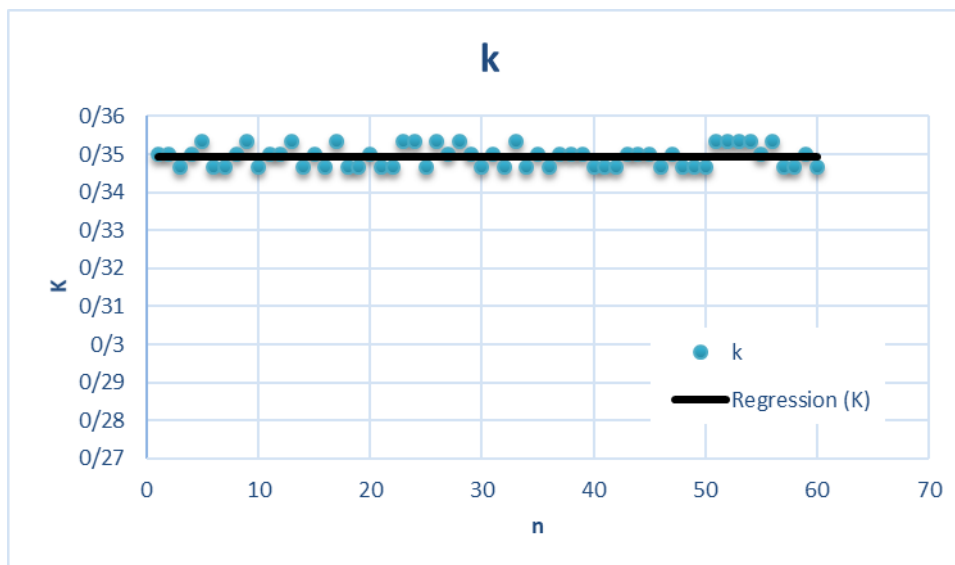
شکل (۶-۲۳) نمودار جستجوی مقدار S با استفاده از الگوریتم PSO برای ایستگاه IS003



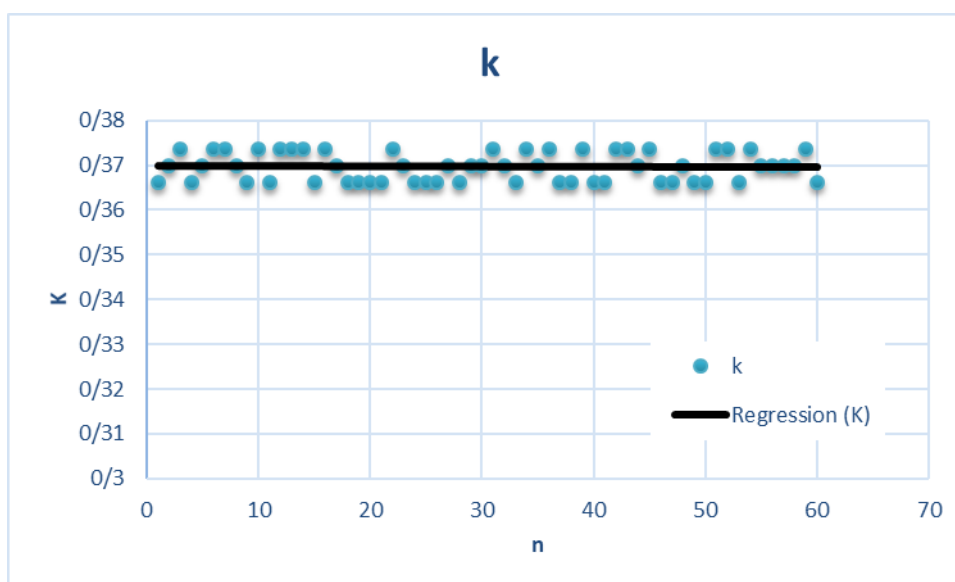
شکل (۶-۲۴) نمودار جستجوی مقدار S با استفاده از الگوریتم PSO برای ایستگاه IS007



شکل (۶-۲۵) نمودار جستجوی مقدار K با استفاده از الگوریتم PSO برای ایستگاه IN007



شکل (۶-۲۶) نمودار جستجوی مقدار K با استفاده از الگوریتم PSO برای ایستگاه IS003



شکل (۶-۲۷) نمودار جستجوی مقدار K با استفاده از الگوریتم PSO برای ایستگاه IS007

۶-۳-۱- تخمین مقادیر توده سنگ با استفاده از روش PSO

با توجه به شکل‌های (۶-۱۶) تا (۶-۲۷) مقادیر مختلف با استفاده از فرایند جستجو برآورد شده‌اند. برای آن‌که سیستم طراحی شده نتایج قابل قبولی را بدهد، نیاز است با توجه به رگرسیون خطی که در شکل‌ها نشان داده شده است مقادیر تخمین زده شود. در جدول (۶-۷) مقادیر تخمینی برای هر مقطع به صورت تفکیک شده، آورده شده است.

جدول (۶-۷) پارامترهای تخمین زده شده توده سنگ با استفاده از الگوریتم PSO

ایستگاه	E (MPa)	M_d	S	K	حدود GSI
IN 003	۵۶۵۰	۱/۶	۰/۰۲۲	۰/۳۸	۵۱-۶۴
IS 003	۶۸۹۰	۲/۳	۰/۰۴۴	۰/۳۵	۵۰-۷۲
IS 007	۷۶۴۰	۱/۶	۰/۰۲	۰/۳۷	۴۰-۶۴

با توجه به اینکه مقادیر متناظر با پارامترهای رابطه هوک-براون مستقیماً با GSI ارتباط دارد و برای آن که درک مقدار GSI ساده تر است، می توان از این مقدار به عنوان معرف نیز استفاده کرد. با توجه به حدود مقادیری که به دست آمده است، مقدار GSI متناسب با هر ایستگاه نیز برآورد شده است. لازم به ذکر است که تخمین پارامتر M_d علاوه بر مقدار اندیس مقاومت زمین، به پارامتر M_i نیز که مرتبط با نوع سنگ می باشد، نیازمند می باشد.

۶-۳-۲- اعتبارسنجی سیستم طراحی شده برای تحلیل برگشتی هوشمند با استفاده از الگوریتم PSO

با توجه به جدول (۶-۶) و برای آن که صحت مدل ساخته شده و همچنین اعتبارسنجی آنالیز برگشتی هوشمند با استفاده از الگوریتم PSO مشخص شود، لازم است پارامترهای به دست آمده از این الگوریتم برای مقایسه با مقادیر واقعی ابزار مقایسه شود. برای این منظور در جدول (۶-۸) مقادیر جابه جایی متناظر با پارامترهای تخمینی و مقادیر واقعی داده های ابزار دقیق مقایسه شدند. برای این کار فرایند مدل سازی عددی که در ابتدای فصل توضیح داده شد، دوباره انجام شده است.

جدول (۸-۶) مقایسه مقادیر جابه‌جایی واقعی با مقادیر تخمینی نرم‌افزار برای الگوریتم PSO

نام ایستگاه	جابه‌جایی ابزار (mm)		جابه‌جایی نرم‌افزار (mm)		درصد خطا	
	افقی	قائم	افقی	قائم	افقی	قائم
IN 003	۱۶/۶	۱۴/۲	۱۶/۴	۱۴	۱/۳	۱/۷
IS 003	۱۰	۸/۷	۹/۷	۸/۵	۳	۲/۳
IS 007	۲۲/۳	۱۹/۳	۲۲/۲	۱۹/۷	۰/۵	۱/۹

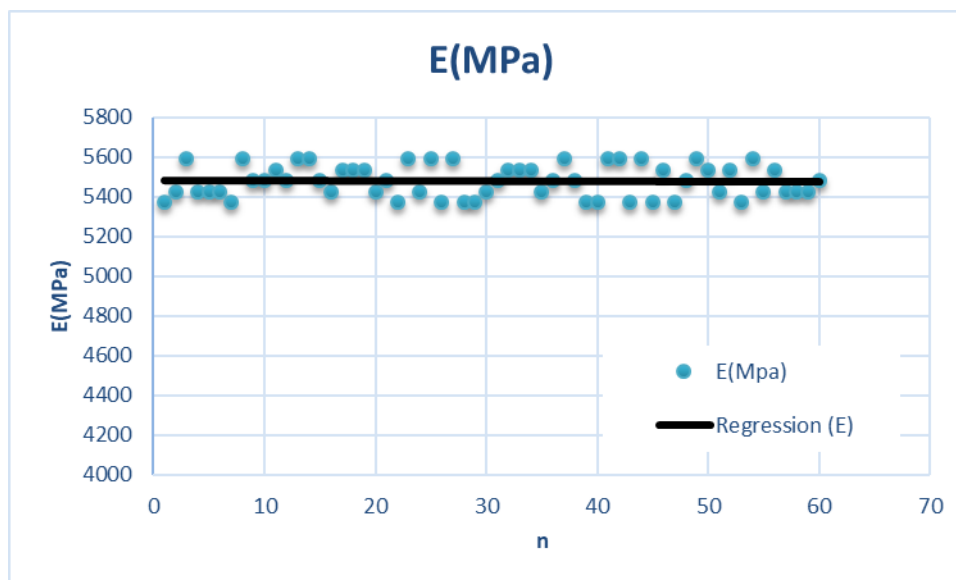
با توجه به جدول (۸-۶) نتایج نشان می‌دهد که مقادیر به‌دست آمده از الگوریتم PSO بسیار نزدیک به مقادیر ثبت شده در ابزاربندی نیز می‌باشد. این نتایج همچنین نشان می‌دهد پارامترهای توده‌سنگ نیز به درستی تخمین زده شده است. با توجه به جدول‌های (۲-۶) و (۴-۶) که در آن حدود مقادیر توده‌سنگ آورده شده است، مشخص می‌شود مقادیر به دست آمده از سیستم آنالیز برگشتی به خوبی و به صورت صحیح مقادیر واقعی را پیش‌بینی کرده است. علاوه بر این می‌توان صحت‌سنجی مدل‌سازی عددی انجام شده را نیز تایید کرد.

