



دانشگاه صنعتی شاهرود  
دانشکده مهندسی معدن و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد - گرایش اکتشاف

بررسی قابلیت‌های روش TSP در تعیین خواص ژئومکانیکی  
سنگ‌های مسیر حفر تونل  
(مطالعه موردی: تونل انتقال آب چشمه روزیه)

نگارنده

اندیشه علی‌مرادی

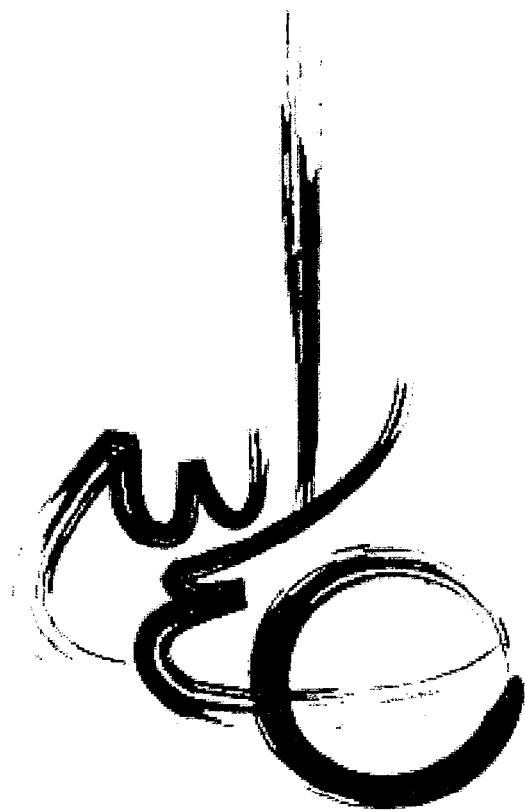
اساتید راهنما

دکتر علی مرادزاده      دکتر رضا نادری

استاد مشاور

مهندس مجتبی زادصالحی

تابستان ۱۳۸۶



تقدیم به

پدر بزرگ مهربانم که یادش همیشه در دل ماست

روحش شاد

## تقدیر و تشکر

سپاس و ستایش خدای را که مرا مورد لطف و عنایتش قرار داد تا به کمک بزرگوارانی که به گونه‌های مختلف مرا یاری نمودند، این تحقیق را به انجام برسانم. از این رو ضمن تقدیر و تشکر از این عزیزان، توفیق روز افزون آنان را از ایزد یکتا خواستارم.

بدین وسیله از زحمات بی دریغ اساتید محترم آقای دکتر مرادزاده و آقای دکتر نادری و استاد مشاور ارجمند، آقای مهندس زادصالحی که با رهنمودهای ارزشمندشان مرا در انجام هرچه بهتر این پایان‌نامه یاری فرمودند، صمیمانه تشکر و سپاسگزاری می‌نمایم.

همچنین از اساتید محترم آقای دکتر پیروز و آقای دکتر سرشکی که زحمت داوری این پایان‌نامه را بر عهده داشتند کمال تشکر و قدردانی را دارم.

از آقای دکتر کاکائی، ریاست محترم دانشکده مهندسی معدن و ژئوفیزیک، و آقای دکتر دولتی ریاست محترم گروه اکتشاف، به پاس راهنمایی‌های ارزشمندشان در طی دوران تحصیل صمیمانه سپاسگزارم. همچنین از آقای شاه‌حسینی که در این مدت از هیچ‌گونه کمکی دریغ نکردند، تشکر می‌نمایم.

در ضمن لازم می‌دانم که از راهنمایی‌های ارزنده آقای مهندس اعتمادی (شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس) و کمک‌های بی دریغ شرکت‌های ژئوتک، ساب و دریا خاک پی تقدیر و تشکر نمایم.

در پایان از کلیه دوستان و عزیزانی که مرا در انجام این پایان‌نامه یاری نموده‌اند، صمیمانه سپاسگزارم و برایشان آرزوی موفقیت دارم.

## چکیده

در حفاری‌های زیرزمینی عمیق، پیش‌بینی موقعیت ساختارهای مخاطره آمیز ژئوتکنیکی با مقیاس کوچک همچون گسل‌ها در شرایطی که صرفاً از روش‌های اکتشاف سطحی استفاده شود، تقریباً غیر ممکن است. بنابراین برای بسیاری از تونل‌ها، اکتشاف در جلوی سینه‌کار تونل امری اجتناب ناپذیر است. این پایان‌نامه به بهبود روش‌های تفسیر زمین‌شناسی مهندسی داده‌های لرزه‌ای که در حفاری‌های زیرزمینی برداشت می‌شوند، می‌پردازد. بدین منظور یکسری داده‌های لرزه‌ای افقی که توسط روش جدیدی به نام TSP (Tunnel Seismic Prediction) در طول ۶۸۴ متر از تونل ۳۲۰۰ متری انتقال آب چشمه روزیه سمنان برداشت شده بود، مورد بررسی قرار گرفت. هدف به دست آوردن پارامترهای لرزه‌ای و مکانیکی سنگ از قبیل سرعت موج فشاری و برشی، ضریب پواسون و مدول یانگ دینامیک است که در ارتباط با خصوصیات مهم زمین‌شناسی مهندسی توده سنگ می‌باشند. با در دست داشتن این پارامترها می‌توان به تعیین فصل مشترک‌ها و قضاوت در مورد پایداری زون‌های موجود پرداخت.

تفسیر داده‌های لرزه‌ای TSP با کمک نرم افزار TSPwin صورت گرفت. زون‌های محکم و همچنین زون‌های خرد شده حاوی آب به خوبی نشان داده شدند. در سه بخش مختلف از تونل زون‌های بسیار خرد شده و تحت فشاری وجود دارند که فاقد آب در داخل درز و ترکها می‌باشند. روش TSP در مواجهه شدن با این زون‌ها قادر به تشخیص آن‌ها نمی‌باشد. دلایل آن می‌تواند به پیچیدگی داده‌های لرزه‌ای و همچنین رابطه غیر خطی آنها با پارامترهای زمین‌شناسی و ژئومکانیکی اندازه‌گیری شده مربوط باشد. به منظور تصحیح و تفسیر داده‌ها و رفع مشکل فوق از روش مدل‌سازی هوشمند شبکه‌های عصبی استفاده می‌شود. بدین منظور برنامه‌ی مربوطه تهیه و مدل

به دست آمده بر روی بخشی از تونل فوق مورد آزمایش قرار گرفت و با دقت بسیار خوبی زون‌های خرد شده مورد نظر تعیین گردیدند. از آنجایی که این روش به جای یک خصوصیت از چند خصوصیت لرزه‌ای برای طبقه‌بندی توده سنگ استفاده می‌کند، لذا طبقه‌بندی حاصل بهتر و قابل اعتمادتر می‌باشد. مدل حاصل بر روی داده‌های لرزه نگاری TSP در تونل دیگری نیز اعمال و با روش تصحیح شده اطلاعات آن تفسیر گردید. نتایج در تونل دوم نیز بسیار نزدیک به شرایط واقعی زمین می‌باشد.

## فهرست مطالب

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
الف.....	تقدیم.....
ب.....	تقدیر و تشکر.....
ج.....	چکیده.....
ه.....	فهرست مطالب.....
ط.....	فهرست علائم و اختصارات.....
ک.....	فهرست جداول.....
م.....	فهرست اشکال.....
۱.....	فصل اول - مقدمه.....
۲.....	۱-۱- کلیات.....
۳.....	۲-۱- روش‌های مخرب.....
۳.....	۱-۲-۱- حفاری ضربه‌ای.....
۴.....	۲-۲-۱- حفاری مغزه‌گیری.....
۵.....	۳-۱- روش‌های غیر مخرب.....
۶.....	۱-۳-۱- روش تحلیل طیف امواج سطحی (SASW).....
۷.....	۲-۳-۱- روش UPE.....
۸.....	۳-۳-۱- روش رادار نفوذ در زمین (GPR).....
۹.....	۴-۳-۱- روش رادیوگرافی اشعه X.....
۱۰.....	۵-۳-۱- روش GP.....

- ۱۱-۳-۶- IE روش ..... ۱۱
- ۱۲-۳-۷- روش حرارت سنجی مادون قرمز ..... ۱۲
- ۱۳-۴-۱- روش TSP 203 ..... ۱۳
- ۱۶-۴-۱- سابقه کاربرد روش TSP 203 ..... ۱۶
- ۱۶-۵-۱- ضرورت انجام مطالعه و هدف از آن ..... ۱۶
- ۱۷-۶-۱- ساختار پایان نامه ..... ۱۷

## فصل دوم - معرفی روش TSP 203 و بررسی روش‌های پردازش داده‌های آن ..... ۱۹

- ۲۰-۱-۲- مقدمه ..... ۲۰
- ۲۳-۲-۲- اصول لرزه نگاری انعکاسی در TSP 203 ..... ۲۳
- ۲۳-۱-۲-۲- تأثیر محیط بر انتشار موج ..... ۲۳
- ۲۳-۱-۲-۱- واگرایی کروی ..... ۲۳
- ۲۵-۲-۱-۲- جذب ..... ۲۵
- ۲۶-۲-۱-۳- افزایش انرژی در سطح مشترک ..... ۲۶
- ۲۷-۲-۲- تأثیر تغییرات سنگ بر روی پلاریزاسیون سیگنال ..... ۲۷
- ۲۹-۲-۳- تأثیر تغییرات سنگ بر روی انرژی موج ..... ۲۹
- ۳۰-۲-۴- تأثیر واگرایی کروی بر روی انرژی موج ..... ۳۰
- ۳۱-۲-۵- تئوری نمونه برداری ..... ۳۱
- ۳۲-۳-۲- پردازش داده‌ها در نرم افزار TSPwin ..... ۳۲
- ۳۳-۱-۳-۲- تنظیم اولیه داده‌ها ..... ۳۳
- ۳۴-۲-۳-۲- تعیین سرعت امواج طولی و عرضی ..... ۳۴
- ۳۵-۳-۳-۲- تعیین فصل مشترک‌ها ..... ۳۵
- ۴۱-۴-۳-۲- بررسی پایداری مسیر پیشروی تونل ..... ۴۱



## فصل سوم - بررسی نتایج حاصل از بکارگیری روش TSP 203 در تونل انتقال آب چشمه

روزیه.....	۴۵
۱-۳- مقدمه.....	۴۶
۲-۳- تونل انتقال آب چشمه روزیه به سمنان.....	۴۶
۱-۲-۳- موقعیت جغرافیایی تونل.....	۴۶
۲-۲-۳- زمین‌شناسی و تکتونیک منطقه تونل.....	۴۸
۱-۲-۲-۳- ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی محدوده تونل.....	۴۸
۲-۲-۲-۳- زمین‌ساخت منطقه.....	۴۸
۳-۲-۲-۳- مطالعات زمین‌شناسی و تکتونیک انجام شده و اهمیت انجام مطالعات جدید.....	۴۹
۳-۲-۳- عملیات میدانی.....	۵۰
۴-۲-۳- پردازش داده‌ها.....	۵۲
۵-۲-۳- بررسی صحت روش TSP 203.....	۵۹

## فصل چهارم - کاربرد شبکه عصبی مصنوعی در جهت بهبود نتایج روش TSP 203.....

۱-۴- مقدمه.....	۶۶
۲-۴- مراحل کار.....	۶۶
۱-۲-۴- جمع‌آوری و آماده‌سازی داده‌ها.....	۶۶
۲-۲-۴- تعیین نوع شبکه مورد استفاده و معماری آن.....	۶۹
۱-۲-۲-۴- تعداد نرون‌ها در لایه ورودی و خروجی.....	۷۰
۲-۲-۲-۴- تعداد لایه‌های پنهان.....	۷۰
۳-۲-۲-۴- تعداد نرون‌ها در لایه پنهان.....	۷۱

۷۲.....	۴-۲-۲-۴- انتخاب خطای مناسب برای داده‌ها
۷۲.....	۴-۲-۲-۵- تقسیم بندی داده‌ها
۷۲.....	۴-۲-۲-۶- نرمالایز کردن داده‌ها
۷۳.....	۴-۲-۳- روشهای ارزیابی شبکه‌های عصبی مصنوعی
۷۳.....	۴-۲-۳-۱- خطای بین مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده توسط شبکه
۷۳.....	۴-۲-۳-۲- جذر میانگین مربعات خطا (RMS)
۷۴.....	۴-۲-۳-۳- ضریب رگرسیون (R)
۷۴.....	۴-۲-۴- نحوه آموزش شبکه عصبی
۷۷.....	۴-۳- شبکه عصبی آموزش داده شده و نتایج آن
۸۱.....	۴-۴- کاربرد شبکه آموزش یافته برای تونل‌های دیگر
۸۵.....	<b>فصل پنجم - نتیجه‌گیری و پیشنهاد</b>
۸۶.....	جمع‌بندی و نتیجه‌گیری
۸۸.....	پیشنهادات
۸۹.....	<b>منابع</b>
۹۳.....	<b>پیوست‌ها</b>
۹۴.....	پیوست الف - جداول
۱۰۵.....	پیوست ب - اشکال
۱۰۷.....	پیوست ج - کلیاتی در مورد شبکه‌های عصبی مصنوعی
۱۱۹.....	پیوست د - لوح فشرده نقشه زمین‌شناسی تونل و مقطع زمین‌شناسی مسیر پیشروی تونل

## فهرست علائم و اختصارات

Tunnel Seismic Prediction (TSP)	پیش‌بینی لرزه‌ای تونل
Spectral Analysis of Surface Waves (SASW)	تحلیل طیف امواج سطحی
Ground Penetrating Radar (GPR)	رادار نفوذ در زمین
X-ray Radiography	رادیوگرافی اشعه X
Infrared Thermography	حرارت سنجی مادون قرمز
Root Mean Square (RMS)	ریشه میانگین مربعات
u	جابجایی شعاعی
E	چگالی انرژی
$\rho$	چگالی محیط
f	فرکانس موج
A	دامنه موج
I	شدت انرژی
$\alpha$	ثابت جذب
$P_{REFL}$	موج طولی بازتابیده
$P_{TRANS}$	موج طولی عبور کرده
$S_{REFL}$	موج عرضی بازتابیده
$S_{TRANS}$	موج عرضی عبور کرده
RC	ضریب بازتاب
S	مولد موج
$V_P$	سرعت موج طولی
$V_S$	سرعت موج عرضی

SH	موج عرضی افقی
SV	موج عرضی قائم
M	بزرگای موج
$\sigma$	ضریب پواسون
$\mu$	مدول برشی
k	مدول حجمی
$\lambda$	ثابت لامه
E	مدول یانگ
RMR (Rock Mass Rating)	طبقه‌بندی مهندسی توده سنگ
Q	طبقه‌بندی بارتون
RQD (Rock Quality Designation)	شاخص کیفیت سنگ
$\delta$	تعداد درزه‌ها در یک متر از طول تونل

## فهرست جداول

صفحه

عنوان

### فصل اول

جدول ۱-۱- مقایسه بین چهار روش پیش‌بینی مسیر پیشروی تونل..... ۱۴

### فصل سوم

جدول ۱-۳- پارامترهای مکانیک سنگی به دست آمده از نرم افزار TSPwin - ورودی تونل از

کیلومتراژ ۱+۱۵۲ تا ۱+۲۰۵..... ۵۴

جدول ۲-۳- پارامترهای لرزه‌ای حاصل از نرم‌افزار TSPwin - ورودی تونل از کیلومتراژ ۱+۱۵۲ تا

۱+۲۰۵..... ۵۵

جدول ۳-۳- مقادیر  $RMR_{Real}$  برای ۲۰ نقطه از کیلومتراژ ۱+۱۵۲ تا ۱+۲۰۵..... ۶۱

جدول ۴-۳- مقادیر  $RMR_{TSP}$  برای ۲۰ نقطه از کیلومتراژ ۱+۱۵۲ تا ۱+۲۰۵..... ۶۲

### فصل چهارم

جدول ۱-۴- روش‌های آموزش شبکه عصبی..... ۷۴

جدول ۲-۴- نتایج الگوریتم‌های آموزش مختلف..... ۷۶

جدول ۳-۴- مینیمم و ماکزیمم مقادیر خطا برای الگوریتم آموزش Trainscg..... ۷۷

جدول ۴-۴- مشخصات شبکه طراحی شده..... ۷۸

جدول ۵-۴- نتایج برداشت TSP 203 در تونل البرز از کیلومتراژ ۳+۱۱۶ تا ۳+۲۹۸..... ۸۳

### پیوست الف

جدول الف-۱- روابط تجربی محاسبه دانسیته..... ۹۵

- جدول الف-۲- روابط مکانیکی سنگ..... ۹۵
- جدول الف-۳- پارامترهای مکانیکی سنگ به دست آمده از نرم افزار TSPwin - ورودی تونل از کیلومتر ۱+۱۵۲ تا ۱+۴۸۹..... ۹۶
- جدول الف-۴- پارامترهای مکانیکی سنگ به دست آمده از نرم افزار TSPwin - خروجی تونل از کیلومتر ۱+۸۳۶ تا ۱+۴۷۳..... ۹۸
- جدول الف-۵- پارامترهای مکانیکی سنگ به دست آمده از نرم افزار TSPwin - خروجی تونل از کیلومتر ۱+۶۵۰ تا ۱+۴۷۳..... ۱۰۰
- جدول الف-۶- مقادیر  $RMR_{TSP}$  و  $RMR_{Real}$  برای ۱۳۱ نقطه..... ۱۰۲

## فهرست اشکال

صفحه

عنوان

### فصل اول

- شکل ۱-۱- نمایش شماتیک روش SASW..... ۷
- شکل ۲-۱- نمایش شماتیک روش UPE..... ۸
- شکل ۳-۱- اصول برداشت با روش GPR..... ۹
- شکل ۴-۱- روش رادیوگرافی اشعه X..... ۱۰
- شکل ۵-۱- الکتروود و کامپیوتر گیرنده در روش گالوا پالس..... ۱۱
- شکل ۶-۱- اصول برداشت با روش IE..... ۱۲
- شکل ۷-۱- مقایسه هزینه‌های روش‌های مختلف آشکار سازی..... ۱۵
- شکل ۸-۱- مقایسه هزینه‌های تأخیر ناشی از عملیات آشکار سازی در روش‌های مختلف..... ۱۵