۴-۶-۶- طراحی سیستم تحلیل برگشتی با استفاده از الگوریتم SVM

هدف طراحی یک سیستم هوشمند آنالیز برگشتی با استفاده از روش SVM تعیین یک رابطه غیرخطی بین مقادیر ورودی و خروجی می‌باشد. این رابطه با استفاده از فرایند کدنویسی در محیط نرم‌افزار Matlab طراحی می‌شود. همان‌طور که در فصل چهارم اشاره شد، الگوریتم ماشین بردار پشتیبان ابتدا در سال ۱۹۶۳ ابداع و سپس برای حالت غیرخطی در سال ۱۹۹۵ تعمیم داده شد. هدف این الگوریتم سنجش فاصله فرایند بهینه‌سازی با یک تابع افت اصلاح شده است. در حقیقت هدف این الگوریتم تخمین پارامترهای وزن و اریب تابعی است که بهترین انطباق را با داده‌ها داشته باشد. برای به دست آوردن یک تابع هدف باید از رابطه (۴-۱۱) برای تعیین بردار وزن و بایاس استفاده کرد. پس از آن برای تشریح بهتر تابع از مجموعه روابط (۴-۱۴) استفاده می‌شود. پس از آن یک تابع لاگرانژ به

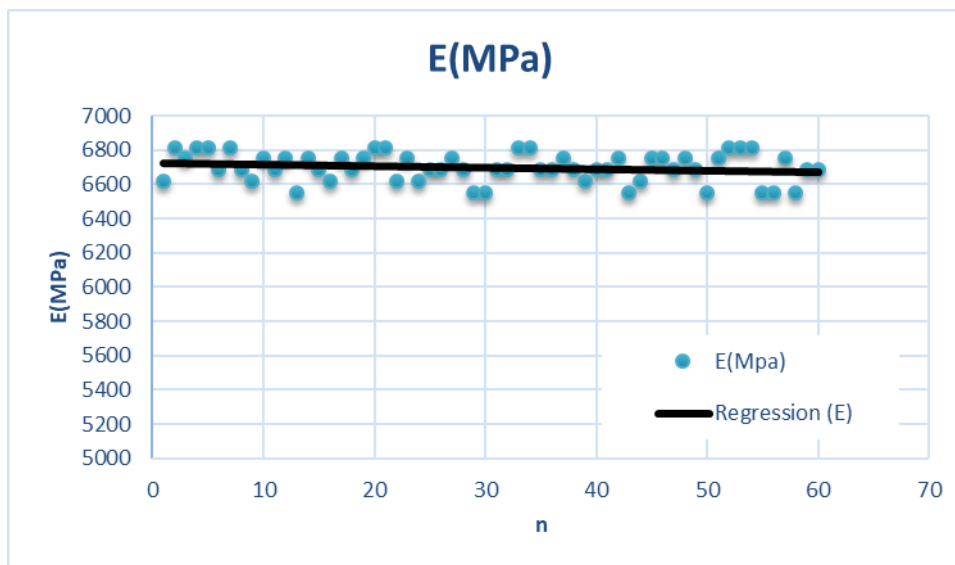
صورت پیشنهادیه کردن مطابق رابطه (۴-۱۵) به دست می‌آید. با حل این رابطه و تعیین ضرایب لاگرانژی می‌توان پاسخ نهایی مدل را مطابق رابطه (۴-۱۷) بازنویسی کرد. همانطور که گفته شد مسئله رگرسیون خطی نیز با استفاده از توابع کرنل قابلیت تبدیل به تابع غیرخطی را دارد.

پس از آن که شرایط ذکر شده انجام شد، مقدار تابع هدف نیز برآورد می‌شود. با استفاده از این شرایط حالا می‌توان مقادیر واقعی ثبت شده در ابزاربندی را وارد سیستم کرد. نتایج به دست آمده برای هر مقطع و به تفکیک برای هر پارامتر مطابق شکل‌های (۶-۲۸) تا (۶-۳۹) می‌باشد. این مقادیر برای هر بار جستجوی الگوریتم برآورد شده است و رگرسیون خطی آن نیز در آن‌ها نشان داده شده است.



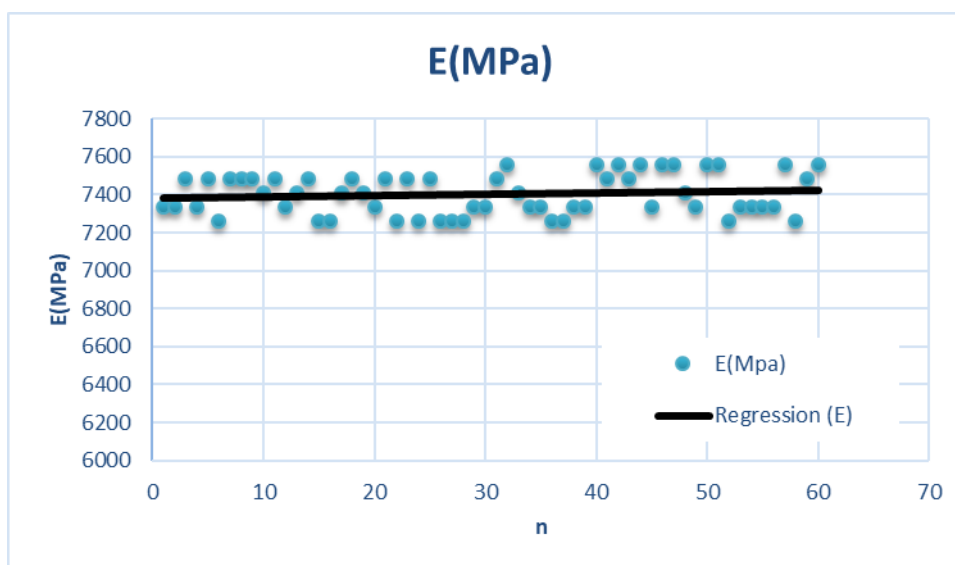
شکل (۶-۲۸) نمودار جستجوی مقدار مدول الاستیسیته با استفاده از الگوریتم SVM برای ایستگاه

IN003

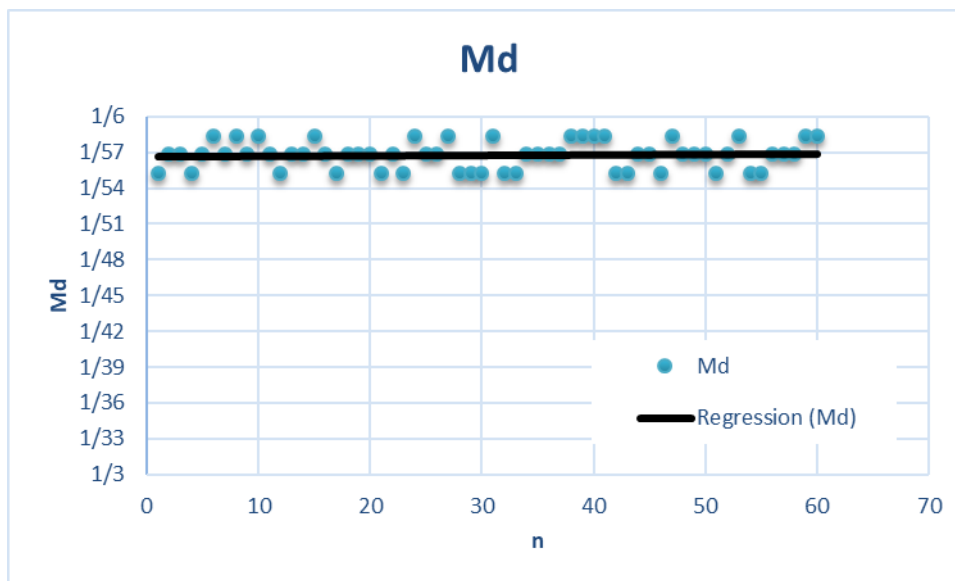


شکل (۶-۲۹) نمودار جستجوی مقدار مدول الاستیسیته با استفاده از الگوریتم SVM برای ایستگاه

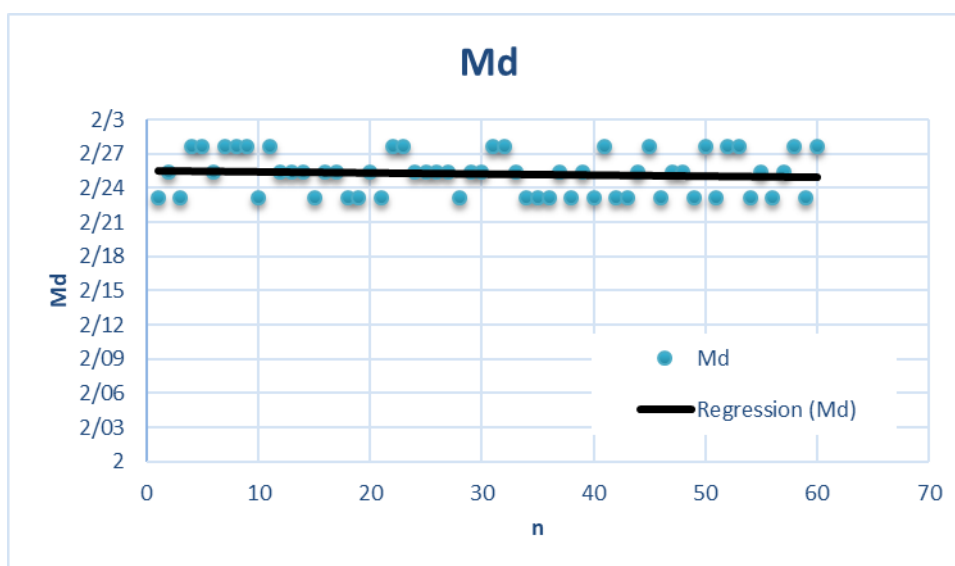
IS003



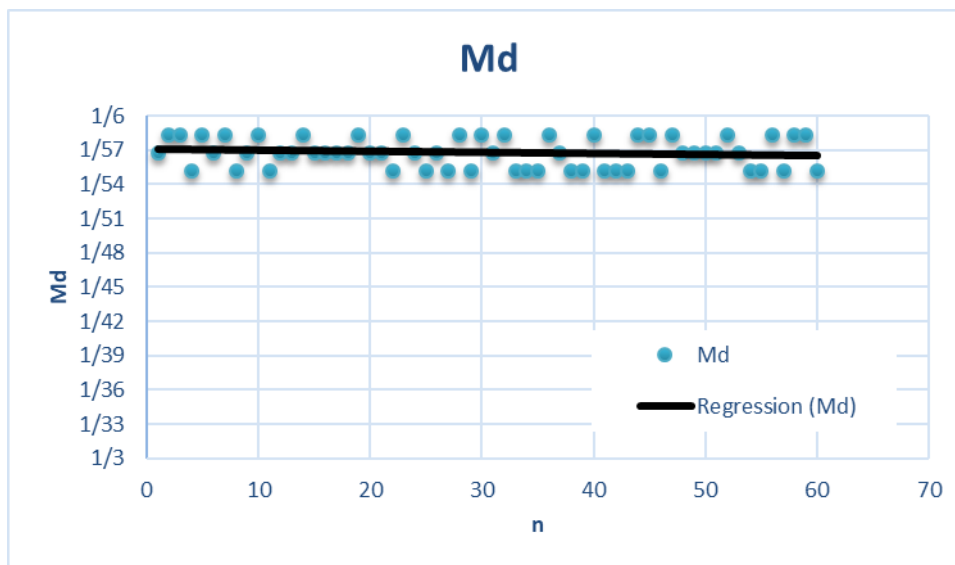
شکل (۶-۳۰) نمودار جستجوی مقدار مدول الاستیسیته با استفاده از الگوریتم SVM برای ایستگاه IS007



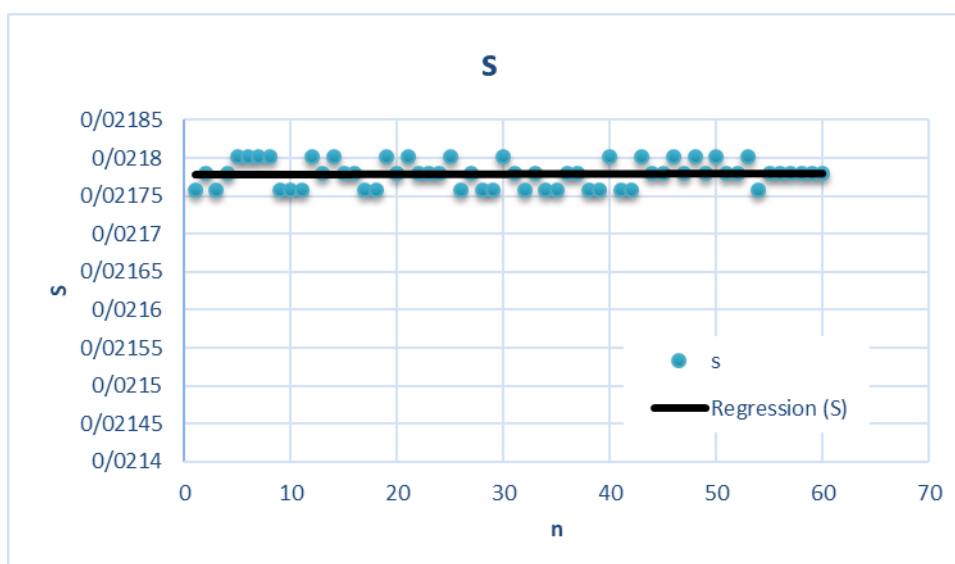
شکل (۶-۳۱) نمودار جستجوی مقدار M_d با استفاده از الگوریتم SVM برای ایستگاه IN003



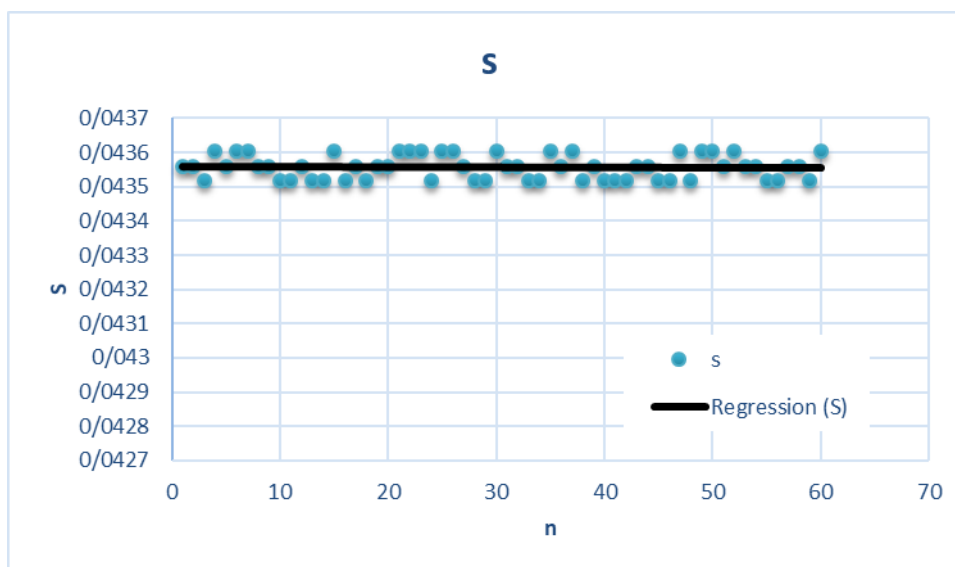
شکل (۶-۳۲) نمودار جستجوی مقدار M_d با استفاده از الگوریتم SVM برای ایستگاه IS003



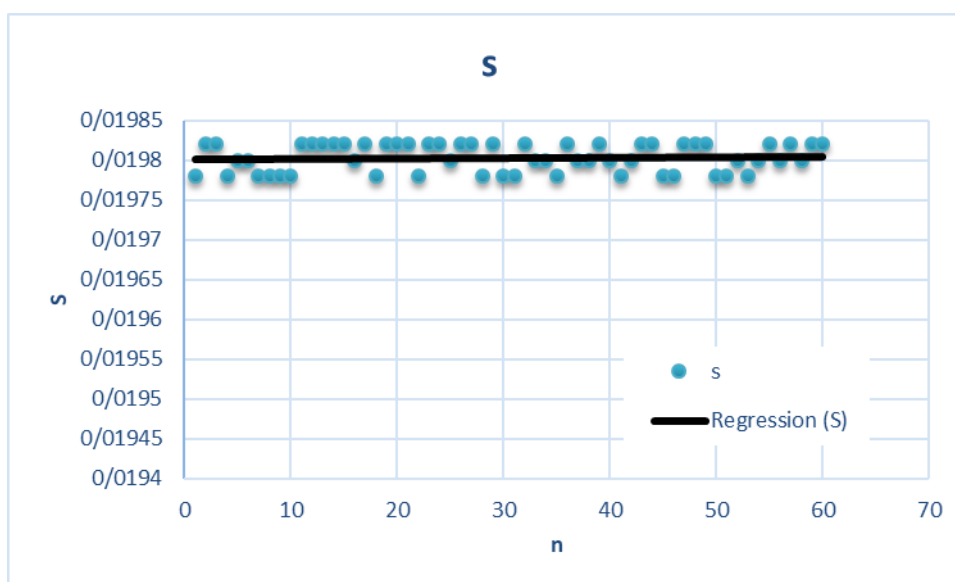
شکل (۶-۳۳) نمودار جستجوی مقدار M_d با استفاده از الگوریتم SVM برای ایستگاه IS007