### فصل دوم

- شکل ۱-۲- آرایش نقاط انفجار و گیرنده‌ها نسبت به سینه کار تونل..... ۲۱
- شکل ۲-۲- برخورد موج حاصل از هر مولد به یک نقطه از فصل مشترک..... ۲۲
- شکل ۳-۲- نمودار تریس یا اثرهای لرزه‌ای برداشت شده و سرعت موج محاسبه شده..... ۲۲
- شکل ۴-۲- جبهه موج کروی که از مرکز O واگرایی دارد..... ۲۴
- شکل ۵-۲- کاهش دامنه موج کروی به نسبت عکس فاصله از چشمه..... ۲۵
- شکل ۶-۲- افراز انرژی در فصل مشترک دو لایه..... ۲۶
- شکل ۷-۲- تأثیر تغییرات سنگ بر روی پلاریزاسیون سیگنال..... ۲۷
- شکل ۸-۲- کاهش زمان رسیدن موج بازتابی به گیرنده با افزایش فاصله مولد از گیرنده..... ۲۸
- شکل ۹-۲- کاهش زمان رسیدن موج بازتابی به گیرنده با افزایش فاصله مولد از گیرنده..... ۲۹

- شکل ۲-۱۰- تأثیر تغییرات سنگ بر روی انرژی موج..... ۳۰
- شکل ۲-۱۱- تأثیر واگرایی کروی بر روی انرژی موج..... ۳۰
- شکل ۲-۱۲- تئوری نمونه برداری - افزایش فرکانس موج باعث ایجاد پدیده دگرنامی شده است..... ۳۲
- شکل ۲-۱۳- انتقال داده‌ها از حوزه زمان به حوزه فرکانس با انجام تبدیل فوریه..... ۳۳
- شکل ۲-۱۴- اعمال فیلتر پهنه گذر بر روی داده‌ها..... ۳۴
- شکل ۲-۱۵- تعیین سرعت موج طولی..... ۳۵
- شکل ۲-۱۶- تعیین سرعت موج عرضی..... ۳۵
- شکل ۲-۱۷- اعمال شبکه منظم مربعی در اطراف تونل به منظور آنالیز سرعت‌ها..... ۳۶
- شکل ۲-۱۸- ثابت و برابر بودن مجموع فواصل هر نقطه از محیط بیضی تا دو کانون آن..... ۳۶
- شکل ۲-۱۹- آنالیز سرعت‌ها به منظور مشخص کردن بیضی انعکاس..... ۳۷
- شکل ۲-۲۰- بیضی انعکاس حاصل برای مولدهای ۱۰ و ۲۴..... ۳۸
- شکل ۲-۲۱- تلاقی دو بیضی مربوط به مولدهای ۱۰ و ۲۴ و مشخص کردن محل فصل مشترک..... ۳۹
- شکل ۲-۲۲- بیضی‌های حاصل از آنالیز سرعت‌ها در مسیر پیشروی تونل با اعمال دو محدودیت دامنه و همپوشانی..... ۴۰
- شکل ۲-۲۳- کاهش تعداد بیضی‌ها به بیضی‌های غالب با اعمال محدودیت تعداد..... ۴۰
- شکل ۲-۲۴- مدل سه بعدی لایه بندی مسیر پیشروی تونل..... ۴۱
- شکل ۲-۲۵- پارامترهایی که روش TSP 203 قادر به تعیین آنها می‌باشد..... ۴۲
- شکل ۲-۲۶- خروجی نرم‌افزار TSPwin..... ۴۲
- شکل ۲-۲۷- تحلیل پایداری مسیر پیشروی تونل در نرم‌افزار TSPwin..... ۴۴

## فصل سوم

- شکل ۳-۱- موقعیت جغرافیایی چشمه روزبه به سمنان..... ۴۷
- شکل ۳-۲- مقطع طولی عوارض زمین‌شناسی مسیر تونل..... ۴۹



- شکل ۳-۳- موقعیت قرارگیری چال‌های انفجاری، گیرنده‌ها و سینه‌کار..... ۵۱
- شکل ۳-۴- اطلاعات لرزه‌ای خام مربوط به گیرنده شماره ۱ در تونل ورودی در سه بعد X, Y, Z..... ۵۳
- شکل ۳-۵- پیش‌بینی وضعیت سنگ‌های مسیر پیشروی تونل با استفاده از نتایج برداشت اول از سمت خروجی تونل - کیلومتر از ۱+۸۳۶ تا ۱+۴۷۳..... ۵۶
- شکل ۳-۶- پیش‌بینی وضعیت سنگ‌های مسیر پیشروی تونل با استفاده از نتایج برداشت دوم از سمت خروجی تونل - کیلومتر از ۱+۶۵۰ تا ۱+۴۱۷..... ۵۷
- شکل ۳-۷- نقشه زمین‌شناسی تونل از کیلومتر از ۱+۲۰۰ تا ۱+۲۲۰..... ۵۹
- شکل ۳-۸- مقادیر  $RMR_{Real}$  و  $RMR_{TSP}$  برای ۱۳۱ نقطه مورد نظر..... ۶۳

#### فصل چهارم

- شکل ۴-۱- مراحل کار با شبکه عصبی..... ۶۸
- شکل ۴-۲- معماری شبکه عصبی مورد استفاده..... ۶۸
- شکل ۴-۳- روند اجرای شبکه BP..... ۷۰
- شکل ۴-۴- شکل شماتیک از شبکه طراحی شده..... ۷۱
- شکل ۴-۵- ضریب رگرسیون برای داده‌های آموزش..... ۷۹
- شکل ۴-۶- ضریب رگرسیون برای داده‌های آزمون..... ۸۰
- شکل ۴-۷- مقایسه نتایج حاصل از شبکه و داده‌های واقعی برای سری داده‌های آزمون..... ۸۰
- شکل ۴-۸- مقادیر  $RMR$  حاصل از روش TSP 203 (دایره‌های کوچک) و شبکه عصبی (مثلث‌های کوچک) در تونل البرز..... ۸۴

#### پیوست ب

- شکل ب-۱- مقطع زمین‌شناسی مسیر پیشروی تونل..... ۱۰۶

### پیوست ج

- شکل ج-۱- یک شبکه عصبی مصنوعی..... ۱۰۸
- شکل ج-۲- فرآیند آموزش شبکه عصبی..... ۱۰۹
- شکل ج-۳- یک نرون با چند ورودی..... ۱۱۰
- شکل ج-۴- یک شبکه سه لایه‌ای..... ۱۱۱

# فصل اول

مقدمه

## ۱-۱- کلیات:

در دنیای امروز، رشد جمعیت و نیاز روز افزون به منابع آبی و از طرف دیگر مشکلات حمل و نقل باعث شده تا بشر بیشتر به احداث و بکارگیری تونل‌ها روی آورد. به زبان ساده تونل<sup>۱</sup> عبارت است از یک مجرای زیرزمینی که به صورت مصنوعی حفر شده و به منظور انتقال آب و یا حمل و نقل مورد استفاده قرار می‌گیرد. فرآیند تونل‌سازی به شدت وابسته به شرایط زمین‌شناسی می‌باشد. بنابراین داشتن اطلاعات از وضعیت زمین شناسی منطقه علی‌الخصوص مسیر پیشروی تونل بسیار مهم است. "تونل‌های جدید بسیار زیادی در شهرها ساخته خواهند شد و شما به عنوان یک مهندس باید به طراحی تونل در محلی که کارفرما نیاز دارد و یا در جایی که متخصص ترافیک می‌گوید، اقدام کنید. و نه در جایی که مناسب‌ترین وضعیت زمین شناسی وجود دارد" (Bosshard, 2004). جمله ذکر شده از مارتین بوسهارد نیز تأییدی بر این مطلب است که ارزیابی مسیر پیشروی تونل‌ها یک امر اجتناب ناپذیر می‌باشد. از آنجایی که تونل‌ها باید مدت‌ها مورد استفاده قرار گیرند و از طرفی سرمایه گذاری در این قبیل پروژه‌ها نیز بسیار سنگین می‌باشد، لذا ارزیابی هرچه دقیقتر، کاهش در زمان حفر تونل، اعتماد بیشتر سرمایه گذار و کاهش ریسک در عملیات تونل‌سازی را بدنبال خواهد داشت.

با توجه به آنچه گفته شد و به منظور به دست آوردن اطلاعات زمین‌شناسی از مسیر حفر تونل‌ها، روش‌های متعددی ارائه گردیده است. در این میان تکنیک‌هایی که به سرعت و با دقت مناسب قادر به تعیین شرایط موجود در اطراف و در جلوی سینه کار تونل می‌باشند، بسیار مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. روش‌های موجود به طور کلی به دو دسته روش‌های مخرب<sup>۲</sup> و غیر مخرب<sup>۳</sup> تقسیم می‌شوند، که هر یک دارای مزایا و معایبی می‌باشند.

1- Tunnel

2- Destructive Methods

3- Non Destructive Methods

ایراد روش‌های مخرب، هزینه بالا و سرعت پائین آنها، و مشکل بزرگ روش‌های غیر مخرب، عمق نفوذ کم و دقت پائین آنها می‌باشد. چنانچه اکثر روش‌های غیر مخرب، صرفاً پس از احداث تونل و به منظور کنترل (پایش)<sup>۴</sup> رفتار سنگهای اطراف سیستم نگهداری تونل مورد استفاده قرار می‌گیرند. به اجمال هر یک از روش‌های ذکر شده توضیح داده می‌شوند:

#### ۱-۲- روش‌های مخرب

روش‌های مخرب به آن دسته از روش‌ها اطلاق می‌شود که در ارزیابی تونل‌ها، تخریب بخشی از دیواره و یا سینه کار تونل به منظور دستیابی به نمونه‌های سنگ بکر و انجام آزمایشات بر روی آنها اجتناب ناپذیر است.

این روش‌ها به دلیل اینکه مستقیماً به نمونه سنگ مورد نظر دسترسی دارند، دارای دقت بالایی می‌باشند. ولی از طرفی دارای هزینه بالا و سرعت پایینی نیز می‌باشند. از روش‌های مخرب می‌توان دو روش حفاری ضربه‌ای<sup>۵</sup> و حفاری مغزه‌گیری<sup>۶</sup> را نام برد.

#### ۱-۲-۱- حفاری ضربه‌ای

ابزار حفاری ضربه‌ای از اواسط قرن نوزدهم میلادی مورد استفاده قرار گرفت. چال‌هایی را که می‌توان با اینگونه ابزار حفاری کرد، معمولاً دارای قطر و عمق‌های متفاوتی می‌باشند. ابزار اینگونه حفاری‌ها دريفترهای مکانیکی واگن دریل‌ها، نوع کابلی و هیدرولیکی می‌باشند. انرژی مورد نیاز برای حفر سنگ در بیشتر سیستم‌های حفاری ضربه‌ای (به غیر از هیدرولیکی)، توسط هوا تأمین می‌شود و پیستون با ضربه‌های پی در پی و ممتدی که در هر دقیقه به میله و از آن به مته وارد می‌کند، انرژی را به سنگ منتقل می‌کند و چون این انرژی بر مقاومت سنگ فزونی دارد، باعث حفر آن می‌شود (اصانلو ۱۳۷۵).

4- Monitoring  
5- Percussion Drilling  
6- Core Drilling

**مزایا:**

- با مطالعه خرده‌های حفاری حاصل می‌توان جنس سنگ‌های میسر پیشروی تونل را تعیین کرد.
- کار با این روش نیاز به متخصص خبره ندارد.

**معایب:**

- سرعت روش پایین است.
- هزینه این روش نسبتاً بالا می‌باشد.
- دسترسی به سینه کار تونل لازم است.
- به علت خرد شدن سنگ‌ها و عدم وجود مغزه، با این روش نمی‌توان محل عوارض، مشخصات مکانیکی و فصل مشترک‌ها را مشخص کرد.

**۱-۲-۲- حفاری مغزه گیری**

هدف از حفر این قبیل گمانه‌ها، شناسایی وضعیت، ضخامت، جنس و مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌هایی است که تونل از آنها عبور می‌کند. به کمک این گمانه‌ها اطلاعاتی در مورد وضعیت آبهای زیرزمینی منطقه نیز حاصل می‌شود. این اهداف با انجام آزمایش‌های مختلف بر روی نمونه‌های حاصل از حفر این گمانه‌ها، موسوم به مغزه، و نیز انجام بعضی آزمایش‌های برجا در داخل گمانه‌ها حاصل می‌شود (مدنی ۱۳۷۷).

از آنجایی که تونل یک سازه خطی<sup>۷</sup> است، لذا شبکه گمانه‌ها می‌بایست در بخش‌هایی که پیش بینی می‌شود مشکلات بیشتری دارند، متمرکز شود. بعضی از قسمت‌هایی که به اکتشافات بیشتری نیاز دارند عبارتند از (Bickel and Kuesel, 1996):

الف- دهانه‌های تونل

ب- قسمت‌هایی از مسیر که فاصله تا سطح زمین کم است، زیرا سنگ‌های این قسمت‌ها معمولاً ضعیف می‌باشند.

ج- قسمت‌هایی که عمق زون هوازدگی<sup>۸</sup> سنگ‌ها زیاد است.

د- افق‌های آبدار

ه- مناطق برشی<sup>۹</sup>

#### مزایا:

- کار با این روش نیاز به متخصص خبره ندارد.
- این روش نوع سنگ‌های موجود در مسیر پیشروی تونل را به خوبی مشخص می‌کند.
- با کمک آزمایش بر روی مغزه‌ها می‌توان خصوصیات مکانیکی سنگ‌های مسیر پیشروی تونل را به خوبی تعیین کرد.
- با کمک این روش محل فصل مشترک سنگ‌ها به خوبی مشخص می‌شود.

#### معایب:

- سرعت روش پایین می‌باشد.
- هزینه روش بسیار بالا می‌باشد.
- جهت تعیین وضعیت مسیر پیشروی تونل در حین حفر آن به کمک این روش، دسترسی به سینه کار تونل الزامی است.

### ۱-۳- روش‌های غیر مخرب

روش‌های غیر مخرب که عمدتاً جزء روش‌های ژئوفیزیکی می‌باشند، هم در سطح و هم در زیر زمین قابل اجرا هستند. این روش‌ها به دلیل عدم تخریب، سرعت بالا و هزینه‌های بسیار کمتر نسبت به روش‌های مخرب، بسیار مورد توجه مهندسين و کارفرمایان پروژه‌های تونل‌سازی قرار گرفته‌اند. قاعدتاً روش‌های غیر مخرب به دلیل عدم دسترسی به سنگ بکر، دارای خطای بالاتری نسبت به روش‌های مخرب می‌باشند. ولی با توجه به سرعت عمل بالای آنها، در اکثر موارد این

8- Weathered Zone

9- Shear Zones

روش‌ها بر روش‌های مخرب ترجیح داده می‌شوند. از بین روش‌های غیر مخرب می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- روش تحلیل طیف امواج سطحی (SASW)<sup>۱۰</sup>
- روش UPE<sup>۱۱</sup>
- روش رادار نفوذ در زمین (GPR)<sup>۱۲</sup>
- روش رادیوگرافی اشعه X<sup>۱۳</sup>
- روش GP<sup>۱۴</sup>
- روش IE<sup>۱۵</sup>
- روش حرارت سنجی مادون قرمز<sup>۱۶</sup>

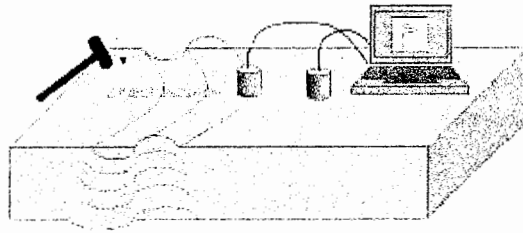
هر یک از روش‌های گفته شده دارای یکسری محدودیتها، مزایا و معایبی می‌باشند که به اجمال به بحث پیرامون هر کدام پرداخته می‌شود.

### ۱-۳-۱- روش تحلیل طیف امواج سطحی (SASW)

تحلیل طیفی امواج سطحی (SASW) یک روش غیر مخرب ژئوفیزیکی برجا برای تعیین سرعت امواج برشی<sup>۱۷</sup> می‌باشد (شکل ۱-۱). این روش نیاز به یک سطح در دسترس برای انجام آزمایش دارد. عمقی که به وسیله این روش قابل اندازه‌گیری می‌باشد، به وسعت سطح در دسترس بستگی دارد. یک لایه نازک با سرعت پایین که بین دو لایه ضخیم با سرعت بالا قرار گرفته است، قابل تشخیص نمی‌باشد. مخصوصاً اگر این لایه در عمق زیاد واقع باشد (Klinghoffer, 2002). دقت روش SASW در تعیین ضخامت و سختی<sup>۱۸</sup> لایه بالایی حدود ۵٪ است.

- 
- 10- Spectral Analysis of Surface Waves
  - 11- Ultrasonic Pulse Echo
  - 12- Ground Penetrating Radar
  - 13- X-ray Radiography
  - 14- Galvano Static Pulse
  - 15- Impact Echo
  - 16- Infrared Thermography
  - 17- Shear Waves
  - 18- Stiffness





شکل ۱-۱- نمایش شماتیک روش SASW- ایجاد امواج ری لی و برداشت آنها (Klinghoffer, 2002)

### مزایا:

- تعیین پروفیل ضخامت خاک. شامل لایه سطحی، لایه تحتانی و لایه های مابین این دو.
- تعیین پروفیل سرعت موج در خاک<sup>۱۹</sup> که مورد نیاز تحلیل های زلزله<sup>۲۰</sup> و بارگذاری دینامیکی<sup>۲۱</sup> می باشد.
- بررسی وضعیت بتن نگهدارنده تونل ها و یا سازه های بتنی دیگر.

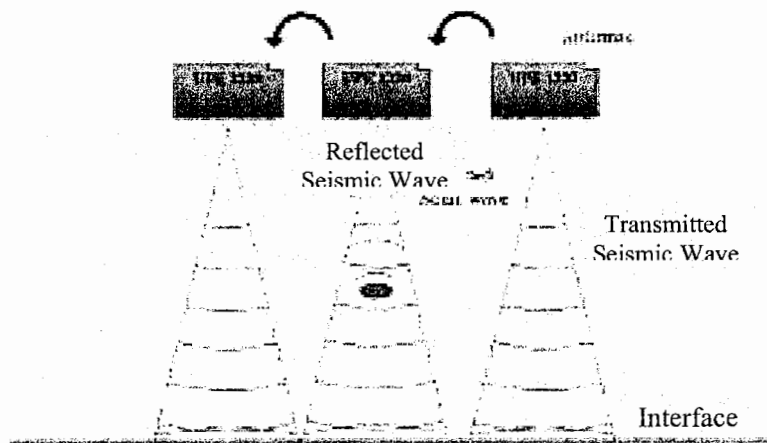
### معایب:

- این روش صرفاً سرعت موج برشی را تعیین می کند و قادر به تعیین سرعت موج فشاری<sup>۲۲</sup> نمی باشد. در نتیجه امکان تعیین پارامترهای مهندسی سنگ و خاک وجود ندارد.
- در این روش حتماً باید دسترسی به سینه کار تونل وجود داشته باشد.
- چون عمق بررسی این روش وابسته به وسعت سینه کار تونل می باشد و سینه کار تونل نیز محدود می باشد، لذا عمق نفوذ نیز محدود می شود.

### ۱-۳-۲- روش UPE

UPE، تکنیکی برای ثبت انعکاس امواج اولتراسونیک می باشد که با فرکانسی بیش از فرکانس امواج شنیداری (20000Hz) نوسان می کنند. این روش همانند تکنیک سونداژ به وسیله چکش<sup>۲۳</sup> در تشخیص حفرات در داخل بتن می باشد (شکل ۱-۲).

- 19- Soil Velocity Profile
- 20- Earthquake Analysis
- 21- Dynamic Loading Analysis
- 22- Compressional Wave Velocity
- 23- Hammer Sounding Technique



شکل ۱-۲- نمایش شماتیک روش UPE (Klinghoffer, 2002).

### مزایا:

- تعیین پروفیل ضخامت خاک، شامل لایه سطحی، لایه تحتانی و لایه‌های ما بین این دو.
- تعیین پروفیل سرعت موج در خاک که مورد نیاز تحلیل‌های زلزله و بارگذاری دینامیکی می‌باشد.
- بررسی وضعیت بتن نگهدارنده تونل‌ها و یا سازه‌های بتنی دیگر.

### معایب:

- عمق نفوذ پایین (صرفاً در محیط‌های خاکی).
- عدم تعیین پارامترهای مهندسی خاک و سنگ.
- وقتگیر بودن روش.
- این روش سطح محدودی را در بر می‌گیرد.

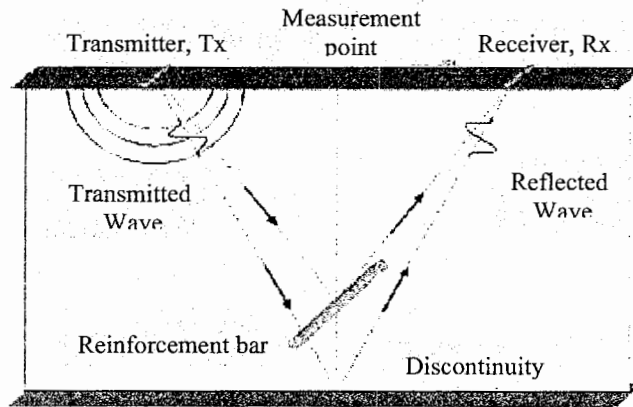
### ۱-۳-۳- روش رادار نفوذ در زمین (GPR)

سیستم RAMAC/GPR از امواج الکترومغناطیس<sup>۲۴</sup> با بازه فرکانس 10-1000MHz به منظور به نقشه در آوردن عوارض زیر سطحی و اهداف مدفون در زیر زمین و یا سازه‌های ساخت بشر استفاده می‌کند.

سیستم، شامل یک آنتن فرستنده، یک آنتن گیرنده، واحد کنترل و یک کامپیوتر قابل حمل می‌باشد. نرخ تکرار بالا (100KHz) اجازه برداشت تا ۲۰۰ اسکن در دقیقه را می‌دهد (Klinghoffer, 2002).

GPR، یک سیستم انعطاف پذیر، دارای منبع تأمین انرژی باطری و قابل استفاده توسط

یک نفر می‌باشد (شکل ۳-۱).



شکل ۳-۱- اصول برداشت با روش GPR (Klinghoffer, 2002).

#### مزایا:

- تعیین مقاومت بتن و مشخص کردن درزه و ترکهای احتمالی موجود در بتن.
- تعیین لایه‌ها و ناپیوستگی‌های زمین شناسی<sup>۲۵</sup> و درزه و ترکهای موجود در سنگ‌ها.

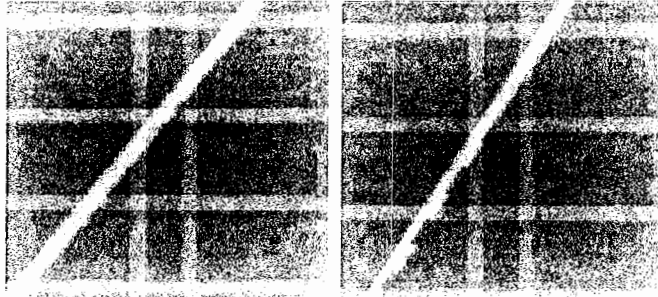
#### معایب:

- عیب عمده این روش عمق نفوذ کم آن می‌باشد.
- کار با این روش نیاز به متخصص خبره دارد.

#### ۳-۱-۴- روش رادیوگرافی اشعه X

در این روش یک دستگاه قابل حمل، یک دسته اشعه X با سطح انرژی 7.5 میلیون الکترون ولت تولید می‌کند. با این انرژی بالا، اشعه X می‌تواند به داخل لایه های ضخیم سنگی،

بتنی و یا فولادی نفوذ کند و درز و ترکهای موجود در آنها را با تصاویر اشعه X با کیفیت خوبی نشان دهد. شکل ۴-۱ قسمت سمت راست یک میله فولادی در داخل بتن مسلح را نشان می‌دهد که با کاهش ضخامت در بخش‌های پایینی مواجه شده است.



شکل ۴-۱- روش رادیوگرافی اشعه X (Klinghoffer, 2002)

#### مزایا:

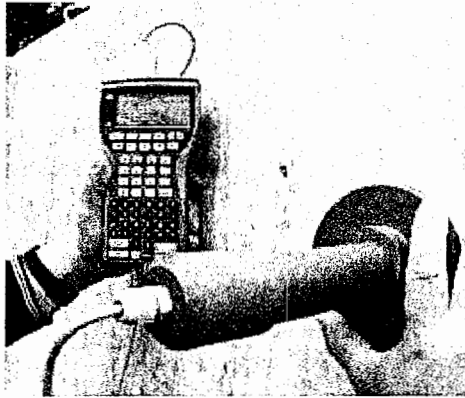
- به نقشه در آوردن وضعیت استحکام مصالح (اندازه، عمق، موقعیت).
- تعیین حفرات موجود در داخل بتن.
- تعیین نقاط تحت تنش در داخل بتن.

#### معایب:

- عمده کاربرد این روش برای بتن و لوله های فولادی می‌باشد، لذا از عمق نفوذ مناسب برای برداشت های ژئوتکنیکی برخوردار نمی‌باشد.

#### ۱-۳-۵- روش GP

تکنیک پالس گالوانو استاتیک (GPE) اولین بار در سال ۱۹۸۸ استفاده شد. این روش برای تعیین و تفسیر مشکلات موجود در بتن‌ها بکار می‌رود. از این روش همچنین برای تعیین میزان تحلیل رفتگی مصالح فولادی نیز استفاده می‌شود (شکل ۱-۵).



شکل ۱-۵- الکتروود و کامپیوتر گیرنده در روش  
گالوا پالس (Klinghoffer, 2002).

#### مزایا:

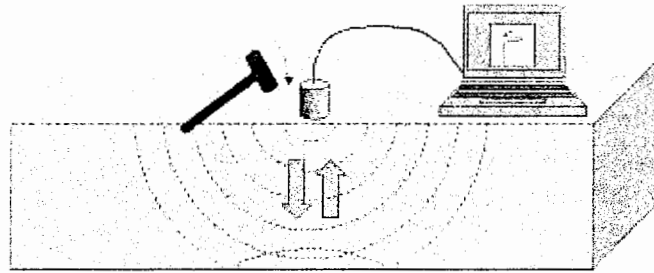
- سرعت بالای روش در تعیین وضعیت بتن و فولاد به کار رفته در تونلها ( کمتر از ۱۰ ثانیه )

#### معایب:

- عدم کاربرد برای سنگ و خاک و عدم تعیین پارامترهای مهندسی سنگ و خاک.

#### ۱-۳-۶- روش IE

این روش یک روش صوتی بسیار پیشرفته برای تشخیص و موقعیت دهی درز و ترکها در مواد می باشد. با این روش همچنین می توان ضخامت این عوارض را نیز تعیین کرد. این روش در بتن نیز کاربرد بسیار گسترده ای دارد. عملکرد این روش بر مبنای بازتاب امواج فشاری از سطح زیری عارضه مورد نظر می باشد (شکل ۱-۶).



شکل ۱-۶- اصول برداشت با روش IE (Klinghoffer, 2002)

#### معایب:

- به دلیل عمق نفوذ کم، عمده کاربرد این روش در داخل بتن‌های جداره تونل می‌باشد (Klinghoffer, 2002).

#### ۱-۳-۷- روش حرارت سنجی مادون قرمز

روش حرارت سنجی مادون قرمز از یک دوربین مادون قرمز برای مشخص کردن مناطق متورق شده و یا ترک خورده نزدیک سطح در تونل‌ها استفاده می‌کند. این روش با ایجاد تصاویر حرارتی<sup>۲۶</sup> از دیواره تونل، وضعیت درز و ترکها را مشخص می‌کند.

#### مزایا:

- مناطق وسیعی از تونل را می‌توان با سرعت بالا به کمک این روش بررسی کرد.
- این روش دارای هزینه پایینی می‌باشد.

#### معایب:

- برای تفسیر داده‌ها، نیاز به فهم دقیق و کاملی از اصول حرارت سنجی می‌باشد.
  - نتیجه روش تنها به صورت دو بعدی قابل ارائه می‌باشد.
- از مطالب ذکر شده در این فصل چنین بر می‌آید:

۱. روش‌های مخرب به دلیل اینکه بسیار وقت گیر می‌باشند و سطح محدودی را نیز در بر می‌گیرند، و در ضمن هزینه بسیار زیادی را نیز در بر دارند، زیاد مورد استفاده قرار نمی‌گیرند. مگر در شرایطی که از یک نقطه خاص در دیواره و یا سینه کار تونل اطلاعات تفصیلی‌تری مورد نیاز باشد.

۲. روش‌های غیر مخرب به دلیل عمق نفوذ کم (به غیر از روش GPR)، معمولاً در مطالعات ژئوتکنیکی به منظور ارزیابی مسیر پیشروی تونل کاربرد چندانی ندارند. کاربرد عمده آنها در بررسی وضعیت سیستم نگهدارنده و سنگ‌های اطراف تونل (مونیتورینگ تونل) در دراز مدت می‌باشد.

با توجه به آنچه ذکر شد، نیاز به یک روش غیر مخرب با دقت و عمق نفوذ مناسب جهت ارزیابی مسیر پیشروی تونل، قبل از حفر آن به شدت احساس می‌شود.

#### ۱-۴- روش TSP 203

روش TSP یک روش ژئوفیزیک لرزه‌ای غیر مخرب در ارزیابی مسیر پیشروی تونل‌ها می‌باشد. TSP مخفف کلمه Tunnel Seismic Prediction می‌باشد. این روش در ابتدا در سال ۱۹۹۶ میلادی تحت عنوان TSP 202 توسط یک شرکت سوئیسی به نام Amberg Technologies ابداع شد. در آن زمان این روش عنوان تجاری به خود نگرفت و تنها به صورت انحصاری در اختیار خود شرکت سازنده بود. در سال ۲۰۰۰ میلادی، شرکت مذکور نسخه جدیدی را تحت عنوان TSP 203 به صورت تجاری و کمی کامل‌تر از نسخه قبلی به بازار ارائه کرد. سیستم پیش بینی لرزه‌سنجی در تونل (TSP)، کارهای زیر را انجام می‌دهد (Amberg Measuring Technique, 2001a):

- اعلام خطر سیستم با پیش‌بینی زون‌های زمین‌شناسی خطر آفرین<sup>۲۷</sup>
- تعیین محل جدایی در ساختار سنگ، زون‌های ضعیف یا خرد شده در جلوی سینه کار تونل
- پیش‌بینی تقریبی ساختارهای محلی آبدار

- تعیین خصوصیات ژئومکانیکی سنگ‌های مسیر پیشروی تونل

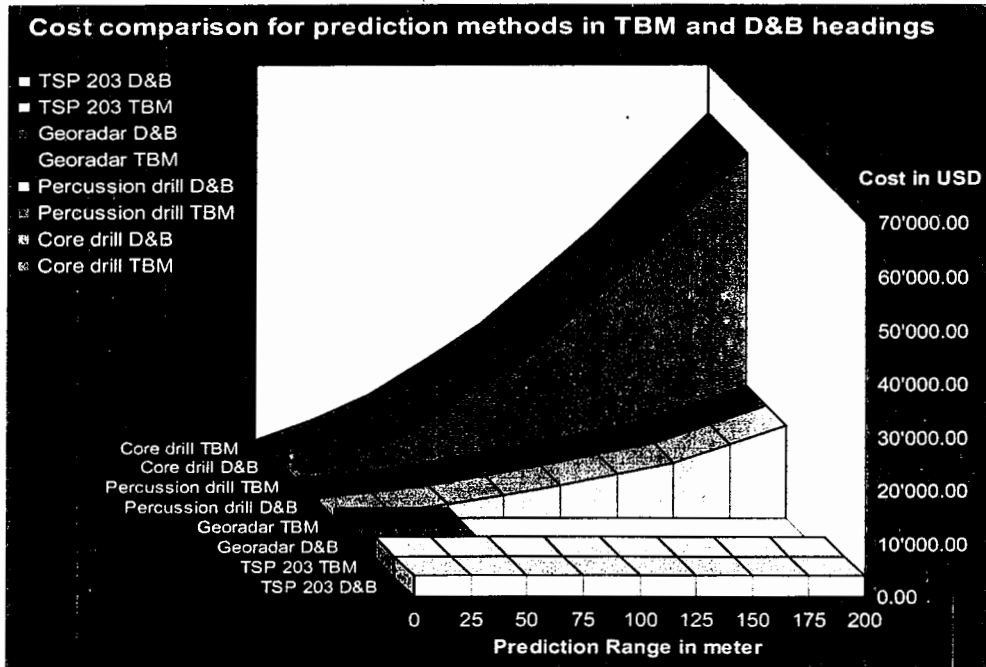
جهت معرفی بهتر روش TSP 203 مقایسه‌ای بین این روش و سه روش آشکارسازی حفاری مغزه‌گیری، حفاری ضربه‌ای و GPR در یک بازه ۲۰۰ متری صورت گرفته است که در جدول ۱-۱ و اشکال ۷-۱ و ۸-۱ آورده شده است.

شکل ۷-۱ هزینه این سه روش را نشان می‌دهد. روش GPR دارای کمترین هزینه ولی برد آن حداکثر ۵۰ متر می‌باشد. روش‌های حفاری نیز با افزایش فاصله، هزینه‌هایشان به شدت افزایش می‌یابد. روش TSP 203 دارای هزینه ثابت پایینی در برد ۲۰۰ متر می‌باشد، که این یکی از ویژگی‌های بارز این روش است. از دیگر مشخصه‌های TSP 203 همانطور که در شکل ۸-۱ نیز نشان داده شده است، ثابت بودن هزینه‌های تأخیر برای تمام فاصله ۲۰۰ متر می‌باشد. در حالیکه در روش‌های حفاری هزینه‌های تأخیر به علت عملیات آشکارسازی افزایش شدیدی نشان می‌دهند. این نمودار در اصل بیانگر سرعت روش‌های آشکارسازی می‌باشد و نشان می‌دهد که روش TSP 203 دارای سرعت زیادی در تخمین مسیر پیشروی تونل می‌باشد (Amberg Measuring Technique, 2001a).

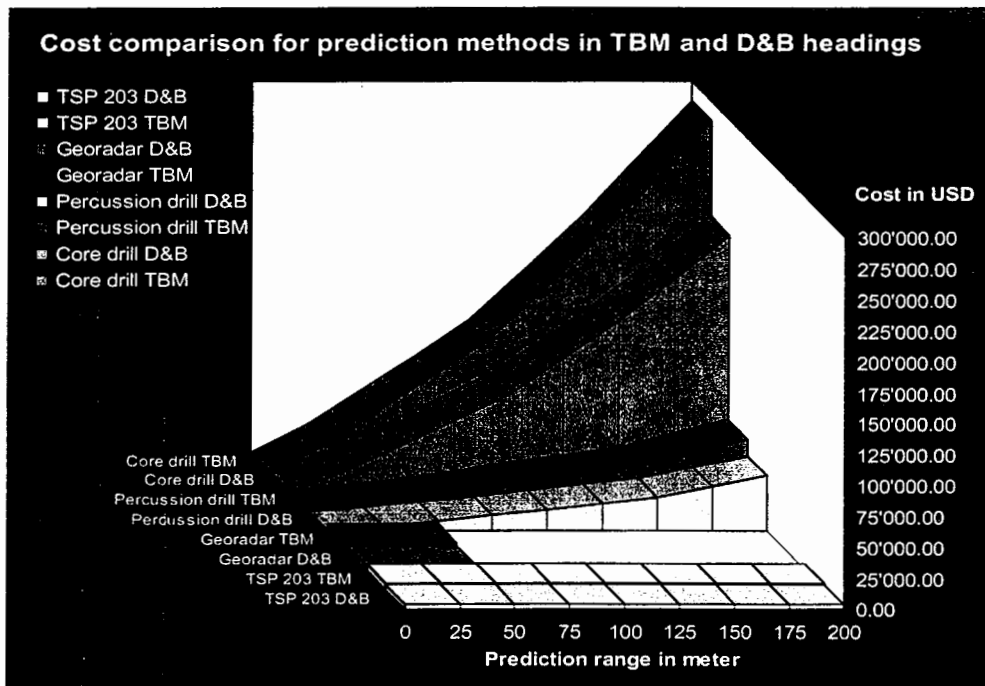
جدول ۱-۱- مقایسه بین چهار روش پیش‌بینی مسیر پیشروی تونل (Amberg Measuring Technique, 2001a)

حفاری مغزه گیری	حفاری ضربه‌ای	GPR	TSP 203	
۲۰۰ متر	۲۰۰ متر	۵۰ متر	۲۰۰ متر	مسافت پیش بینی
لازم است	لازم است	لازم است	احتیاجی ندارد	دسترسی به سینه کار
۲۴۰ ساعت	۴۵ ساعت	۱/۵ ساعت	۱/۵ ساعت	زمان عملیات اندازه‌گیری
افراد کارگاهی	افراد کارگاهی	متخصص خیره	افراد کارگاهی	اپراتور اندازه‌گیری
۶-۹ ساعت	نیم ساعت	۸-۱۰ ساعت	۳-۶ ساعت	زمان پردازش اولیه
خوب	متوسط	مشخص نمی‌کند	مشخص نمی‌کند	نوع سنگ
خوب (در آزمایشگاه)	متوسط	مشخص نمی‌کند	خوب	خصوصیات مکانیک سنگی
متوسط	مشخص نمی‌کند	مشخص نمی‌کند	خوب	محل عوارض و جدایی ساختارهای سنگی





- شکل ۷-۱- مقایسه هزینه‌های روش‌های مختلف آشکار سازی ( فرضیات: سنگ بستر تونل سنگ آهک همگن و یکپارچه و دارای مقاومت فشاری 150 MPa ) (Amberg Measuring Technique, 2001a).