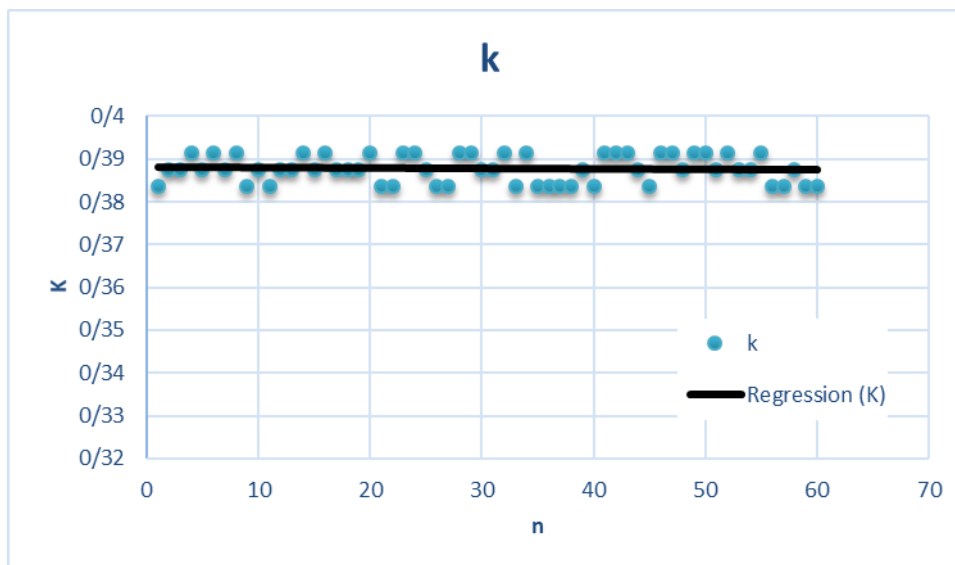
شکل (۶-۳۴) نمودار جستجوی مقدار S با استفاده از الگوریتم SVM برای ایستگاه IN003



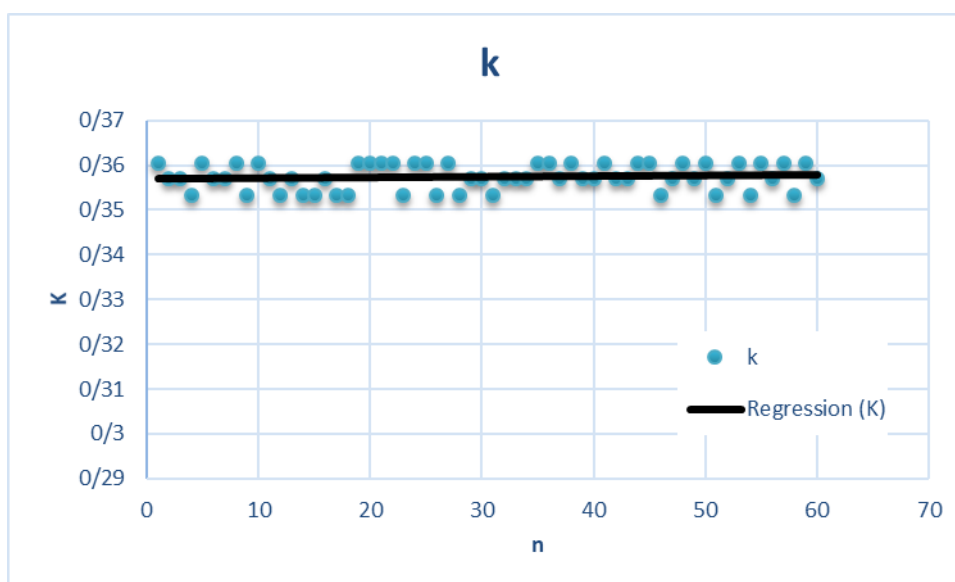
شکل (۶-۳۵) نمودار جستجوی مقدار S با استفاده از الگوریتم SVM برای ایستگاه IS003



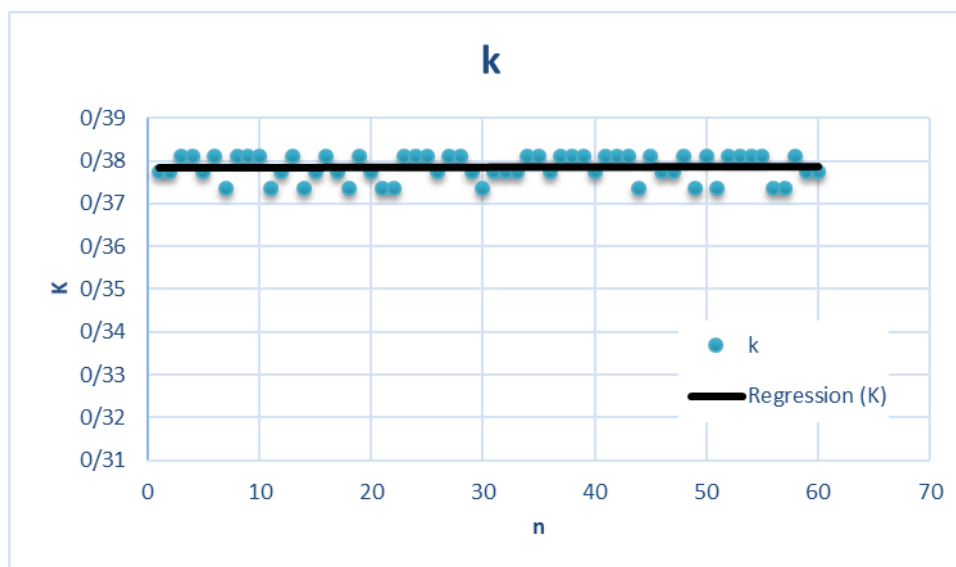
شکل (۶-۳۶) نمودار جستجوی مقدار S با استفاده از الگوریتم SVM برای ایستگاه IS007



شکل (۶-۳۷) نمودار جستجوی مقدار K با استفاده از الگوریتم SVM برای ایستگاه IN003



شکل (۶-۳۸) نمودار جستجوی مقدار K با استفاده از الگوریتم SVM برای ایستگاه IS003



شکل (۶-۳۹) نمودار جستجوی مقدار K با استفاده از الگوریتم SVM برای ایستگاه IS007

۶-۴-۱- تخمین مقادیر توده سنگ با استفاده از روش SVM

با توجه به شکل‌های (۶-۲۸) تا (۶-۳۹) مقادیر مختلف با استفاده از فرایند جستجو برآورد شده‌اند. برای آن که سیستم طراحی شده نتایج قابل قبولی را بدهد، نیاز است با توجه به رگرسیون خطی که در شکل‌ها نشان داده شده است مقادیر تخمین زده شود. در جدول (۶-۹) مقادیر تخمینی برای هر مقطع به صورت تفکیک شده، آورده شده است.

جدول (۶-۹) پارامترهای تخمین زده شده توده سنگ با استفاده از الگوریتم SVM

ایستگاه	E (MPa)	M _d	S	K	حدود GSI
IN 003	۵۴۷۵	۱/۵۷	۰/۰۲۲	۰/۳۹	۵۰-۶۶
IS 003	۶۶۹۰	۲/۲۵	۰/۰۴۴	۰/۳۶	۵۳-۷۱
IS 007	۷۴۰۰	۱/۵۹	۰/۰۲	۰/۳۸	۴۰-۶۵

با توجه به اینکه مقادیر متناظر با پارامترهای رابطه هوک-براون مستقیماً با GSI ارتباط دارد و برای آن که درک مقدار GSI ساده‌تر است، می‌توان از این مقدار به عنوان معرف نیز استفاده کرد. با توجه

به حدود مقادیری که به دست آمده است، مقدار GSI متناسب با هر ایستگاه نیز برآورد شده است. لازم به ذکر است که تخمین پارامتر M_a علاوه بر مقدار اندیس مقاومت زمین، به پارامتر M_i نیز که مرتبط با نوع سنگ می باشد، نیازمند می باشد.

۶-۶-۲- اعتبارسنجی سیستم طراحی شده برای تحلیل برگشتی هوشمند با استفاده از الگوریتم SVM

با توجه به جدول (۹-۶) و برای آن که صحت مدل ساخته شده و همچنین اعتبارسنجی تحلیل برگشتی هوشمند با استفاده از الگوریتم SVM مشخص شود، لازم است پارامترهای به دست آمده از این الگوریتم برای مقایسه با مقادیر واقعی ابزار مقایسه شود. برای این منظور در جدول (۱۰-۶) مقادیر جابه جایی متناظر با پارامترهای تخمینی و مقادیر واقعی داده های ابزار دقیق مقایسه شدند. برای این کار فرایند مدل سازی عددی که در ابتدای فصل توضیح داده شد، دوباره انجام شده است.