- شکل ۸-۱- مقایسه هزینه‌های تأخیر ناشی از عملیات آشکار سازی در روش‌های مختلف (Amberg Measuring Technique, 2001a).

## ۱-۴-۱- سابقه کاربرد روش TSP 203

پروژه‌های تونل‌سازی مهمی در دنیا از روش TSP 203 بهره گرفته‌اند. تونل انتقال آب تالا در کشور بوتان، تونل آزاد راه دافنگیاکو در چین و تونل بزرگراه آیتسو در ژاپن (۲۰۰۱)، تونل زوکریگ II در آلمان و تونل راه آهن ورینا در سوئیس (۲۰۰۲)، تونل گوتهارد در کوه‌های آلپ (۲۰۰۳) جزو مهمترین آنها می‌باشند (Geotech Co., 2004).

در ایران نیز از سال ۱۳۸۰ روش مذکور توسط شرکت ژئوتک نماینده انحصاری شرکت آمبرگ سوئیس معرفی و در چندین پروژه از جمله تونل انتقال آب گاوشان (۱۳۸۰)، تونل انتقال آب چشمه لنگان (۱۳۸۱) تونل راه امام زاده هاشم و تونل انتقال آب چشمه روزیه (۱۳۸۳)، تونل انتقال آب کوه‌رنگ ۳ (۱۳۸۴ و ۱۳۸۵) و آزاد راه تهران - شمال (۱۳۸۵) بکار گرفته شد (Geotech Co., 2004).

## ۱-۵- ضرورت انجام مطالعه و هدف از آن

از آنجایی که روش TSP 203 یک روش جدید بوده که با هزینه کم و با سرعت مناسبی می‌تواند مسیر پیشروی تونل‌ها را ارزیابی کند، لذا در صورت بالا بودن دقت آن، می‌تواند جایگزین بسیار مناسبی برای روش‌های مرسوم از جمله روش‌های حفاری اکتشافی در تونل‌ها باشد. به دلیل سابقه کم این روش، هنوز ارزیابی‌های زیادی در مورد دقت این روش در پیش‌بینی وضعیت سنگ‌ها و ترک و شکاف‌های مسیر حفر تونل در دست نمی‌باشد. از این رو لازم است که بررسی‌های زیادی در این مورد انجام گیرد که مطالعه حاضر در این راستا می‌باشد.

سوالاتی که در این تحقیق مد نظر می‌باشند عبارتند از:

- آیا به کمک انتشار امواج لرزه‌ای می‌توان زون‌های خرد شده موجود در مسیر پیشروی تونل‌ها را شناسایی کرد؟
- در برداشت‌های لرزه‌ای به منظور بررسی خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها، برداشت با ژئوفون‌های تک مؤلفه‌ای بهتر است یا برداشت با ژئوفون‌های سه مؤلفه‌ای؟

- دقت روش TSP 203 در شناسایی زون‌های ضعیف و سست چقدر است؟
- در برداشت‌های لرزه‌ای به کمک روش TSP 203 آیا موقعیت گیرنده‌ها و نقاط انفجار نسبت به سینه‌کار تونل، در ارزیابی مسیر پیش‌روی تونل مؤثر است؟
- در برداشت‌های لرزه‌ای به کمک روش TSP 203 آیا جهت برداشت‌ها نسبت به شیب لایه‌بندی عمومی تونل، در ارزیابی مسیر پیش‌روی تونل مؤثر است؟

فرضیات موجود نیز عبارتند از:

- سرعت سیر موج در یک محیط همگن ثابت می‌باشد.
- افزایش تخلخل و شکستگی در سنگ‌ها باعث کاهش سرعت سیر موج در آن‌ها می‌شود.
- سرعت سیر موج برشی در سیالات صفر می‌باشد.
- افزایش عمق باعث کاهش انرژی و دامنه موج می‌گردد.

با توجه به طرح سوالات فوق، هدف از مطالعه بررسی و پاسخگویی به سوالات مذکور و پی بردن به مشخصات و پارامترهای مکانیکی سنگ‌ها، رفتار ژئومکانیکی سنگ‌ها و همچنین وضعیت ناپیوستگی‌های مسیر حفر تونل‌ها به کمک روش TSP 203 می‌باشد که در تحقیق حاضر از داده‌های برداشت شده مربوط به تونل انتقال آب چشمه روزیه سمنان استفاده خواهد شد.

## ۱-۶- ساختار پایان‌نامه

در فصل اول این پایان‌نامه همانگونه که ذکر شد، به بررسی روش‌های مختلف ارزیابی مسیر پیش‌روی تونل‌ها پرداخته شد و مزایا و معایب هر کدام از این روش‌ها بیان شد. روش TSP 203 به عنوان یک روش ارزیابی غیر مخرب، بسیار مورد توجه واقع شد. لذا در فصل دوم به بررسی روش TSP 203 پرداخته شده و معادلات و پارامترهای دخیل در آن توضیح داده می‌شوند. پس از آن در فصل سوم، کاربرد روش TSP 203 در یک مورد مطالعه واقعی (تونل انتقال آب چشمه روزیه سمنان) بررسی می‌گردد و نتایج روش TSP 203 با دیگر نتایج واقعی موجود مقایسه می‌شوند. در نهایت نقاط ضعف روش مذکور شناسایی شده و در فصل چهارم با کمک گرفتن از

روش مدل‌سازی هوشمند شبکه‌های عصبی به تصحیح نقاط ضعف مذکور پرداخته می‌شود و در فصل پنجم مطالب جمع‌بندی شده و ضمن نتیجه‌گیری‌های لازم پیشنهادات نیز ارائه خواهند شد.

## فصل دوم

معرفی روش TSP 203 و  
بررسی روش‌های پردازش  
داده‌های آن

## ۲-۱- مقدمه

همانطور که گفته شد، روش TSP 203 یک روش پیش‌بینی لرزه‌ای در تونل‌سازی می‌باشد. لرزه سنجی مورد استفاده در این روش از نوع بازتابی (انعکاسی)<sup>۱</sup> است. در لرزه سنجی‌های بازتابی متداول، یک نقطه تولید انرژی<sup>۲</sup>، امواج لرزه‌ای تولید می‌کند و تعدادی گیرنده<sup>۳</sup> (تا ۲۴ عدد) امواج بازتابی برگشت یافته از سازندها و فصل مشترک‌های مختلف را دریافت می‌کنند و با ایجاد نمودار موج برای هر یک از گیرنده‌ها، به بررسی وضعیت موجود پرداخته می‌شود.

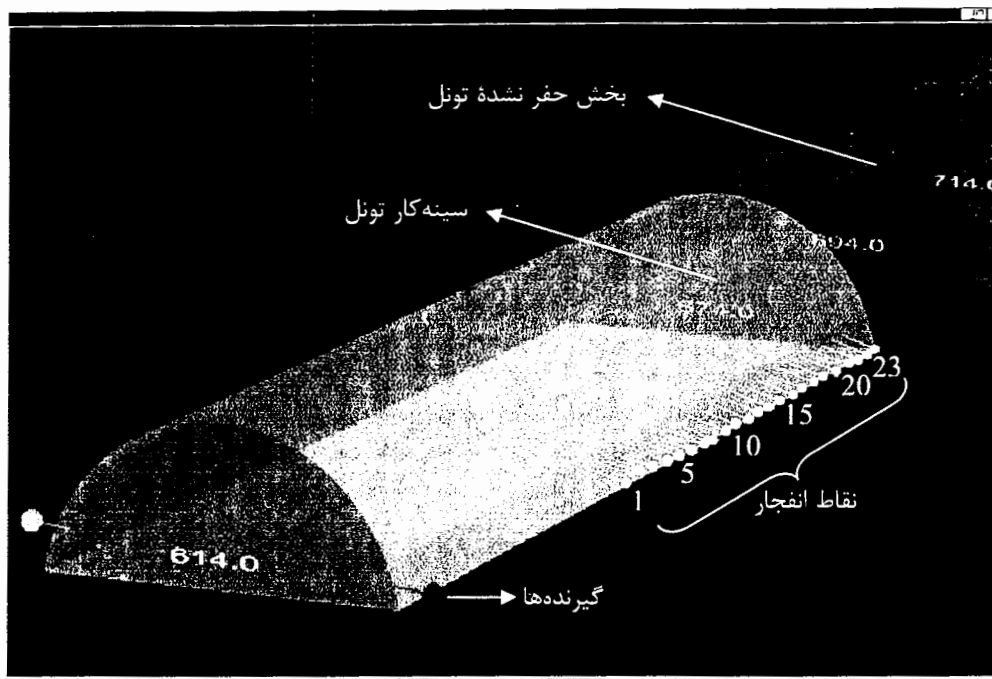
در TSP 203 اساس و پایه کار همان لرزه‌نگاری ژئوفیزیکی انعکاسی می‌باشد (ولی با کمی تغییرات و تفاوت‌ها). در این روش تعداد گیرنده‌ها از ۱ تا ۴ عدد، و تعداد نقاط تولید انرژی نیز تا ۳۰ عدد می‌توانند متغیر باشند. گیرنده‌ها در فاصله خاصی از سینه‌کار تونل در دو دیواره، سقف و کف نصب می‌شوند. ویژگی عمده گیرنده‌ها این است که قادرند امواج حاصل را در سه بعد برداشت کنند. نقاط تولید انرژی نیز با آرایشی خاص در فاصله بین گیرنده‌ها و سینه‌کار تونل قرار می‌گیرند (شکل ۲-۱).

هر یک از نقاط تولید انرژی با یک تأخیر مشخص نسبت به نقطه تولید انرژی قبلی، موج لرزه‌ای ایجاد می‌کنند. موج حاصل پس از انتشار در داخل سنگ‌های مسیر پیشروی تونل، با برخورد با فصل مشترک‌های مختلف، بخشی از انرژی خود را انعکاس می‌دهد. موج برگشتی که حاوی اطلاعات از یک نقطه از فصل مشترک مذکور می‌باشد، به گیرنده‌ها رسیده و ثبت می‌گردد. البته در همان ابتدای کار مولفه موج مستقیم در داخل تونل و در فضای بین گیرنده‌ها و مولد موج حرکت کرده و به گیرنده‌ها می‌رسد و پس از آن امواج بازتابی به گیرنده‌ها می‌رسند.

1- Reflection

2- Shot

3- Receiver

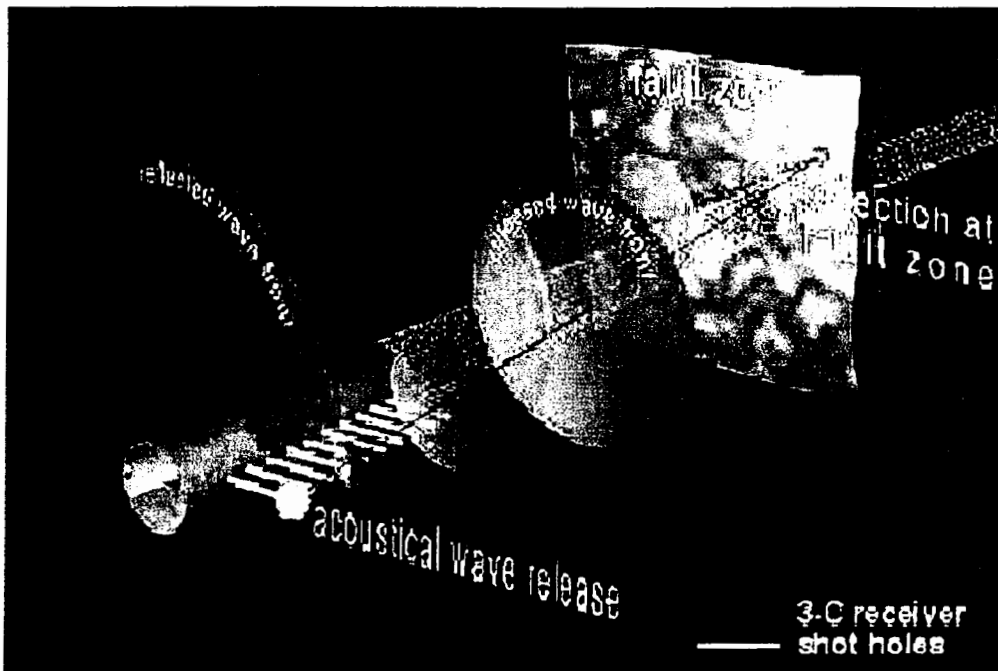


شکل ۲-۱- آرایش نقاط انفجار و گیرنده‌ها نسبت به سینه کار تونل (Amberg Measuring Technique, 2001a)

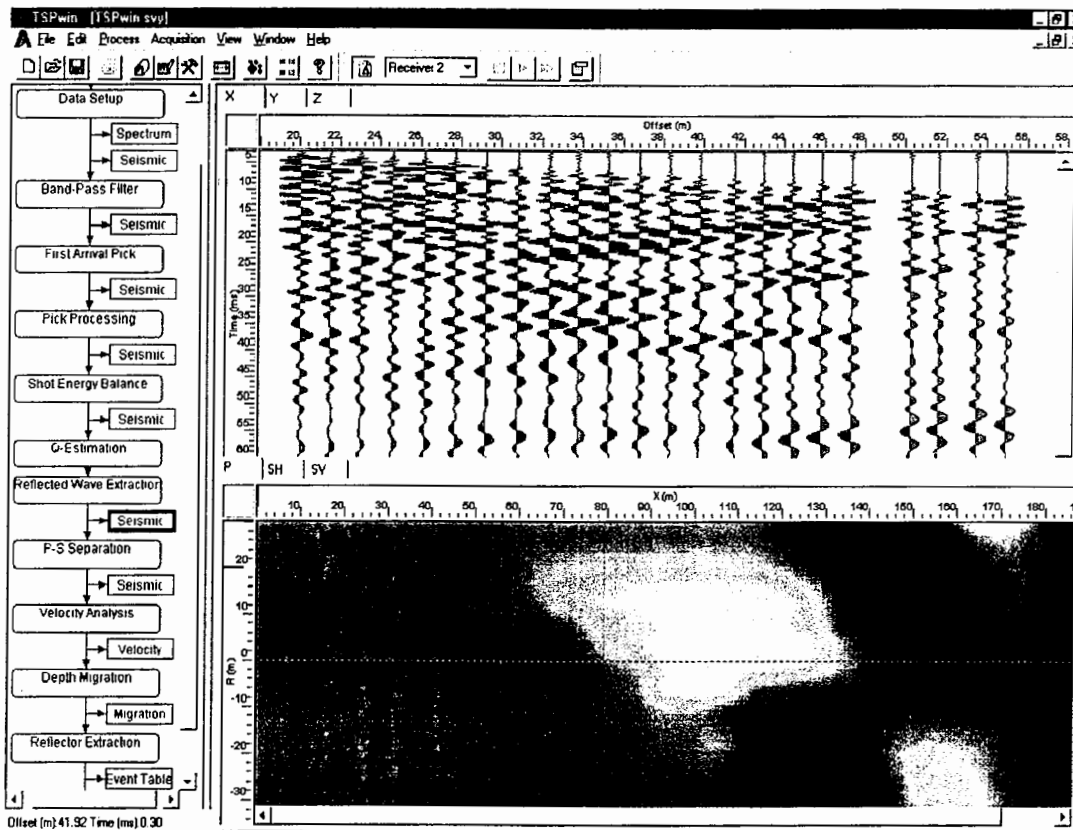
یکی از دلایل استفاده از تعداد نقاط مولد انرژی زیاد این است که از هر فصل مشترک، نقاط اطلاعاتی بیشتری بدست آید و نویز تا حد ممکن کاهش یابد (علی‌مرادی، ۱۳۸۵). زیرا موج حاصل از هر کدام از مولدهای انرژی به یک نقطه از فصل مشترک برخورد می‌کند، لذا تعداد نقاط اطلاعاتی افزایش می‌یابد (شکل ۲-۲).

روش‌های لرزه‌نگاری (انعکاسی و انکساری<sup>۴</sup>) صرفاً زمان حرکت موج در لایه‌های مختلف را بدست می‌آورند. روش TSP 203 نیز از این قاعده مستثنی نمی‌باشد. موج رسیده به هر گیرنده حاوی اطلاعات زمان سیر موج می‌باشد. در نهایت به کمک نرم‌افزار TSPwin (Amberg Measuring Technique, 2001b) نمودار تریس یا اثرهای لرزه‌ای برای هر یک از گیرنده‌ها و برای هر یک از سه بعد X, Y, Z به صورت شکل ۲-۳ ایجاد می‌شود. از روی نمودار حاصل سرعت موج در هر نقطه را می‌توان بدست آورد، همانند آنچه در بخش پائینی شکل ۲-۳ دیده می‌شود.

#### 4- Refraction



شکل ۲-۲- برخورد موج حاصل از هر مولد به یک نقطه از فصل مشترک (Geotech Co., 2004)



شکل ۲-۳- نمودار تریس یا اثرهای لرزهای برداشت شده و سرعت موج محاسبه شده

(Amberg Measuring Technique, 2001a)



## ۲-۲- اصول لرزه نگاری انعکاسی در TSP 203

## ۲-۲-۱- تاثیر محیط بر انتشار موج

محیط انتشار موج بر روی گسترش هندسی موج تأثیر گذاشته و این گسترش هندسی نیز بر شدت، چگالی انرژی و دامنه موج تأثیر می‌گذارد. گسترش هندسی شامل ویژگی‌های زیر می‌باشد:

۲-۲-۱-۱- واگرایی کروی<sup>۵</sup> - احتمالاً تنها ویژگی مهم در موج، انرژی وابسته به نوسان ذرات محیط در موقع عبور موج از آن محیط است. معمولاً ما به انرژی کل یک موج کاری نداریم، بلکه انرژی مجاور نقطه‌ای که موج را در آنجا می‌بینیم مورد نظر است. چگالی انرژی عبارت است از انرژی بر واحد حجم در مجاورت یک نقطه.

یک موج P کروی هماهنگ را در نظر می‌گیریم که جابجایی شعاعی آن برای مقدار معینی از  $r$  با رابطه زیر داده شده است.

$$u = A \cos(\omega t + \phi)$$

که در آن  $\phi$  زاویه فاز است. جابجایی  $u$  دارای گستره ای از  $-A$  تا  $+A$  است. چون انرژی کل برابر مقدار حداکثر انرژی جنبشی است، چگالی انرژی  $E$  برای یک موج هماهنگ برابر است با (زمردیان و حاجب حسینی، ۱۳۷۵):

$$E = \frac{1}{2} \rho \omega^2 A^2 = 2\pi^2 \rho f^2 A^2 \quad (1-2)$$

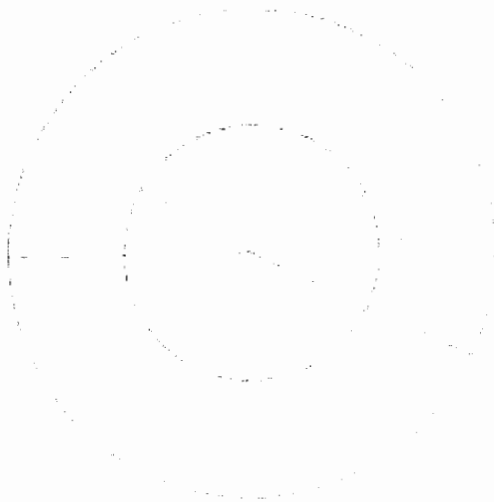
که در آن  $\rho$  چگالی محیط،  $f$  فرکانس موج و  $A$  دامنه موج است. بنابراین دیده می‌شود که چگالی انرژی متناسب با توان اول چگالی محیط و توان دوم فرکانس و دامنه موج است. آهنگ جریان انرژی نیز مورد توجه است. لذا تعریف شدت عبارت است از مقدار انرژی که از واحد سطح عمود بر راستای انتشار در واحد زمان عبور می‌کند.

در شکل ۲-۴ یک جبهه موج کروی که از مرکز  $O$  واگرایی دارد، نشان داده شده است. با رسم شعاع‌های کافی، دو قسمت از جبهه موج  $A_1$  و  $A_2$  را با شعاع‌های  $r_1$  و  $r_2$  می‌توان طوری تعریف کرد که انرژی خروجی که از کلاهک کروی  $A_1$  در یک ثانیه عبور می‌کند، برابر انرژی

عبوری از کلاهک کروی  $A_2$  در یک ثانیه باشد (چون انرژی فقط در راستای شعاعی حرکت می‌کند). جریان انرژی در یک ثانیه برابر حاصلضرب شدت در مساحت است، بنابراین:

$$I_1 A_1 = I_2 A_2$$

که در آن  $I$  شدت انرژی یا همان مقدار انرژی عبوری از واحد سطح در واحد زمان است و  $A$  سطح مقطع است.



شکل ۲-۴- جبهه موج کروی که از مرکز  $O$  واگرایی دارد (زمردیان و حاجب حسینی، ۱۳۷۵)

چون مساحت  $A_1$  و  $A_2$  متناسب با مربع شعاع‌های آنها است، داریم:

$$I_2 / I_1 = A_1 / A_2 = (r_1 / r_2)^2 \quad (۲-۲)$$

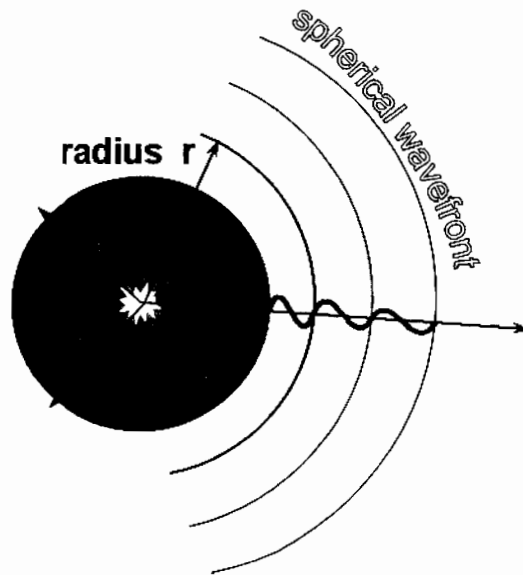
علاوه بر این از معادله  $I = EV$  نتیجه می‌شود که  $E$  متناسب با  $I$  است و بنابراین:

$$I_2 / I_1 = E_2 / E_1 = (r_1 / r_2)^2 \quad (۳-۲)$$

بنابراین گسترش هندسی سبب می‌شود که شدت و چگالی انرژی موج‌های کروی به نسبت عکس مربع فاصله از چشمه کاهش یابد (Newman, 1973). این به واگرایی کروی معروف است.

از دو معادله ۱-۲ و ۳-۲ چنین بر می‌آید که دامنه موج کروی به نسبت عکس فاصله از

چشمه کاهش می‌یابد (شکل ۲-۵).



شکل ۲-۵- کاهش دامنه موج کروی به نسبت عکس فاصله از چشمه (Amberg Measuring Technique, 2002b)

۲-۱-۲- جذب<sup>۶</sup>- از دیگر پدیده‌هایی که باعث کاهش چگالی انرژی یک موج می‌شود، پدیده جذب است. با عبور موج از یک محیط، انرژی کشسان همراه با حرکت موج به تدریج جذب محیط می‌شود و سرانجام به صورت حرارت ظاهر می‌شود. این فرایند در نهایت سبب ناپدید شدن کامل حرکت موجی می‌شود.

سازوکارهایی که بیانگر تبدیل انرژی کشسانی به گرما باشند به روشنی شناخته نشده‌اند. در هنگام عبور یک موج، در اثنای فاز تراکمی گرما ایجاد می‌شود و در طول فاز انبساط جذب می‌گردد. این فرآیند کاملاً برگشت‌پذیر نیست، زیرا گرمایی که در حین تراکم به خارج هدایت می‌شود برابر گرمایی که در حین انبساط بر می‌گردد، نیست. اصطکاک داخلی بدون شک دخالت دارد و سازوکارهای زیاد دیگری نظیر اتلاف انرژی در اثر به وجود آمدن سطوح جدید (ترکهای نزدیک انفجار)، اثرهای پیزوالکتریک<sup>۷</sup> و ترموالکتریک<sup>۸</sup>، اتلاف در چسبندگی مایعاتی که حفره‌های سنگ‌ها را پر می‌کنند و غیره ممکن است در این مورد سهمیم باشند (زمردیان و حاجب حسینی، ۱۳۷۵).

- 6- Absorption
- 7- Piezoelectric
- 8- Thermoelectric

معادلات مربوط به دامنه توسط تسپریتس (۱۹۱۹) به شکل زیر ارائه شد (زمردیان و حاجب حسینی، ۱۳۷۵):

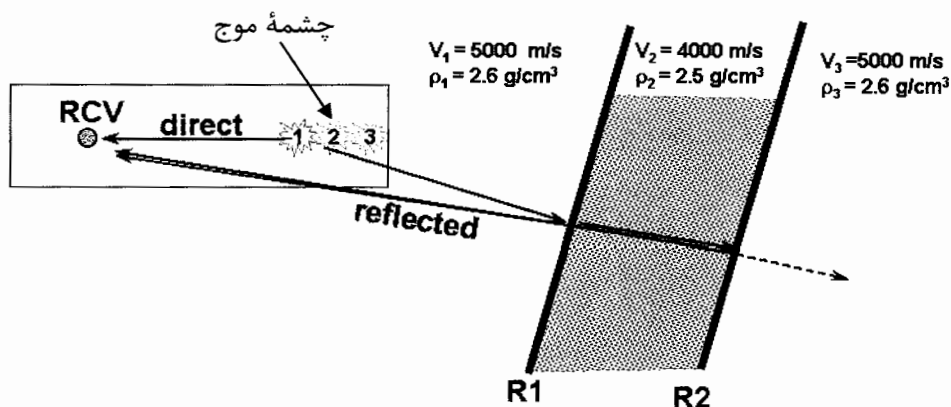
$$A_1 \cos i_1 - B_1 \sin \theta_1 + A_2 \cos i_2 + B_2 \sin \theta_2 = A_0 \cos i_1$$

$$A_1 \sin i_1 + B_1 \cos \theta_1 - A_2 \sin i_2 + B_2 \cos \theta_2 = -A_0 \sin i_1$$

همانطور که از معادلات بالا مشخص است تمام انرژی موج تابیده شده، در موج بازتابیده منعکس نمی‌شود و بخشی از آن از فصل مشترک دو محیط عبور می‌کند. لذا انرژی موج نیز کاهش می‌یابد.

### ۲-۲-۲- تأثیر تغییرات سنگ بر روی پلاریزاسیون سیگنال

در برداشت‌های لرزه‌ای اگر منطقه مورد مطالعه همگن باشد، سرعت موج در تمام مسیر یکسان می‌باشد. ولی در عمل چنین چیزی نیست و شاهد تغییرات در سنگ‌ها می‌باشیم. این تغییرات می‌توانند شامل تغییر جنس، حضور آبهای زیر زمینی، وجود ناپیوستگی‌ها و وجود درزه و ترکها در سنگ‌ها باشند. لذا سرعت موج نیز ثابت نبوده و تغییر می‌کند. یک محیط سه لایه‌ای همانند شکل ۲-۷ را در نظر بگیرید که در آن لایه اول و سوم دارای سرعت  $5000 \text{ m/s}$  و چگالی  $2.6 \text{ g/cm}^3$  و چگالی  $2/6 \text{ g/cm}^3$  و لایه میانی دارای سرعت  $4000 \text{ m/s}$  و چگالی  $2/5 \text{ g/cm}^3$  می‌باشد.  $R_1$  و  $R_2$  نیز فصل مشترک بین محیطها می‌باشند.

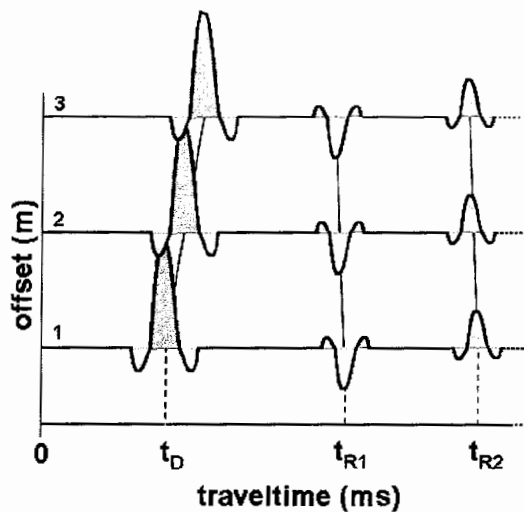


شکل ۲-۷- تأثیر تغییرات سنگ بر روی پلاریزاسیون سیگنال

(Amberg Measuring Technique, 2002b)

با ایجاد موج توسط مولد اول، به ترتیب سه موج لرزه‌ای مربوط به اولین مولد به گیرنده می‌رسد. این موج‌ها عبارتند از: موج مستقیم، موج بازتابی از  $R_1$  و موج بازتابی از  $R_2$ . برای دو مولد موج دیگر نیز این سه برداشت صورت می‌گیرد.

همانطور که در شکل ۸-۲ ملاحظه می‌شود، با افزایش فاصله نقاط مولد موج از گیرنده، زمان رسیدن موج مستقیم نیز افزایش می‌یابد، ولی در مورد امواج بازتابی اینچنین نیست و با افزایش فاصله مولدها، زمان رسیدن موج بازتابی به گیرنده کمتر می‌شود. دلیل آن این است که مولد آخر نسبت به مولد اول به فصل مشترک مورد نظر نزدیکتر بوده و مسیر کوتاهتری را برای رسیدن به گیرنده می‌پیماید. این مطلب به خوبی در شکل ۷-۲ نمایان است.

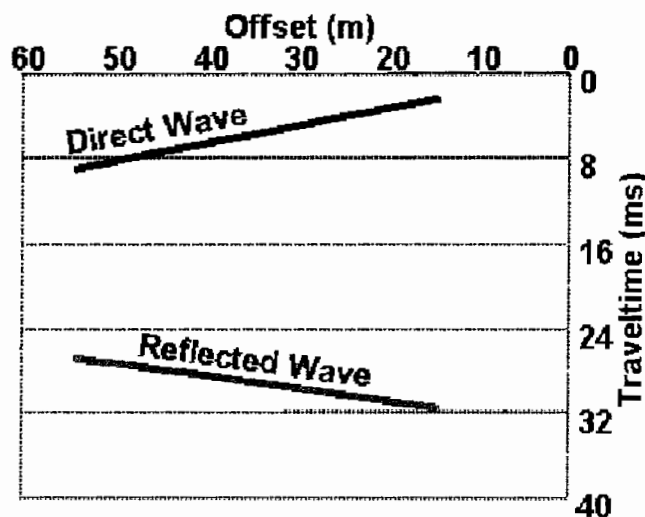


شکل ۸-۲- کاهش زمان رسیدن موج بازتابی به گیرنده با افزایش فاصله مولد از گیرنده

(Amberg Measuring Technique, 2002b)

محور قائم در شکل ۸-۲ موقعیت مولدهای موج را نشان می‌دهد و محور افقی هم به ترتیب زمان رسیدن موج مستقیم ( $t_D$ )، زمان رسیدن موج بازتابی از اولین فصل مشترک ( $t_{R1}$ ) و زمان رسیدن موج بازتابی از دومین فصل مشترک ( $t_{R2}$ ) به گیرنده را برای هر مولد نشان می‌دهد.

با توجه به مطالب ذکر شده، می‌توان چنین نتیجه گرفت که در برداشت‌های لرزه‌ای به روش TSP 203 منحنی‌های زمان سیر<sup>۱۱</sup> برای امواج مستقیم و بازتابی، بر خلاف روش‌های معمول لرزه نگاری انعکاسی در یک جهت شیب ندارند و شیب آنها مخالف همدیگر است. شکل ۹-۲ یک محیط دو لایه‌ای را نشان می‌دهد که به خوبی بیانگر این مطلب می‌باشد. در این شکل محور افقی بیانگر فاصله نقاط مولد موج از گیرنده و محور قائم بیانگر زمان رسیدن موج به گیرنده برای هر مولد می‌باشد.



شکل ۹-۲- کاهش زمان رسیدن موج بازتابی به گیرنده با افزایش فاصله مولد از گیرنده

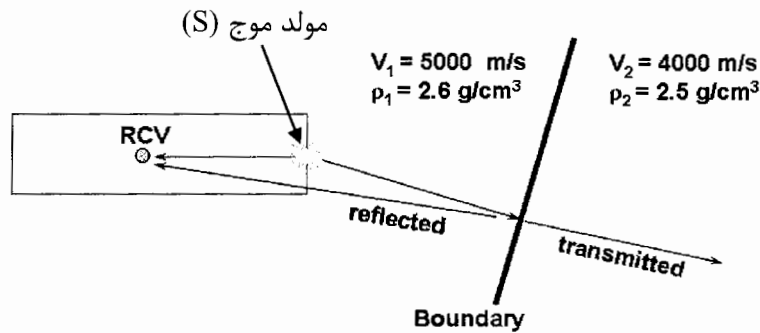
(Amberg Measuring Technique, 2002b)

### ۲-۲-۳- تأثیر تغییرات سنگ بر روی انرژی موج

برای بیان تأثیر تغییرات سنگ بر روی انرژی موج، از ضریبی به نام ضریب بازتاب (RC)<sup>۱۱</sup> استفاده می‌شود. شکل ۱۰-۲ را در نظر بگیرید. این شکل یک محیط دو لایه‌ای را نشان می‌دهد. چگالی لایه اول  $2/6 \text{ g/cm}^3$  و سرعت آن  $5000 \text{ m/s}$  می‌باشد. لایه دوم نیز دارای چگالی  $2/5 \text{ g/cm}^3$  و سرعت  $4000 \text{ m/s}$  می‌باشد.

10- Travel Time Curves

11- Reflection Coefficient (RC)



شکل ۲-۱۰- تأثیر تغییرات سنگ بر روی انرژی موج (Amberg Measuring Technique, 2002b)

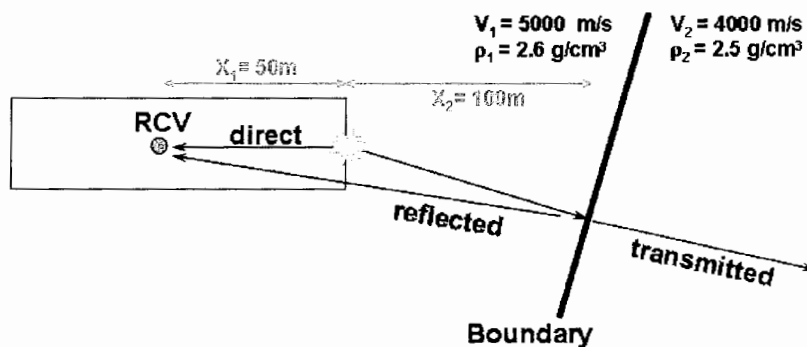
ضریب بازتاب طبق رابطه زیر تعریف می‌شود (Amberg Measuring Technique, 2002a):

$$RC = (\rho_2 * V_2 - \rho_1 * V_1) / (\rho_2 * V_2 + \rho_1 * V_1) = A_1 / A_0$$

رابطه فوق برای پرتوهای عمودی یا نزدیک به عمود صادق می‌باشد. مقدار این ضریب برای شکل ۲-۱۰ برابر با ۰/۱۳- است. این بدان مفهوم است که ۱۳ درصد از انرژی موج بازتاب کرده و ۸۷ درصد نیز به داخل لایه دوم نفوذ کرده است. هر چه انرژی موج بازتابی کمتر باشد، دامنه موج بازتاب نیز کوچکتر بوده، لذا دقت در تعیین سرعت موج نیز پایین می‌آید. تأثیر انرژی موج بر روی دامنه در بخش بعدی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. بنابراین تغییرات در جنس و چگالی سنگ‌ها به شدت بر روی انرژی موج بازتابی تأثیر می‌گذارد.