جدول (۱۰-۶) مقایسه مقادیر جابه جایی واقعی با مقادیر تخمینی نرم افزار برای الگوریتم SVM

نام ایستگاه	جابه جایی ابزار (mm)		جابه جایی نرم افزار (mm)		درصد خطا	
	افقی	قائم	افقی	قائم	افقی	قائم
IN 003	۱۶/۶	۱۴/۲	۱۷/۴	۱۳/۶	۴/۷	۴/۵
IS 003	۱۰	۸/۷	۹/۸	۸/۳	۲	۴/۶
IS 007	۲۲/۳	۱۹/۳	۲۱/۵	۱۹/۹	۳/۷	۲/۹

با توجه به جدول (۱۰-۶) نتایج نشان می دهد که مقادیر به دست آمده از الگوریتم SVM بسیار نزدیک به مقادیر ثبت شده در ابزاربندی نیز می باشد. این نتایج همچنین نشان می دهد پارامترهای توده سنگ نیز به درستی تخمین زده شده است. با توجه به جدول های (۲-۶) و (۴-۶) که در آن حدود مقادیر توده سنگ آورده شده است، مشخص می شود مقادیر به دست آمده از سیستم آنالیز برگشتی به

خوبی و به صورت صحیح مقادیر واقعی را پیش‌بینی کرده است. علاوه بر این می‌توان صحت‌سنجی مدل‌سازی عددی انجام شده را نیز تایید کرد.

۶-۷- مقایسه سیستم‌های طراحی شده برای تحلیل برگشتی هوشمند

هدف از انجام این پژوهش تخمین پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ بوده است. برای آنکه بهترین نتایج گرفته شود، از الگوریتم‌های هوشمند استفاده شده است. در تحلیل برگشتی، استفاده از روش‌های گوناگونی مرسوم می‌باشد اما در سالیان اخیر روش‌های هوشمند با توجه به تخمین دقیق‌تر پارامترهای ژئومکانیکی و سرعت بالاتر نسبت به روش‌های دیگر، نقش پررنگ‌تری دارند. در این پژوهش از دو الگوریتم هوشمند استفاده شده است. هدف از انجام این امر دستیابی به بهترین سیستم تحلیل برگشتی و تخمین دقیق‌تر داده‌های ژئومکانیکی بوده است. همانطور که در بخش‌های قبل نیز مشاهده شد، روش PSO در تخمین پارامترهای ژئومکانیکی پیش‌بینی دقیق‌تری نسبت به روش SVM دارد. بدین منظور جدول (۶-۱۱) ارائه شده است. این جدول نشان می‌دهد میزان خطای هر الگوریتم به صورت کلی چقدر بوده است.

جدول (۶-۱۱) مقایسه خطای هر الگوریتم در سیستم تحلیل برگشتی

نام الگوریتم	میانگین خطای افقی (%)	میانگین خطای عمودی (%)	خطای کل (%)
PSO	۱/۶	۱/۹۷	۱/۷۸
SVM	۳/۵	۴	۳/۷۵

همان‌طور که مشخص است سیستم تحلیل برگشتی بر مبنای الگوریتم PSO میزان خطای بسیار پایینی دارد. این نشان می‌دهد که نتایج این سیستم به مراتب به واقعیت نزدیک‌تر بوده و قابل اطمینان‌تر از سیستم تحلیل برگشتی بر مبنای الگوریتم SVM است. چنانچه در فعالیت‌های مهندسی استفاده از تحلیل برگشتی مدنظر باشد، سیستم PSO بسیار دقیق‌تر عمل می‌کند. علاوه بر این و با توجه به

مطالعات مشابه سیستم تحلیل برگشتی بر مبنای این الگوریتم همواره پاسخ‌های دقیق و قابل قبولی را داده است.

استفاده هم‌زمان از دو سیستم هوشمند اگرچه زمان بیشتری نیاز دارد اما باعث می‌شود درک بهتری نسبت به شرایط زمین مورد مطالعه به دست آید.

۶-۸- نتیجه‌گیری

انجام آنالیزهای عددی در ژئومکانیک، حدود نیم‌قرن پیشینه دارد. به منظور استفاده بهتر و درک شرایط بهتر آنالیزهای عددی می‌تواند روشی موثر در انجام فعالیت‌های مهندسی در زمینه طراحی و اجرا باشد. در این پژوهش محیط دربرگیرنده پیوسته در نظر گرفته شده است. نرم‌افزارهای مختلفی شرایط پیوسته را می‌توانند مدل کنند اما در این پژوهش از نرم‌افزار سه‌بعدی FLAC استفاده شده است. برای تعیین زوج‌داده‌های ورودی-خروجی سیستم تحلیل برگشتی، مدل‌سازی عددی کمک شایانی می‌کند. با توجه به اینکه تعیین شرایط مختلف امری غیرممکن است، سیستم‌های آنالیز عددی به راحتی می‌توانند این شرایط را مدل کنند. جهت اینکه آنالیز برگشتی مقادیر دقیق‌تری را پیش‌بینی کند، باید مدل‌های مختلفی در شرایط زمین‌شناسی منطقه بررسی شود.

تحلیل برگشتی هوشمند روشی است برای تعیین رابطه غیرخطی موجود بین مقادیر ورودی روش‌های عددی (پارامترهای ژئومکانیکی) و مقادیر خروجی حاصل (جاب‌جایی‌ها) توسط سیستم‌های هوشمند که بدین منظور از اطلاعات جمع‌آوری شده در منطقه مورد بررسی استفاده می‌شود. در این فصل ۳ مقطع مختلف با توجه به شرایط زمین‌شناسی مختلف در تونل البرز انتخاب شده است. با توجه به اینکه عمده وضعیت زمین‌شناسی منطقه مشابه این سه مقطع می‌باشد، نتایج این پژوهش می‌تواند برای تونل مورد استفاده قرار گیرد.

برای تخمین پارامترهای ژئومکانیکی منطقه مورد مطالعه، ۲ سیستم تحلیل برگشتی طراحی شد. سپس با استفاده از مدل سازی عددی پارامترهای تعیین کننده انتخاب شدند. این پارامترها به ترتیب مدول الاستیسیته، نسبت تنش ها، M_d و S می باشند. سپس با استفاده از سیستم های تحلیل برگشتی که شامل الگوریتم های PSO و SVM بود، مقادیر پارامترهای ژئومکانیکی تخمین زده شد. برای بررسی اینکه آیا این سیستم ها به درستی پیش بینی کرده اند، نتایج آنالیز عددی با نتایج قرائت های ابزار دقیق ثبت شده مقایسه شدند. نتایج نشان دادند که هر دو سیستم از عملکرد قابل قبولی برخوردارند. در پایان نیز مقایسه دو سیستم تحلیل برگشتی انجام شد که نتایج نشان داد عملکرد الگوریتم PSO با میانگین خطای ۱/۷۸ از الگوریتم SVM با میانگین خطای ۳/۷۵ بهتر است. بنابراین الگوریتم PSO برای کارهای مشابه و یا تخمین در دیگر مقاطع نیز بیشتر پیشنهاد می شود.

فصل هفتم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۷-۱-مقدمه

در این مطالعه تحلیل برگشتی هوشمند در سه مقطع مختلف از تونل البرز در ایستگاه‌های IN003، IS003 و IS007 با استفاده از دو نوع سیستم هوشمند انجام شد. بدین منظور ابتدا با استفاده از داده‌های حاصل از تونل اکتشافی منطقه و مطالعات زمین‌شناسی، مدل‌سازی عددی تونل البرز با استفاده از نرم‌افزار $FLAC^{3d}$ انجام شد. هدف از انجام مدل‌سازی عددی تولید زوج داده‌های ورودی-خروجی مورد نیاز جهت طراحی سیستم تحلیل برگشتی هوشمند بود. پس از این، با استفاده از نرم‌افزار متلب و کدنویسی تحلیل برگشتی هوشمند مبتنی بر الگوریتم‌های PSO و SVM انجام شد. ورودی‌های مدنظر سیستم هوشمند با استفاده از آنالیز حساسیت پارامترها محاسبه شد. مدل رفتاری درنظر گرفته شده، مدل رفتاری هوک-براون درنظر گرفته شد. از بین پارامترهای ورودی مدول الاستیسیته، نسبت تنش‌ها، پارامتر M_d و S به عنوان ورودی سیستم آنالیز برگشتی انتخاب شدند و ضریب پواسون از سیستم به دلیل تاثیر ناچیز حذف شد. پس از آن تحلیل برگشتی هوشمند برای هر دو الگوریتم انجام شد که با استفاده از الگوریتم‌های هوشمند مدنظر، پارامترهای توده‌سنگ برای هر ایستگاه به تفکیک برآورد شدند. پس از تکمیل مراحل آنالیز برگشتی، صحت‌سنجی و اعتبارسنجی فرایند آنالیز برگشتی انجام شد، که تطابق خوبی با مدل اولیه ساخته شده نیز داشت.