#### ۲-۲-۴- تأثیر واگرایی کروی بر روی انرژی موج

در بخش قبل ضریب بازتاب را به دست آوردیم. حال فرض کنید در شکل ۲-۱۰ فاصله مولد از گیرنده و فاصله افقی آن از نقطه‌ای از فصل مشترک را که موج از آنجا بازتاب کرده است را داشته باشیم (شکل ۲-۱۱).



شکل ۲-۱۱- تأثیر واگرایی کروی بر روی انرژی موج (Amberg Measuring Technique, 2002b)

در اینجا رابطه‌ای به صورت زیر داریم که نسبت دامنه موج بازتابی ( $A_R$ ) را نسبت به دامنه موج مستقیم ( $A_D$ ) نشان می‌دهد (Amberg Measuring Technique, 2002a):

$$A_R / A_D = RC * (X_1 / (2 * X_2 + X_1)) = -0.13 * 0.2 = -0.026$$

این بدان مفهوم است که دامنه موج بازتابی ۴۰ برابر کوچکتر از دامنه موج مستقیم می‌باشد. هر چه فصل مشترک مورد نظر دورتر باشد ( $X_2$  بزرگتر باشد)، دامنه موج بازتابی ضعیف‌تر شده و اکتشاف فصل مشترک مذکور سخت‌تر صورت می‌گیرد.

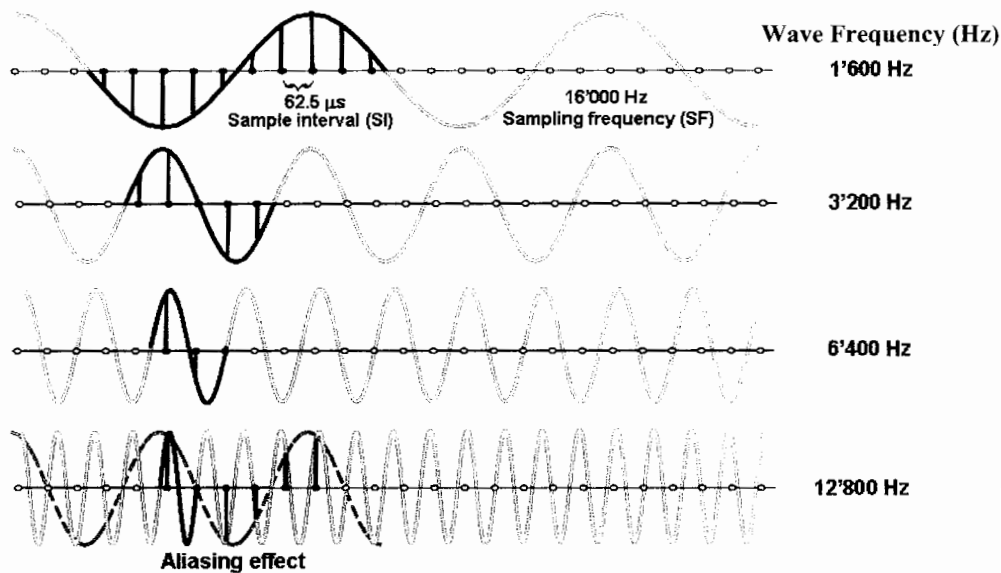
## ۲-۲-۵- تئوری نمونه‌برداری

یک ویژگی درونزادی در تمامی سیستم‌های نمونه‌برداری، پدیده‌ای به نام دگرنامی<sup>۱۲</sup> می‌باشد. این پدیده نه تنها به نمونه‌برداری رقمی<sup>۱۳</sup>، بلکه به سایر موارد نظیر کاربرد ژئوفون‌ها برای نمونه‌برداری حرکت زمین، نیز مربوط می‌شود. دگرنامی به معنی ایجاد یک شکل غلط از عارضه مورد نظر در اثر نمونه‌برداری نادرست می‌باشد.

طبق تئوری نمونه‌برداری هیچ گونه اطلاعاتی در یک نمونه‌برداری منظم از دست نمی‌رود، مشروط بر اینکه فرکانس نمونه‌برداری<sup>۱۴</sup> بزرگتر از دو برابر فرکانس مولفه با بزرگترین فرکانس در شکل موجی باشد که نمونه‌برداری می‌شود. این هم ارز آن است که گفته شود که لازم است بیش از دو نمونه برای هر چرخه در بالاترین فرکانس موجود باشد. بنابراین تئوری نمونه‌برداری، مقدار کمینه نمونه‌برداری قابل استفاده را تعیین می‌کند. چون این نمونه‌برداری کمینه قادر است که شکل موج را کاملاً بازسازی نماید، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که کاربرد نمونه‌برداری ظریفتر، بهره بیشتری را بدست نخواهد داد. نصف فرکانس نمونه‌برداری، فرکانس نایکوئیست<sup>۱۵</sup> نامیده می‌شود. مطالب ذکر شده به خوبی در شکل ۲-۱۲ دیده می‌شوند (Amberg Measuring Technique, 2002a).

- 12- Aliasing
- 13- Digital Sampling
- 14- Sampling Frequency
- 15- Nyquist Frequency





شکل ۲-۱۲- تئوری نمونه برداری - افزایش فرکانس موج باعث ایجاد پدیده دگرنامی شده است

(Amberg Measuring Technique, 2002a)

همانطور که در شکل دیده می‌شود، اگر فاصله زمانی بین نمونه‌برداری‌ها<sup>۱۶</sup>  $62.5 \mu s$  میکرو ثانیه باشد، فرکانس نمونه‌برداری<sup>۱۷</sup> برابر با  $16000 \text{ Hz}$  می‌شود. طبق آنچه گفته شد می‌توان چنین نتیجه گرفت که برای اینکه بتوان شکل موج را به درستی بدست آورد، باید فرکانس نایکویست حداکثر  $8000 \text{ Hz}$  باشد. همانطور که در شکل نیز دیده می‌شود، تا زمانی که فرکانس نایکویست کمتر از  $8000 \text{ Hz}$  است، شکل موج به خوبی به دست آمده است. ولی در حالتی که فرکانس موج  $12800 \text{ Hz}$  است، پدیده دگرنامی (منحنی خط‌چین آبی رنگ) اتفاق می‌افتد. بنابراین برای جلوگیری از ایجاد پدیده دگرنامی باید فاصله زمانی بین نمونه‌برداری‌ها را طوری تنظیم کرد که فرکانس نمونه‌برداری بزرگتر از دو برابر فرکانس نایکویست شود.

### ۲-۳- پردازش داده‌ها در نرم‌افزار TSPwin

نرم‌افزار TSPwin به عنوان یک نرم‌افزار پردازش داده‌های لرزه‌نگاری انعکاسی، جهت بدست آوردن سرعت امواج P و S در زون‌های سنگی مختلف کاربرد دارد. با داشتن این سرعت‌ها و نسبت بین آنها و کمک گرفتن از یکسری روابط مکانیکی سنگ، می‌توان پارامترهایی از قبیل

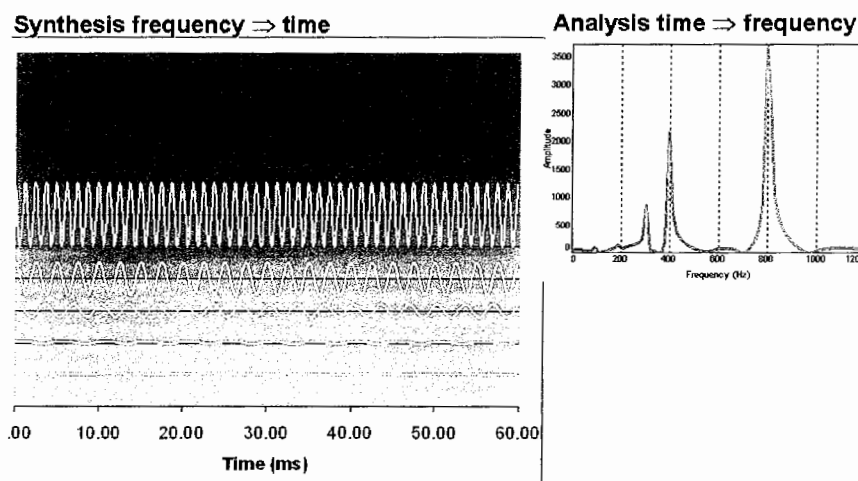
16- Sample Interval

17- Sampling Frequency

ضریب پواسون، مدول برشی، مدول یانگ استاتیک و دینامیک را بدست آورد. در ادامه به تفصیل به بررسی چگونگی بدست آمدن سرعت‌ها و پارامترهای مذکور خواهیم پرداخت.

### ۲-۳-۱- تنظیم اولیه داده‌ها

از جمله تنظیمات مقدماتی که بر روی داده‌های TSP 203 صورت می‌گیرد، تبدیل فوریه می‌باشد. با اعمال این تبدیل، داده‌ها از حوزه زمان به حوزه فرکانس منتقل می‌شوند. این عمل به این منظور صورت می‌گیرد که مطابق شکل ۲-۱۳ فرکانس غالب<sup>۱۸</sup> از نوفه<sup>۱۹</sup> مشخص شود.

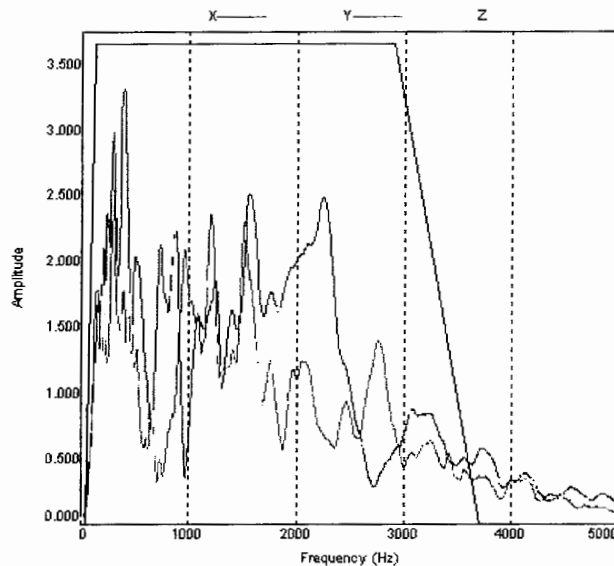


شکل ۲-۱۳- انتقال داده‌ها از حوزه زمان به حوزه فرکانس با انجام تبدیل فوریه

(Amberg Measuring Technique, 2002a)

بعد از این مرحله، فرکانس غالب سیگنال داده‌های تبدیل یافته به حوزه فرکانس، توسط فیلترهای پهنه گذر<sup>۲۰</sup> موجود در داخل نرم افزار جدا می‌شود (شکل ۲-۱۴). این عمل به منظور کاهش نوفه صورت می‌گیرد.

- 18- Dominant frequency
- 19- Noise
- 20- Band Pass Filter



شکل ۲-۱۴- اعمال فیلتر پهنه گذر بر روی داده‌ها (Amberg Measuring Technique, 2002a)

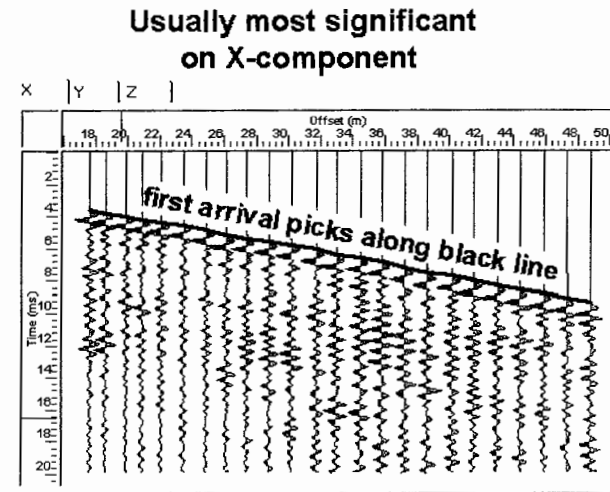
همانطور که در شکل ۲-۱۴ دیده می‌شود، طیف حاصل از یک مولد در سه بعد تحت تأثیر فیلتر مذکور قرار گرفته و فرکانس غالب آن مشخص شده است. پس از انجام این مراحل، طیف مورد نظر آماده پردازش می‌باشد.

### ۲-۳-۲- تعیین سرعت امواج طولی و عرضی

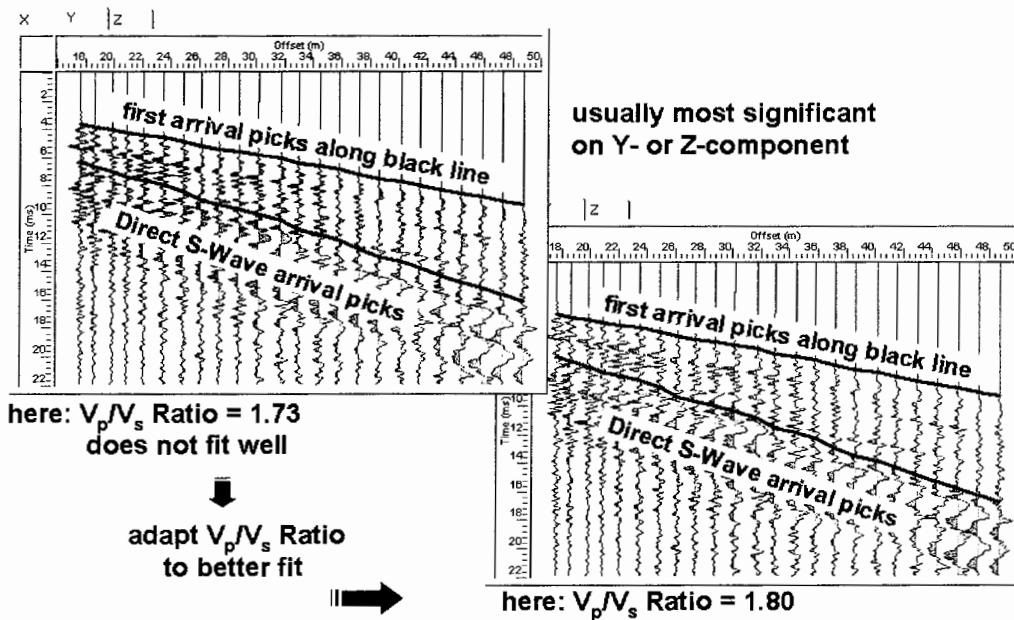
در این مرحله همانند کلیه برداشت‌های ژئوفیزیک لرزه‌ای، باید در ابتدا سرعت امواج طولی و عرضی برای موج مستقیم بدست آیند (اشکال ۲-۱۵ و ۲-۱۶). عکس شیب خط اولین عارضه‌ها<sup>۲۱</sup> در نمودار لرزه‌ای،  $V_p$  موج مستقیم، و عکس شیب خط دومین عارضه‌ها،  $V_s$  موج مستقیم می‌باشد.

سرعت‌های بدست آمده، سرعت موج مستقیم می‌باشند. اما چیزی که برای ما اهمیت دارد، سرعت امواج بازتابی است. موج ایجاد شده پس از حرکت در داخل سنگ‌های موجود در مسیر پیشروی تونل، در اثر برخورد با هر فصل مشترکی، بخشی از انرژی‌اش در داخل لایه بعد نفوذ کرده و بخشی انعکاس می‌یابد. این موج انعکاسی توسط گیرنده‌ها ثبت می‌شود. نرم افزار TSPwin قادر است مقادیر سرعت‌های  $V_p$  و  $V_s$  را محاسبه کند. این سرعت‌ها بیانگر سرعت امواج طولی و عرضی

در لایه مورد نظر می‌باشند. پس از تعیین سرعت‌ها، با کمک آنها به مشخص کردن فصل مشترک‌ها می‌توان پرداخت.



شکل ۲-۱۵- تعیین سرعت موج طولی (Amberg Measuring Technique, 2002a)



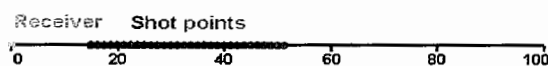
شکل ۲-۱۶- تعیین سرعت موج عرضی (Amberg Measuring Technique, 2002a)

### ۲-۳-۳- تعیین فصل مشترک‌ها

به منظور آنالیز سرعت‌ها، در ابتدا نرم‌افزار یک شبکه منظم مربعی به صورت شکل ۲-۱۷

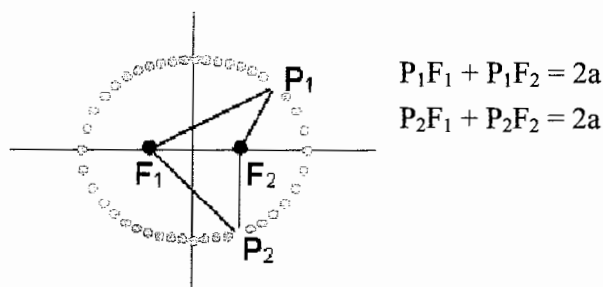
در اطراف تونل در نظر می‌گیرد. این شبکه بیانگر زون تخمین می‌باشد.

طبق اصل فرمات<sup>۲۲</sup> موج مسیری را که کمترین زمان حرکت را دارد، می‌پیماید. (مسیرهای کوتاه با سرعت‌های بالا ترجیح داده می‌شوند).



شکل ۲-۱۷- اعمال شبکه منظم مربعی در اطراف تونل به منظور آنالیز سرعت‌ها  
(Amberg Measuring Technique, 2002a)

بنابراین زمان سیر موج از هر یک از مولدها به هر سلول شبکه، و از سلول مربوطه به گیرنده بسیار مهم است. بدین منظور از یکی از تعاریف ابتدایی بیضی استفاده می‌کنیم: "در بیضی، مجموع فواصل هر نقطه از محیط بیضی تا دو کانون آن برابر یک مقدار ثابت است." (شکل ۲-۱۸).

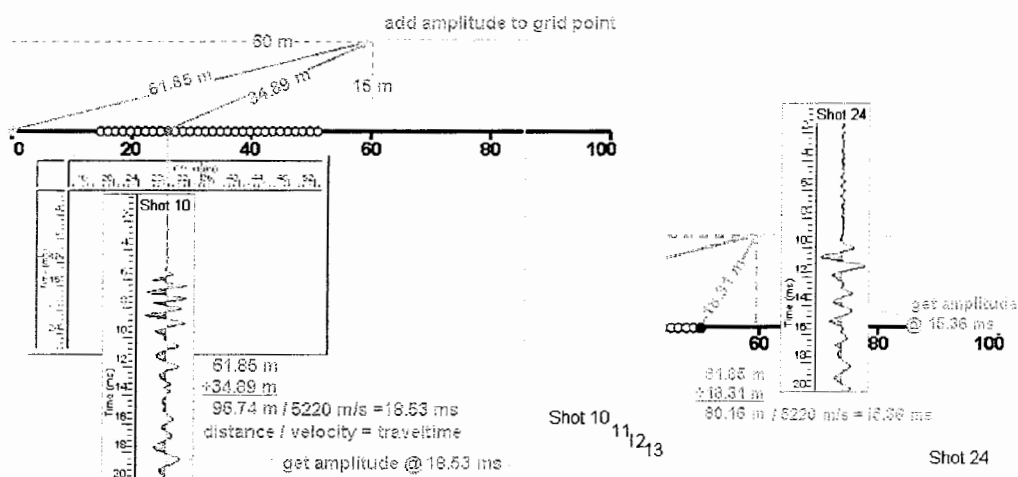


شکل ۲-۱۸- ثابت و برابر بودن مجموع فواصل هر نقطه از محیط بیضی تا دو کانون آن  
(Amberg Measuring Technique, 2002a)

با توجه به تعریف ذکر شده از بیضی، می‌توان گفت که در محیط‌های دو بعدی و سه بعدی با سرعت ثابت، نقاط بازتاب بالقوه، بر روی یک بیضی با دو کانون مولد و گیرنده واقع

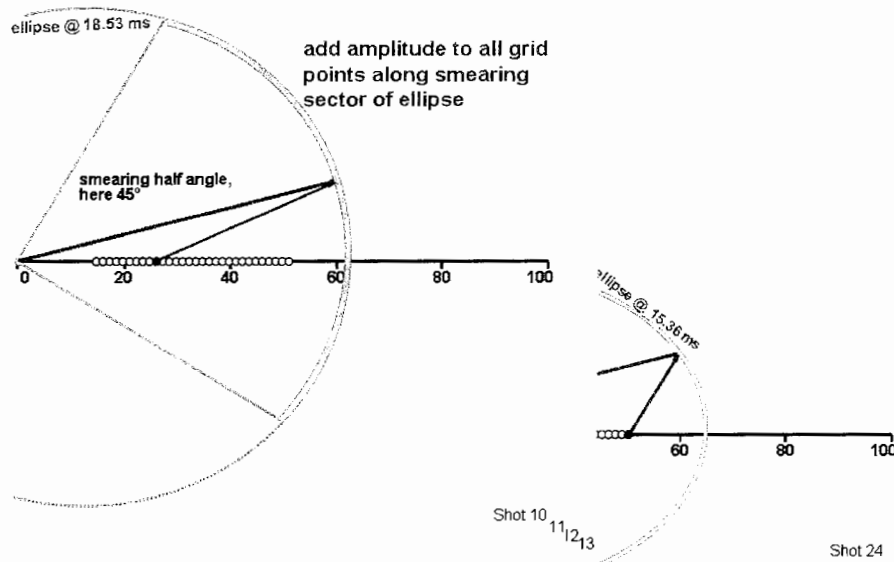
می‌باشند. به عنوان مثال اگر مطابق بخش سمت چپ شکل ۲-۱۹ دو مولد شماره ۱۰ و ۲۴ را در نظر بگیریم و یک سلول مشخص را نیز انتخاب کنیم، مجموع فواصل سلول مورد نظر از مولد ۱۰ و گیرنده برابر ۹۶/۷۴ متر شده است. با تقسیم این فاصله بر یک سرعت فرضی ۵۲۲۰ متر بر ثانیه، زمان ۱۸/۵۳ میلی ثانیه بدست می‌آید. حال با داشتن این زمان و منحنی سیر موج برای مولد مذکور، می‌توان دامنه مربوط به زمان ۱۸/۵۳ میلی ثانیه را بدست آورد. از طرفی با توجه به تعریف ذکر شده از بیضی نیز می‌توان چنین گفت که تمام نقاط واقع بر روی محیط بیضی گذرنده از مولد مورد نظر و گیرنده، دارای دامنه یکسانی می‌باشند. به عبارتی در صورتی که فصل مشترکی وجود داشته باشد، فصل مشترک مذکور بر روی بیضی مورد نظر می‌تواند واقع باشد.

همین کار برای مولد شماره ۲۴ نیز صورت گرفته و مطابق بخش سمت راست شکل ۲-۱۹ زمان ۱۵/۳۶ میلی ثانیه برای آن بدست آمده است. در اینجا نیز می‌توان چنین فرض کرد که تمام نقاط واقع بر روی محیط بیضی گذرنده از مولد شماره ۲۴ و گیرنده، دارای دامنه یکسانی می‌باشند.



شکل ۲-۱۹- آنالیز سرعت‌ها به منظور مشخص کردن بیضی انعکاس (Amberg Measuring Technique, 2002a)

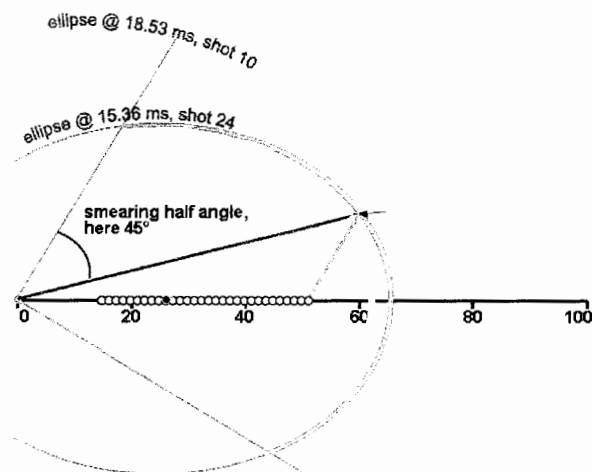
می‌توان بیضی‌های حاصل را به صورت شکل ۲-۲۰ نشان داد.



شکل ۲-۲۰- بیضی انعکاس حاصل برای مولدهای ۱۰ و ۲۴ (Amberg Measuring Technique, 2002a)

بخشی که به رنگ قرمز پر رنگ در محیط بیضی نشان داده شده است، زون مورد نظر جهت تخمین می‌باشد. این قسمت که تحت عنوان Smearing Zone نیز معروف است، زاویه‌ای است که خط واصل گیرنده و سلول مورد نظر، خط نیمساز آن می‌باشد. با توجه به شرایط سقف و کف تونل، این زاویه را می‌توان توسط نرم‌افزار تعیین کرد.

حال اگر دو بیضی شکل ۲-۲۰ بر روی یک صفحه ترسیم شوند، با کمک شکل حاصل (شکل ۲-۲۱) می‌توان محل فصل مشترک را تعیین کرد. محل تقاطع دو بیضی نقطه‌ای است که در آنجا دو داده از فصل مشترک مورد نظر وجود دارد یا به عبارتی نقطه مورد نظر یک نقطه اطلاعاتی از فصل مشترک دو محیط می‌باشد. زمانی می‌توان با قطعیت اعلام کرد که نقطه مورد نظر یک فصل مشترک می‌باشد، که از آن نقطه چندین بیضی عبور کرده باشد، یا به عبارتی از آن فصل مشترک بیش از یک نقطه اطلاعاتی در دست باشد (پیروز ۱۳۸۴). با رسم بیضی‌های مربوط به تمام سلول‌ها و تمام مولدها، شکل بسیار شلوغی بدست می‌آید که تفسیر آن بسیار مشکل است. لذا باید به نوعی، یکسری محدودیت‌هایی را برای نرم‌افزار قائل شد که به کمک آنها بتوان به تفسیر بهتری دست یافت.



شکل ۲-۲۱- تلاقی دو بیضی مربوط به مولدهای ۱۰ و ۲۴ و مشخص کردن محل فصل مشترک (Amberg Measuring Technique, 2002a)

سه نوع محدودیت به شرح زیر اعمال می‌شود (Amberg Measuring Technique, 2002a):

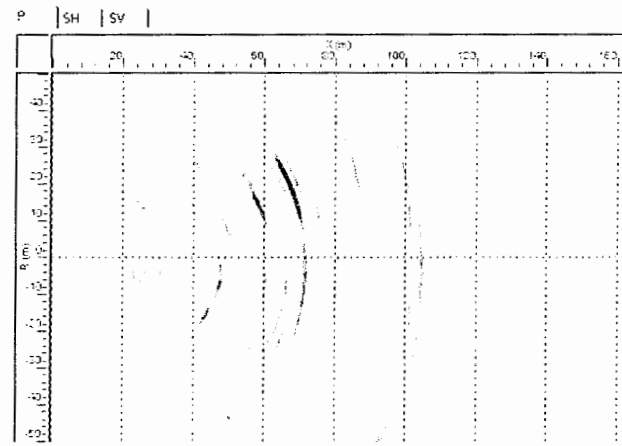
- محدودیت دامنه
- محدودیت همپوشانی
- محدودیت تعداد

شکل ۲-۲۲ بیانگر دو محدودیت اول می‌باشد. در این شکل ابتدا بیضی‌هایی که دارای ۲۰ درصد بالاترین دامنه هستند، بدست آمده‌اند (زیرا هرچه دامنه موج بالاتر باشد، یعنی اینکه ضریب بازتاب بالاتر بوده و موج حاصل اطلاعات قابل اطمینان‌تری از فصل مشترک می‌دهد). سپس از نقاط تقاطع بیضی‌های حاصل نقاطی بدست آمده که دارای ۲۰ درصد بالاترین همپوشانی می‌باشند یا به عبارتی بیشترین تعداد بیضی‌ها از آن نقاط عبور کرده‌اند.

در نهایت همانگونه که از شکل ۲-۲۲ معلوم است، هنوز تعداد بیضی‌ها زیاد بوده و تعدادی از آنها مربوط به تغییرات درونی در یک زون خاص می‌باشند. چون همانطور که گفته شد، مبنای روش‌های لرزه‌ای بر این اصل استوار است که لایه‌ها همگن باشند و با وجود تغییرات در داخل لایه‌ها دقت این روش‌ها کم می‌شود. به منظور رفع این مشکل از محدودیت سوم استفاده می‌شود.



همانطور که در شکل ۲-۲۳ دیده می‌شود، از بین بیضی‌های حاصل ۱۰ بیضی‌ای که دارای بالاترین دامنه می‌باشند، انتخاب شده‌اند.

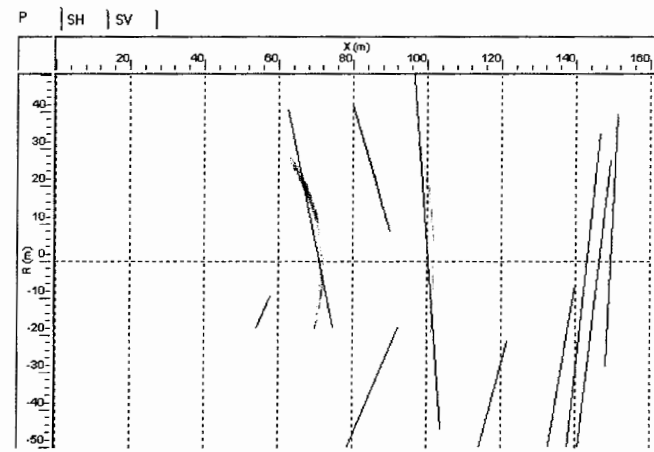


Migration Image

Amplitude quantile: 20 %  
Coverage quantile: 20 %

شکل ۲-۲۲- بیضی‌های حاصل در مسیر پیشروی تونل با اعمال دو محدودیت دامنه و همپوشانی

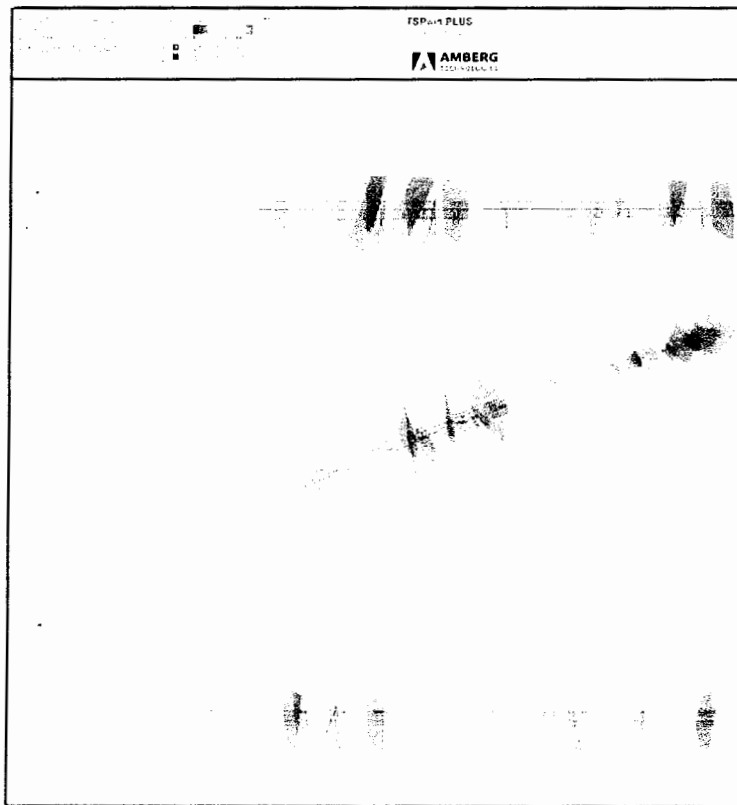
(Amberg Measuring Technique, 2002a)



شکل ۲-۲۳- کاهش تعداد بیضی‌ها به بیضی‌های غالب با اعمال محدودیت تعداد

(Amberg Measuring Technique, 2002a)

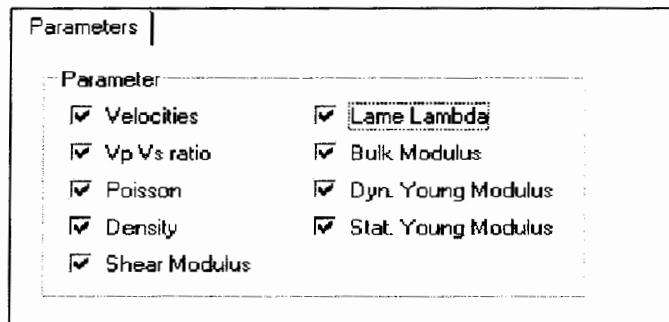
با داشتن نقاط اطلاعاتی مختلف از یک فصل مشترک، نرم افزار TSPwin قادر به تعیین آزمون و شیب فصل مشترک و ارائه شکلی سه بعدی از لایه بندی یا هرگونه ناپیوستگی مسیر پیشروی تونل می‌باشد (شکل ۲-۲۴).



شکل ۲-۲۴- مدل سه بعدی لایه بندی مسیر پیشروی تونل (شرکت ژئوتک، ۱۳۸۵)

### ۲-۳-۴- بررسی پایداری مسیر پیشروی تونل

با توجه به اینکه قبل از عملیات تونل‌سازی، مطالعات زمین‌شناسی در منطقه مورد نظر صورت می‌گیرد، لذا می‌توان یک تقسیم‌بندی کلی از نوع سنگ‌ها بدست آورد. با داشتن سرعت‌های  $V_p$  و  $V_s$  هر لایه و دانستن اینکه جنس غالب سنگ‌های منطقه از نوع آذرین درونی، آذرین بیرونی، رسوبی و یا دگرگونی باشد، با استفاده از جدول الف-۱ از پیوست الف، مقادیر دانسیته برای هر لایه تعیین می‌شود و در پی آن با داشتن دانسیته و سرعت‌ها با کمک جدول الف-۲ از پیوست الف مقادیر پارامترهای شکل ۲-۲۵ بدست می‌آیند.



شکل ۲-۲۵- پارامترهایی که روش TSP 203 قادر به تعیین آنها می‌باشد  
(Amberg Measuring Technique, 2001a)

با به دست آوردن پارامترهای ذکر شده، و از طرفی با داشتن موقعیت فصل مشترک‌ها که از بخش قبل به دست آمده‌اند، نرم‌افزار جدولی به صورت شکل ۲-۲۶ ایجاد می‌کند. همانطور که دیده می‌شود، برای هر لایه، نرم‌افزار موقعیت نقطه‌ای از لایه مورد نظر و ۹ پارامتر مهندسی سنگ برای نقطه مذکور را ارائه می‌دهد.