۷-۲-نتیجه‌گیری

- با توجه به نتایج تحلیل حساسیت مشاهده شد که پارامترهای مدول الاستیسیته و نسبت تنش‌ها بیشترین تاثیر را بر عملکرد سیستم هوشمند دارند. ضمن اینکه پارامترهای مربوط به مدل رفتاری هوک-براون نیز تاثیر قابل توجهی را بر روی سیستم هوشمند داشتند. با توجه به اینکه این پارامترها مستقیماً با خواص سنگ بکر در ارتباط هستند و از پوش خطی هوک تبعیت می‌کنند، پس از آنکه مقدار آن‌ها بالاتر از حدود GSI ۴۵ قرار می‌گیرد تاثیرات آن‌ها به مراتب کاهش پیدا می‌کند. این عامل مستقیماً با مقدار GSI در ارتباط است، لذا حدود GSI برای مقادیر

بالتر از ۴۵ نیز تاثیر بسیار کمی بر روی روند جابه‌جایی‌ها دارد اما برای مقادیر پایین‌تر این تاثیرات این پارامتر بسیار شدید می‌باشد. بنابراین در سیستم آنالیز برگشتی هوشمند پارامترهای مربوط به آن‌ها نیز در نظر گرفته شده است.

- در این پژوهش مدل رفتاری مدنظر هوک-براون قرار داده شده است. با توجه به اینکه پارامترهای مدل‌های رفتاری هوک-براون و موهر-کلمب مستقیماً از مماس خطی هوک پیروی می‌کنند، استفاده از مدل رفتاری هوک-براون نتایج واقعی‌تری را نسبت به روش موهر-کلمب می‌دهد. بنابراین برای آنکه نتایج آنالیز برگشتی تطابق بهتری با نتایج واقعی داشته باشد، از این مدل رفتاری در این پژوهش استفاده شده است. همچنین مقایسه نتایج حاصل از این پژوهش با موارد مشابه نشان می‌دهد که مدل رفتاری هوک-براون بسیار دقیق‌تر از مدل رفتاری موهر-کلمب عمل کرده است. هرچند پارامترهای مدل رفتاری موهر-کلمب قابل درک‌تر هستند اما برای رفع این مشکل در این پژوهش حدود GSI زمین نیز پس از انجام آنالیز برگشتی برای هر مقطع برآورد شد.

- با توجه به دقت بالای مدل رفتاری هوک-براون نسبت به مدل رفتاری موهر-کلمب و این که معیار هوک-براون پارامترهای ورودی بیشتری نسبت به معیار موهر-کلمب در مدل‌سازی لحاظ می‌کند، مدل طراحی شده با استفاده از این معیار به شرایط واقعی زمین نزدیک‌تر بوده که همین مسئله سبب بالاتر بودن دقت محاسبات و قابل اطمینان‌تر بودن این طراحی می‌باشد.

- طراحی سیستم تحلیل برگشتی به صورت هوشمند علاوه بر اینکه زمان محاسبات را بسیار پایین‌تر می‌آورد، نتایج دقیق‌تری را ارائه خواهد داد. استفاده از روش‌های هوشمند در چند سال اخیر بسیار رایج شده است. در این پژوهش نیز از دو الگوریتم PSO و SVM استفاده شده است.

- برای سیستم تحلیل برگشتی هوشمند مطابق الگوریتم PSO میزان خطای رخ داده بسیار پایین‌تر از الگوریتم SVM بوده است. نتایج حاصل از الگوریتم PSO پس از مدل‌سازی دوباره تونل البرز

میزان خطای ثبت شده را $1/78$ نشان می‌دهد. این در حالیست که الگوریتم SVM خطای ثبت شده‌ای در حدود $3/75$ را نشان می‌دهد.

- مقایسه دو سیستم تحلیل برگشتی نشان داد نتایج حاصل از الگوریتم PSO به مراتب دقیق‌تر و نزدیک‌تر به نتایج واقعی می‌باشد و استفاده از این سیستم پیشنهاد می‌شود.
- برآورد پارامترهای توده‌سنگ در سه مقطع مختلف با استفاده از الگوریتم‌های هوشمند و با تکرار و بهینه‌سازی پارامترها انجام شده است. نتایج حاصل از تحلیل برگشتی با رگرسیون خطی از میان داده‌های مختلفی که الگوریتم‌ها پیش‌بینی کردند انتخاب شده و در مدل‌سازی استفاده شدند. با توجه به میزان خطای محاسبه شده در هر ایستگاه که به صورت تفکیکی برای جابه‌جایی‌های افقی و قائم به‌دست آمده، می‌توان گفت سیستم تحلیل برگشتی به درستی عمل کرده است.
- هدف از انجام این پژوهش علاوه بر تخمین پارامترهای توده‌سنگ در مقاطع مختلف، کمک به طراحی برای تونل باند برگشت نیز بوده است. با توجه به میزان خطای داده‌های حاصل از تحلیل برگشتی، می‌توان از این داده‌ها برای باند برگشت نیز استفاده کرد.
- با توجه به این که بیش از ۸۰ درصد از مقاطع تونل در سازندهای نوع C قرار گرفته‌اند، مقاطع انتخابی این پژوهش نیز با توجه به عمده تیپ سازندی انتخاب شده است. بنابراین می‌توان نتایج حاصل از سیستم تحلیل برگشتی انجام شده را برای دیگر مقاطع تونل البرز نیز استفاده کرد.

۷-۳-پیشنهادهات

- در این مطالعه به دلیل نبود ایستگاه‌های کامل رفتارسنجی شامل کشیدگی‌سنج‌ها، همگرایی-سنج‌ها و بارسنج‌ها در یک ایستگاه، تنها از نتایج حاصل از همگرایی‌سنجی استفاده شد. با توجه به این که وجود دستگاه‌های مختلف ابزاربندی می‌تواند نتایج تحلیل برگشتی را تدقیق کند،

پیشنهاد می‌شود برای ایستگاه‌های مختلف تونل از سیستم‌های رفتارنگاری ترکیبی استفاده شود.

- با توجه به نتایج حاصل از میزان خطای الگوریتم‌های انتخاب شده در این مطالعه، می‌توان برای مطالعات آینده از سیستم‌های ترکیبی یا به اصطلاح کوپل الگوریتم‌های هوشمند برای بالا بردن دقت نتایج تحلیل برگشتی نیز استفاده کرد.
- با توجه به سطح مقطع تونل البرز و شباهت زیاد سازه‌های موجود در این تونل با دیگر کارگاه‌های موجود در طرح آزادراه تهران-شمال می‌توان از سیستم تحلیل برگشتی هوشمند استفاده شده در این مطالعه برای دیگر مناطق نیز استفاده کرد و یک سیستم جامع برای تحلیل برگشتی هوشمند تونل‌های آزادراه در این منطقه طراحی گردد.
- با توجه به این‌که در عمده فعالیت‌های مهندسی و تحلیل برگشتی از مدل‌های رفتاری هوک-براون و موهر-کلمب استفاده می‌شود، پیشنهاد می‌شود برای دیگر فعالیت‌های مشابه از مدل‌های رفتاری دیگر بسته به نوع فعالیت استفاده شود و نتایج آن‌ها در مقایسه با نتایج به‌دست آمده انجام شود.

منابع و مأخذ

- احمدی، م.، شاهوردیلو، م. (۱۳۸۹) "ابزار دقیق و رفتارنگاری در مهندسی سنگ، چاپ اول، انتشارات سازمان جهاد دانشگاهی تهران
- آتش‌پز گرگری، ا. (۱۳۸۷)، پایان نامه کارشناسی ارشد: "توسعه الگوریتم بهینه‌سازی اجتماعی و بررسی کارایی آن"، دانشگاه تهران.
- اعصاری، م. (۱۳۸۴)، پایان نامه کارشناسی ارشد: "تحلیل پایداری مغار نیروگاه لوارک به روش تحلیل برگشتی با استفاده از رگرسیون چند متغیره"، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران.
- باسلیقه، ف.، کیهانی، ع. (۱۳۹۲) "مزایای استفاده از روش مقاطع معادل در طراحی نگهداری موقت تونل‌ها در حالت ترکیب پروفیل‌های فولادی با شاتکریت"، هفتمین کنگره مهندسی عمران.

- بروجنی، ع. (۱۳۸۴) پایان نامه کارشناسی ارشد: "تحلیل برگشتی داده‌های حاصل از جابه‌جایی‌های اندازه‌گیری شده در تونل سوم کوه‌رنگ"، دانشکده معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان.
- بنی‌جمالی، س. ش.، شریفی، ع.، جوادی اصطهباناتی، م.، زارع، ش. (۱۳۹۹) "مقایسه تحلیلی و عددی معیارهای شکست در شرایط زمین‌شناسی مختلف با استفاده از منحنی اندرکنش زمین"، هفتمین کنفرانس مکانیک‌سنگ ایران، دانشگاه تهران.
- بیدگلی، م.، شهریار، ک. (۱۳۸۳) "معرفی روشی جهت تعیین ژئومکانیکی منطقه به کمک روش‌های عددی"، اولین کنفرانس مهندسی معدن ایران، دانشگاه تربیت مدرس، صفحه ۱۷۵۱-۱۷۶۳.
- جنرال مکانیک، (۱۳۹۳) "گزارش ابزار دقیق و زمین‌شناسی تونل البرز".
- حسینی، م.، افضل‌آقایی، ا. (۱۳۹۱) "تحلیل برگشتی مغار نیروگاه سد سیاه‌بیشه با استفاده از داده‌های حاصل از ابزار دقیق" نشریه علمی-پژوهشی مهندسی معدن، شماره ۱۴، صفحه ۸۳ تا ۹۰.
- خامسی، ح. (۱۳۹۰) پایان نامه کارشناسی ارشد: "تحلیل برگشتی هوشمند خط ۲ مترو کرج با استفاده از سیستم‌های فازی"، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- دهقان، م. (۱۳۹۱)، پایان نامه کارشناسی ارشد: "آنالیز برگشتی جابه‌جایی‌های اندازه‌گیری شده تونل‌ها (مطالعه موردی تونل مترو شهر کرج)" دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زنجان.
- ساریخانی خرمی، م. (۱۳۹۰)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد: "تحلیل پارامترهای ژئومکانیکی و تنش‌های برجای توده‌سنگ در تونل راه‌آهن اصفهان-شیراز با استفاده از تحلیل برگشتی براساس جابه‌جایی‌های حاصل از رفتارنگاری با ابزار دقیق"، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان.
- شاهوردیلو، م. (۱۳۸۰)، "روش کاربرد همگرایی‌سنجی در بررسی رفتار سازه‌های زیرزمینی" مجموعه مقالات اولین کنفرانس مکانیک سنگ ایران، دانشگاه تربیت مدرس.
- ژانگ، ل. (۱۳۹۰)، "خواص رفتاری مهندسی سنگ‌ها"، ترجمه: دکتر مصطفی شریف‌زاده و مهندس رضا نورانی، چاپ اول، نشر صدا، تهران.
- صالحی، م. (۱۳۹۴)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد: "تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری موقت تونل چیتگر"، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- قدیری، ذ. (۱۳۸۹)، پایان نامه کارشناسی ارشد: "تحلیل پایداری مترو خط ۲ قطار شهری کرج با استفاده از نتایج رفتارسنجی"، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

- قیاسی فریز، ج. (۱۳۸۹)، پایان نامه کارشناسی ارشد: "تخمین تخلخل سنگ مخزن از آنالیز تصاویر مقطع نازک و مقایسه نتایج به دست آمده با سایر روش‌های پتروفیزیکی"، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- کرمی، م.، ابره، ب.، فرامرزی، ل. (۱۳۹۱). "آموزش کاربردی نرم‌افزار $FLAC^{3d}$ ". چاپ دوم، انتشارات جهاد دانشگاهی صنعتی اصفهان، ایران.
- شرکت لانیز، (۱۳۹۶) "گزارش ایزاردقیق تونل البرز".
- مهدوری س. و فتحی سلمی، ا. (۱۳۸۶) "تعیین پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ میزبان خط جنوبی مترو اصفهان با استفاده از تحلیل برگشتی" نشریه علمی پژوهشی مهندسی معدن، دوره دوم، شماره چهارم، ص، ۳۷-۴۶.
- مدنی، ج. (۱۳۸۱)، "تونل‌سازی جلد چهارم"، چاپ اول، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران.
- مدنی، ج. (۱۳۷۹)، "تونل‌سازی جلد سوم"، چاپ اول، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران.
- موسوی، م.، الهیان، ب. (۱۳۹۰)، "ابزاربندی و رفتارنگاری در پروژه‌های ژئومکانیکی"، نخستین همایش آسیایی و نهمین همایش ملی تونل (فضاهای زیرزمینی برای توسعه پایدار)، انجمن تونل ایران-تهران.
- میرزایی عبدالیوسفی، م.، نیکخواه، م.، زارع، ش. (۱۳۹۵) "ارزیابی تاثیر پدیده مچاله‌شوندگی بر پوشش نهایی نگهدارنده در تونل (مطالعه موردی تونل البرز)" دهمین کنفرانس دانشجویی مهندسی معدن ایران، ایران، کاشان.
- یساقی، ع. (۱۳۸۲) "کاربرد روش پرتودیاکونف در رده‌بندی مهندسی سنگ تونل های آزادراه تهران-شمال" مجموعه مقالات کنفرانس زمین‌شناسی مهندسی و محیط زیست ایران.
- Akutagawa S., Sakurai S., (2003), "Back Analysis for Tunnel Engineering as a Modern Observational Method", *Tunneling and Underground Space Technology*, Vol. 18, Published by Elsevier Ltd, PP. 185-196.
- Atashpaz-gargari E., Lucas C., (2007), "imperialist competitive algorithm: An Algorithm for Optimization Inspired by Imperialistic Competition", IEEE Congress on Evolutionary computation.
- Amusln, B., Shick, V., Lama, R., (1992) "Using Back Analysis to Estimate Geotechnical Field Parameters for the Design of Support Systems for Tunnels", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol.7, pp. 281-284.
- Astrom, K.J. & Eykhoff, P. (1971) "System identification: A survey". *Automatica*, vol. 7, pp. 123-162.

- Bieniawski Z.T., (1984), "Rock Mechanics Design in Mining and Tunneling", A.A. Balkema publishing co.
- Cheng-Xiang, Y., Wub, Y.H., Hon, T. (2010) "A no-tension elastic-plastic model and optimized back-analysis technique for modeling nonlinear mechanical behavior of rock mass in tunneling", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol 25, pp. 279-289.
- Clerc, M. Kennedy, J., (2002). "Particle swarm-Explosion, stability, convergence in a multidimensional complex space." *Three transactions on Evolutionary computation*, Vol.6, No.1.
- Cividini, A., Gioda, G. & Barla, G. (1985) "Calibration of a rheological material model on the basis of field measurements. In T. Kawamoto & Y. Ichikawa (Eds.)", Proc. 5th International Conference on Numerical Methods in Geomechanics, 1–5 April, Nagoya, Japan, Rotterdam/Boston, A.A. Balkema, pp. 1621–1628.
- Cividini, A., Jurina, L. & Gioda, G. (1981) "Some aspects of characterization problems in geomechanics", *Int. J. Rock Mechanics and Mining Sciences*, 18, pp. 487–503.
- Deng, J. and Lee, C. (1981) "Displacement back analysis for a steep slope at the Three Gorges Project site." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, vol. 18: pp. 487-503.
- Deng, D. (2001) "Back analysis problems in Geotechnics. A method based on the virtual work "principle (in French). Ph.D. thesis.
- Castro, A., Leitao, N., Sousa, L. and Nguyen, D. (2002) "The use of inverse methodologies in geotechnical problems." *ISRM News Journal*, vol. 7(2), pp. 24-32.
- Dibike, Yonas B, Slavco Velickov, Dimitri Solomatine, and Michael B Abbott, (2001)," Model induction with support vector machines: introduction and applications." *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol15 (3), pp.208-216.
- Dunnycliff J., Green Gordon E., (1988), "Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field", performance, J. Wiley & Sons.
- Filipe, T. Da Silva, M., (2007) "Geomechanical Parameters Evaluation in Underground Structures. Artificial Intelligence, Bayesian Probabilities and Inverse Method", *Civil engineering*, Doutoramento.
- Fakhimi, A., Salehi, D., Mojtabai, N. (2004) "Numerical back analysis for estimation of soil parameters in the Resalat Tunnel project", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol.19, pp.57-67.
- Geodata, (2015) "Tehran-Shomal Freeway Project Detailed Design of Alborz Main Tunnel".
- Ghorbani, M., Sharifzadeh, M., (2009) "Long term stability assessment of Siah Bisheh powerhouse cavern based on displacement back analysis method". *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol.24, pp. 574-583.
- Goh, Anthony T. C., and S. H. Goh, (2007), "Support vector machines: Their use in geotechnical engineering as illustrated using seismic liquefaction data." *Computers and Geotechnics*, Vol 34 (5), pp. 410-421.

- Gioda, G. (1980) "Indirect identification of the average elastic characteristics of rock masses." In Int. Conf. on Structure and Foundation on Rock, pp. 65-73, Sydney, Australia.
- Gioda G., Sakurai S., (1986), "Back Analysis Procedures for Interpretation of Field Measurements in Geomechanics", vol.11, PP.555-583.
- Gioda G., (1985), "Some Remarks on Back Analysis and Characterization Problem in Geomechanics", Fifth int. Conf. On Numerical Methods in Geomechanics, Nagaya, Japan.
- Guide to Geotechnical Instrumentation (2004), Mukilteo, Washington, USA.
- Hisatake, M., Hieda, Y., (2008)"Three-dimensional back-analysis method for the mechanical parameters of the new ground ahead of a tunnel face", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol.23, pp. 373-380.
- Hudson J.A., (1992), "Comprehensive rock engineering", pp.543-562.
- Huton, D.V., (2004), " Fundamentals of Finite Element Analysis" McGrawhill pub.
- Itasca Consulting Group (2005), FLAC3D, Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3Dimensions. Users Manual.
- Jeon, Y.S., Yang, H.S., (2004) "Development of a back analysis algorithm using FLAC" *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol.41. pp. 447-453.
- Kaiser P.K. & Zou D. & Lang P.A., (1998), "Stress Determination by Back Analysis of Excavation-Induced Stress Change ", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol. 23, pp. 165-200.
- Kennedy, J. Eberhart, R., 1995. Particle swarm optimization. In: proceeding of the IEEE international conference on neural networks, Australia.
- Khamesi, H., Torabi, S.R., Mirzaei, H., Ghadiri, Z. (2015) "Improving the Performance of Intelligent Back Analysis for Tunneling Using Optimized Fuzzy Systems: Case Study of the Karaj Subway Line 2 in Iran" *Journal of Computing and Civil Engineering*, ASCE, Vol 29.
- Ledesma, A., Gens, A. and Alonso, E. (1996). "Parameter and variance estimation in geotechnical backanalysis using prior information." *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech*, vol. 20, pp. 119-141.
- Lv, Q., Liu, Y. and Yang, Q. (2017) "Stability analysis of earthquake-induced rock slope based on back analysis of shear strength parameters of rock mass" *Engineering Geology*, 228, pp.39-49.
- Luo, Y., Chen, J., Chen, Y., Diao, P., Qiao, X. (2018)."Longitudinal deformation profile of tunnel in weak rock mass by using the back analysis method" *Tunneling & Underground Journal Space Technology*, Vol71, pp. 478-493.
- Mattsson, H., Klisinski, M. and Axelsson, K. (2001), "Optimization routine for identification of model parameters in soil plasticity." *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech*, vol. 25, pp. 435-472.
- Oreste, P., (2005)" Back-analysis techniques for the improvement of the understanding of rock in underground constructions", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol.20. pp.7-21.
- Ochmanski m. and Bzowka, J., (2012) "Back Analysis of SCL Tunnels based on Artificial neural network" *Architecture, Civil Engineering, Environment-ACEE Journal*, Vol 3, pp. 73-88.

- Sakurai S, (2010), “Field Measurements for Assessing the Stability of Tunnels and Slopes”, Past President of ISRM, National Technical University Athens
- Sakurai S. (1981) “Direct strain evaluation technique in construction of underground opening” In The 22nd US Symposium on Rock Mechanics (USRMS). American Rock Mechanics Association.
- Sakurai S., (1997) “lessons learned from field measurements in tunneling”, *Tunnelling and underground space technology*, Vol. 12, No. 4, pp. 453-460.
- Sakurai S., Akutagawa S., Takeuchi K., Shinji M. and Shimizu N. (2003) “Back analysis for tunnel engineering as a modern observational method” *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 18(2), pp.185-196.
- Sakurai S., and Takeuchi K., (1983) “Back Analysis of Measured Displacements of Tunnels”, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 16(3), pp. 173-180.
- Sakurai, S. (1993) "Assessment of cut slope stability by means of back analysis of measured displacements, In Pasamehmetoglu, A.G., Kawamoto, T., Whittaker, B.N. & Aydan, O. (Eds)", *Assessment and Prevention of Failure Phenomena in Rock engineering*, Proc. Int. Symp. On Assessment and Prevention of Failure Phenomena in Rock Engineering, 5–7 April, Istanbul, Turkey. Rotterdam Brookfield: A.A. Balkema, 3–9.
- Sakurai S., (2017), "Back Analysis in Rock Engineerin" ISRM Book Series, No4.
- Shanga, Y.J. Caib, J.G., W.D. Haoc, X.Y. Wuc, S.H. Lia, c, (2002) "Intelligent back analysis of displacements using precedent type analysis for tunneling. *Tunnelling and Underground Space Technology*", Vol 17: pp. 381–389.
- Sigh, Bhawani, Goel, Rajnish K., (2006), “Tunneling in Weak Rocks”, UK., Elsevier Geo. Engineering Book Series, Vol.5, pp. 230- 235.
- Sinha R.S., (1989), “Underground Structure Design and Instrument”, University of Michigan, Publisher by Elsevier geoscience, London.
- Sivanandam, S., Samithi, S., Deepa, SN., (2007). "Introduction to fuzzy logic using Matla", Springer, 430pp.
- Smola, Alex J, and Bernhard Schölkopf, (2004), "A tutorial on support vector regression", *Statistics and computing*, Vol14 (3), pp.199-222.
- Torres, C.C., Diederichs, M., (2008). "Mechanical analysis of circular liners with particular reference to composite supports. For example, liners consisting of shotcrete and steel sets," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 24, pp. 506-532.
- Vardakos S., (2007), PhD. thesis, “Back-analysis methods for optimal tunnel design” Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Wang, L., (1997). " A course in fuzzy Systems and control", Prentice-Hall International, Inc.
- Wang Z.L., Li Y., Shen R.F., (2007), “Correction of soil parameters in calculation of embankment settlement using a BP network back-analysis model”, *Engineering Geology*, Vol. 19, Published by Elsevier Ltd, PP. 168-177.
- Xiaohui, H., (2006). PSO tutorial. (www.swarmintelligence.org, accessed in April, 2013).

- Yang, Z. and Elgmal, A. (2003) "Application of unconstrained optimization and sensitivity analysis to calibration of a soil constitutive model." *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech*, vol. 27, pp. 1277-1297.
- Yagiz, S. Karahan, H., 2011. "Prediction of hard rock TBM penetration rate using Particle Swarm Optimization." *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol 48, p 427–433.
- Zadeh L.A., (1965), "Fuzzy sets". *Information and Control*, Vol8, PP. 338–353.
- Zhu, C. and Zhao, M. (2014) "Back Analysis of geomechanical parameters in underground engineering using artificial bee colony" *The Scientific World Journal*, Vol. 2014, Article Id 693812, 13 Pages.
- Zhu, W. Zhao, J., Hudson, J., (2004) "Stability Analysis and Modelling of Underground Excavations in Fractured Rocks", Publishing by Elsevier.
- Zhifa Y., Lee C.F., (2000), "Three- Dimensional Back Analysis of Displacement in Exploration Adits- Principles and Application", *International urnal f Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol.37, Published by Elsevier Ltd, PP.525- 533.
- Zhao H.B., Yin S., (2009), "Geomechanical parameters identification by particle swarm optimization and support vector machine", *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 33, Published by Elsevier Ltd, PP. 3997-4012.

Abstract

The main basis in the analysis of stability and design of underground structures is the knowledge of the geomechanical parameters of the underground spaces. There are various methods for determining these parameters, which are sometimes used and only take a lot of time. One of them is back analysis methods. Various methods have been proposed for back analysis. The elementary methods include Direct, inverse and statistical methods. These methods take a lot of time and of course are not very accurate. The inverse method is simplification assumptions such as uniform environment, linear stress and single stage drilling. In reality, the situation is not like this. In the direct method, the optimization of the objective function requires multiple corrections of parameters, each of which requires at least one calculation. Numerical solution is therefore time consuming, especially for large models. Recently, intelligent Back analysis methods have been proposed to overcome these problems.

The case study in this project is Alborz tunnel. Alborz Tunnel is a tunnel in Tehran-Shomal subway. In this study, two types of back analysis systems have been selected to determine the geomechanical parameters of rock mass and in-situ stress conditions for three stations in different formations. Considering that the type of major formations in Alborz tunnel is of consolidation type C, this type has been used in this study. For this purpose, using the monitoring data and geological studies, numerical modeling of the Alborz tunnel by FLAC3D was performed to produce the input-output data pairs required for the design of the intelligent back analysis system. Then, two types of back analysis systems PSO and SVM were selected for this study after searching and optimization, they determined the parameters of the rock mass. Using sensitivity analysis, the values of modulus of elasticity, stress ratio and Hoek-Brown criteria model parameters were selected as input parameters. The use of the Hoek-Brown criteria model was chosen as the criteria model in this study, because it is closer to the actual results and more inputs are used to determine them. To evaluate the performance of the selected intelligent systems, after estimating the values of the rock mass parameters, the data were compared with the instrumentation results of the sections. The results showed that the selected systems correctly predicted different values of rock mass. Using the error calculated for each of the systems, it was found that the PSO algorithm had an error of 1/7% and the

SVM algorithm had an error of 3/75%. Finally, it was shown that the PSO algorithm has a very good performance in estimating the input parameters of the back analysis system.

Key words: intelligent back analysis, PSO, SVM, Alborz tunnel, determine geomechanical parameters.



Shahrood university of technology

Faculty of mining engineering, petroleum and geophysics

Master of science in rock mechanics engineering

**Determination of Geomechanical Parameters and In-Situ Stress of Rock Mass
Using Back Analysis and Monitoring Data-Case Study Alborz Tunnel**

By: Seyed Shahab-edin Banijamali

Supervisors:

Dr. S. Zare

Advisors:

Dr. M. Javadi Estahbanati

February 2021