Rock Viewer														OK	Cancel
Rock type: Metamorphic															
	No	RCV	Wave Type	Inters. TM (m)	Velocity (m/s)	Vp Vs Ratio	Poisson	Density (g/cm3)	Shear Modulus (GPa)	Lambda (GPa)	Bulk Modulus (GPa)	E Dyn. (GPa)	E Stat. (GPa)		
1	1	1	P	6540.29	5402	1.73	0.25	2.80	27	27	45	72	53		
2	2	1	P	6553.80	5392	1.75	0.26	2.78	26	28	46	69	51		
3	3	1	P	6562.86	5408	1.80	0.28	2.76	25	31	48	66	48		
4	4	1	P	6596.20	5316	1.78	0.27	2.74	24	29	45	65	47		
5	5	1	P	6645.80	5392	1.78	0.27	2.77	25	29	46	67	49		
6	1	1	SV	6508.43	3116	1.73	0.25	2.79	27	27	45	71	53		
7	2	1	SV	6552.20	3053	1.77	0.26	2.77	26	29	46	68	50		
8	3	1	SV	6570.11	3019	1.79	0.27	2.76	25	30	47	67	49		
9	4	1	SV	6609.80	3002	1.77	0.27	2.75	25	28	45	66	47		
10	5	1	SV	6635.75	3000	1.79	0.27	2.75	25	30	46	66	48		

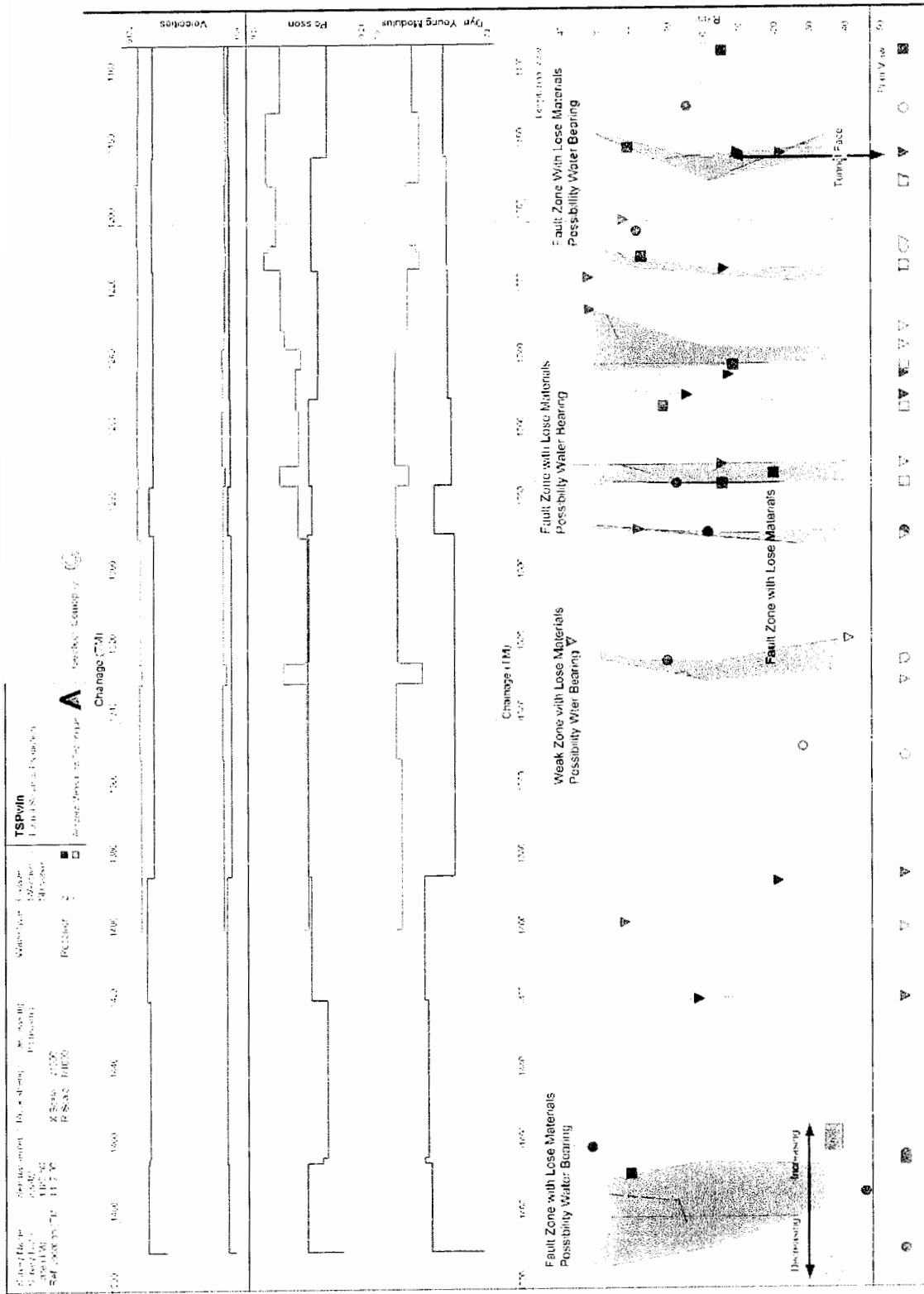
شکل ۲-۲۶- خروجی نرم‌افزار TSP Win (Amberg Measuring Technique, 2001a)

شکل ۲-۲۷ شاید اصلی‌ترین خروجی نرم‌افزار TSPwin باشد. در بالای این شکل مقادیر پارامترهای مکانیکی سنگ برای مترهای مختلف آورده می‌شود. در شکل ۲-۲۷ تنها از سه پارامتر استفاده شده است. خطوط قرمز مربوط به برداشت‌های یک ژئوفن و خطوط آبی مربوط به ژئوفن دیگر است (برداشت با دو ژئوفن صورت گرفته است). اولین پارامتر سرعت موج می‌باشد. خطوط بالاتر که مقادیر بیشتری را نشان می‌دهند مربوط به امواج P و خطوط پایین‌تر با مقادیر

کمتر بیانگر سرعت امواج S هستند. پارامتر دوم ضریب پوآسون و پارامتر سوم مدول یانگ دینامیک را نشان می‌دهد. سه پارامتر مذکور اصلی‌ترین پارامترها در ارزیابی پایداری مسیر پیشروی تونل می‌باشند. به همین دلیل از آوردن بقیه پارامترها صرف نظر شده است. در نهایت با استفاده از تغییرات این سه پارامتر، همانطور که در بخش پائینی شکل ۲-۲۷ دیده می‌شود، یک زون‌بندی پایداری سنگ‌های مسیر پیشروی تونل ایجاد می‌گردد. در شکل مذکور زون‌های قرمز رنگ بیانگر مناطق مقاوم بوده و هر چه رنگ به آبی نزدیک‌تر شود زون مورد نظر سست‌تر می‌گردد.

با توجه به مطالب ذکر شده در این فصل، در فصل آینده به کاربرد روش TSP 203 در

تونل انتقال آب چشمه روزیه سمنان پرداخته می‌شود.



شکل ۲-۲۷- تحلیل پایداری مسیر پیشروی تونل در نرم افزار TSPwin. رنگ قرمز بیانگر زون‌های ضعیف می‌باشد (شکت ژئوتک، ۱۳۸۳)

## فصل سوم

بررسی نتایج حاصل از  
بکارگیری روش TSP 203 در  
تونل انتقال آب چشمه روزیه

### ۳-۱- مقدمه

با توجه به فصول گذشته و با هدف بررسی نتایج روش پیش‌بینی لرزه‌ای TSP 203، نتایج روش مذکور در یکی از تونل‌ها، مورد مطالعه تفصیلی قرار گرفت. بدین صورت مقایسه‌ای بین نتایج روش TSP 203 با نتایج واقعی که پس از حفر تونل بدست آمده‌اند، صورت گرفت. به این منظور باید محلی برای مطالعه انتخاب می‌شد که از نظر داده‌های مکانیک سنگی جهت مقایسه با نتایج TSP 203 غنی باشد. از آنجایی که در اکثر پروژه‌های تونل‌سازی هدف دست‌اندرکاران پروژه، حفر تونل با حداکثر سرعت و کمترین هزینه می‌باشد، لذا در اکثر موارد تنها بر اساس نتایج TSP 203 حفاری صورت گرفته و اطلاعات تفصیلی‌تری موجود نمی‌باشد.

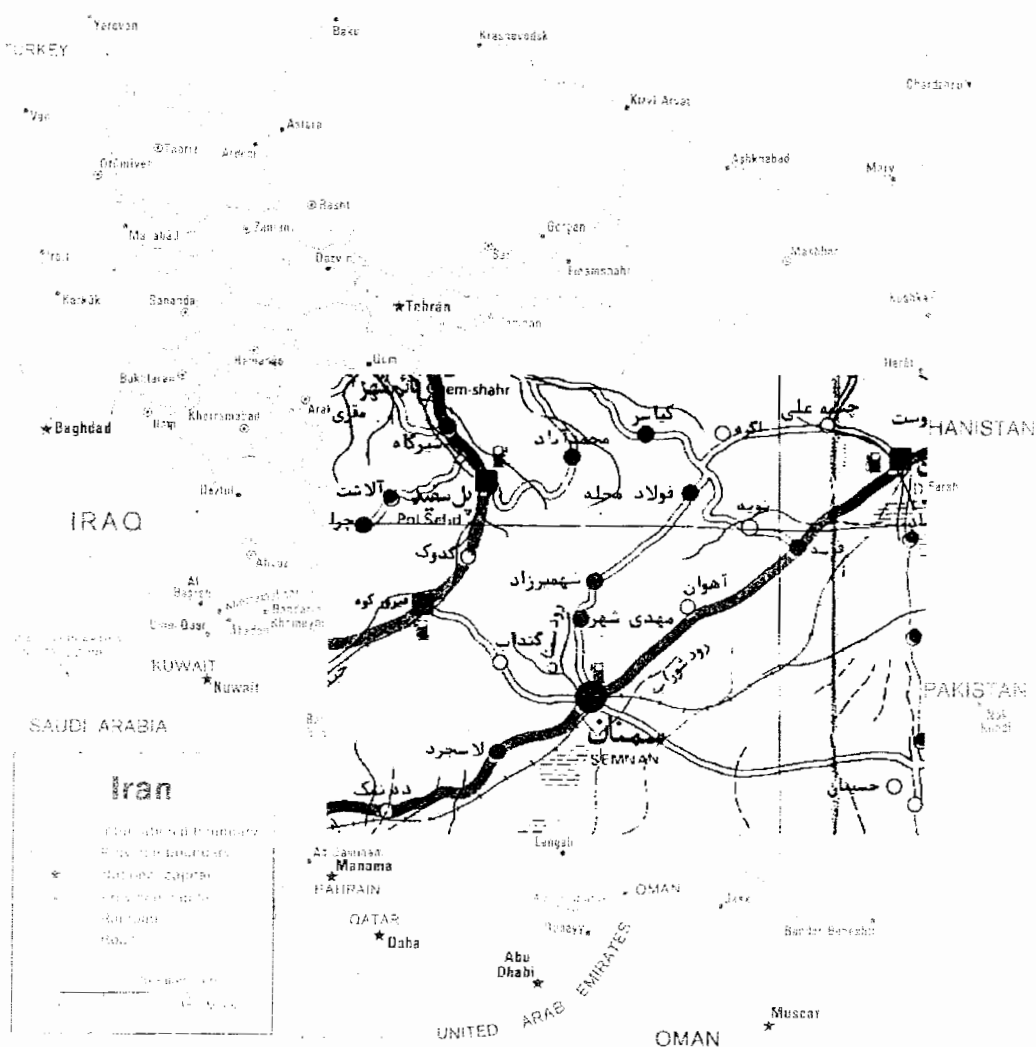
در میان پروژه‌های انجام گرفته در ایران تنها در پروژه آبرسانی تونل چشمه روزیه به سمنان، پس از انجام برداشت‌های TSP 203 و حفر تونل، مطالعات تفصیلی‌تر از جمله نمونه‌برداری از نقاط مختلف تونل و تهیه نقشه زمین‌شناسی تونل صورت گرفته است. با همکاری شرکت ژئوتک نماینده انحصاری شرکت آمبرگ سوئیس در ایران و شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس به عنوان مشاور و ناظر پروژه اقدام به جمع‌آوری داده‌ها شد. در ادامه به تفصیل به بررسی مراحل انجام مطالعه پرداخته می‌شود.

### ۳-۲- تونل انتقال آب چشمه روزیه به سمنان

#### ۳-۲-۱- موقعیت جغرافیایی تونل

تونل آبرسانی سمنان به منظور تأمین بخشی از نیازهای آبی شهر سمنان اجرا شده است. آب مورد نیاز طرح با احداث آبگیر و سازه‌های جانبی در مجاورت چشمه روزیه واقع در ۴۶ کیلومتری شمال شهر سمنان و در نزدیکی روستای چاشم، تأمین می‌شود (شکل ۳-۱). این آب با

دبی ۶۵۰ لیتر در ثانیه از طریق ۱۶ کیلومتر لوله فولادی با قطر ۸۰۰ میلیمتر از پای چشمه توسط ۳ واحد تلمبه خانه و ۴ واحد مخزن مکش به حجم ۲۰۰۰ متر مکعب و یک مخزن ذخیره ۷۰۰۰ متر مکعبی تا ورودی تونل انتقال آب در پای گردنه بشم و دارای روباره به ارتفاع ۵۴۰ متر پمپاژ می‌شود. تونل دارای روند تقریباً شرقی - غربی، قطر ۳/۲ متر و طول حدود ۳۲۰۰ متر می‌باشد و از گردنه بشم عبور می‌کند.



شکل ۳-۱- موقعیت جغرافیایی چشمه روزیه به سمتان (شرکت ژئوتک، ۱۳۸۳)



### ۲-۲-۳- زمین‌شناسی و تکتونیک منطقه تونل

#### ۱-۲-۲-۳- ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی محدوده تونل

از دیدگاه زمین‌شناسی این تونل در زون البرز واقع شده و با توجه به شرایط توپوگرافی منطقه، تونل فقط کوه بشم را قطع می‌کند و دارای روند تقریباً شرقی - غربی است. منطقه در مجموع به صورت یک محدوده گسلی و رورانده است که تأثیر عوامل تکتونیکی در ناحیه مورد مطالعه باعث گردیده که در منطقه بشم سازندهای پرکامبرین (باروت) و دوران اول (زاگون - لالون) در مجاورت سازندهای دوران سوم (ائوسن، معادل سازند کرج) قرار گیرند.

با توجه به شکل ب-۱ از پیوست ب در طول مسیر تونل از قسمت ورودی به سمت خروجی تونل به ترتیب سازندهای زیر قرار دارند:

- آبرفتهای عصر حاضر (Qt): از دهانه ورودی تونل به طول تقریباً ۱۴۷ متر.

- سازند توفی - مارنی ائوسن (Em): از ورودی تونل تا حدود کیلومتر ۰+۹۳۰، جنس سنگ‌ها: غالباً مارلستون و برشهای آتشفشانی.

- سازند باروت: رخنمون در قسمتهای میانی تونل در سه واحد. واحد اول در کیلومتر ۰+۹۳۰ الی ۰+۹۵۰، جنس سنگ‌ها: تناوبی از سنگ آهک سیاه و سیلتستون به همراه دایک‌های دیاباز و همچنین تناوبی از سنگ آهک سیاه و دولومیت سیاه. واحد دوم در کیلومتر ۰+۹۵۰ الی ۰+۱۵۰، جنس سنگ‌ها: غالباً سنگ آهک. واحد سوم در کیلومتر ۰+۱۵۰ الی ۰+۳۵۰، جنس سنگ‌ها: تناوبی از سنگ آهک سیاه و شیل ماسه‌ای قرمز و سبز.

- سازند زاگون (PCbt): از حدود کیلومتر ۰+۳۵۰ الی ۰+۷۵۰، جنس سنگ‌ها: شیل قرمز و ماسه سنگ قرمز روشن.

- سازند لالون (Cl): از حدود کیلومتر ۰+۷۵۰ تا انتهای تونل. جنس سنگ‌ها: غالباً ماسه سنگ قرمز.

### ۲-۲-۳- زمین‌ساخت منطقه

از محدوده مورد اجرای تونل چندین گسل با پتانسیل لرزه‌زایی بالا عبور می‌کند که از آن جمله گسل بشم با طولی حدود ۹۰ تا ۱۳۰ کیلومتر و با پتانسیل لرزش با بزرگی بیشتر از ۷

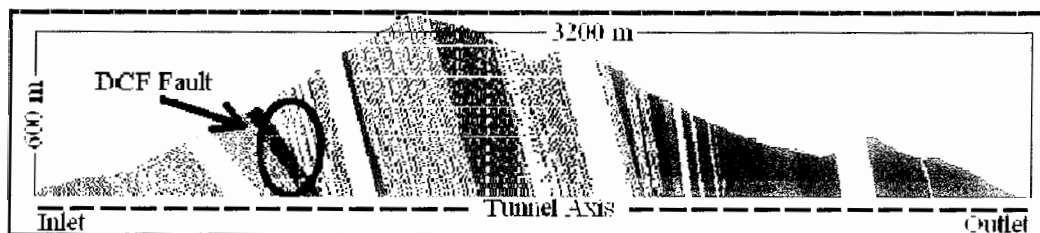
ریشتر (در مقیاس امواج سطحی) است که تونل آبرسانی را در حدود کیلومتر ۹۳۰+۰ قطع می‌کند. گسل شاهرود نیز با طول تقریبی ۱۷۰ کیلومتر تقریباً از ۲ کیلومتری تونل عبور می‌کند و دارای پتانسیل لرزش بیشتر از گسل بشم می‌باشد (شرکت ژئوتک، ۱۳۸۳).

قابل ذکر است که سازندهای پرکامبرین و دوران اول منطقه (سازندهای باروت، زاگون، لالون) توسط گسل بشم که به صورت تراست عمل کرده، بر روی رسوبات دوران سوم (ائوسن) رانده شده و در طول تونل این سازندها در مجاورت هم قرار گرفته‌اند.

گسل‌های شناخته شده اساسی منطقه تا شعاع ۱۵۰ کیلومتر بر اساس داده‌های گردآوری شده شامل گسل آستانه، گسل بشم، گسل اوران، گسل سمنان، گسل عطاری، گسل دیکتاش، گسل انزاب، راندگی آبیگ شاهرود و گسل اوریم می‌باشند.

### ۳-۲-۲-۳- مطالعات زمین‌شناسی و تکتونیک انجام شده و اهمیت انجام مطالعات جدید

جهت بررسی ویژگی‌های ژئومکانیکی سنگ‌های مسیر تونل، تعداد چهار گمانه به ترتیب از سمت ورودی به خروجی تونل به اعماق ۳۵، ۷۱، ۶۰ و ۳۰ متر حفر گردیده است. با توجه به کوهستانی بودن منطقه، ارتفاع زیاد روباره تونل، عدم وجود راه دسترسی به قسمت‌های مختلف در طول تونل و با در نظر گرفتن محدودیت‌های مالی و زمانی، این مطالعات بسیار محدود در ابتدا و در قسمت‌های انتهایی تونل انجام گرفته است. مقطع زمین‌شناسی مسیر پیشروی تونل به صورت شماتیک در شکل ۲-۳ دیده می‌شود. مقطع زمین‌شناسی اصلی نیز که با استفاده از نتایج گمانه‌ها و با کمک نقشه‌های زمین‌شناسی منطقه ایجاد شده، در شکل ب-۱ در پیوست ب آمده است. با در نظر گرفتن نواقص و محدودیت‌های موجود در این مطالعات مقرر شد مطالعات تکمیلی اعم از حفاری‌ها و آزمایش‌های مختلف توسط پیمانکار در حین اجرا انجام گردد.



شکل ۲-۳- مقطع طولی عوارض زمین‌شناسی مسیر تونل (Alimoradi, et al, 2007)

برای مطالعه بیشتر وضعیت ناپیوستگی‌های مسیر پیش‌روی تونل سه برداشت TSP 203 جمعاً به طول ۶۸۴ متر یکی از سمت ورودی و دو تست از سمت خروجی تونل صورت گرفت که در بخش‌های بعدی به تفصیل در مورد آن صحبت خواهد شد.

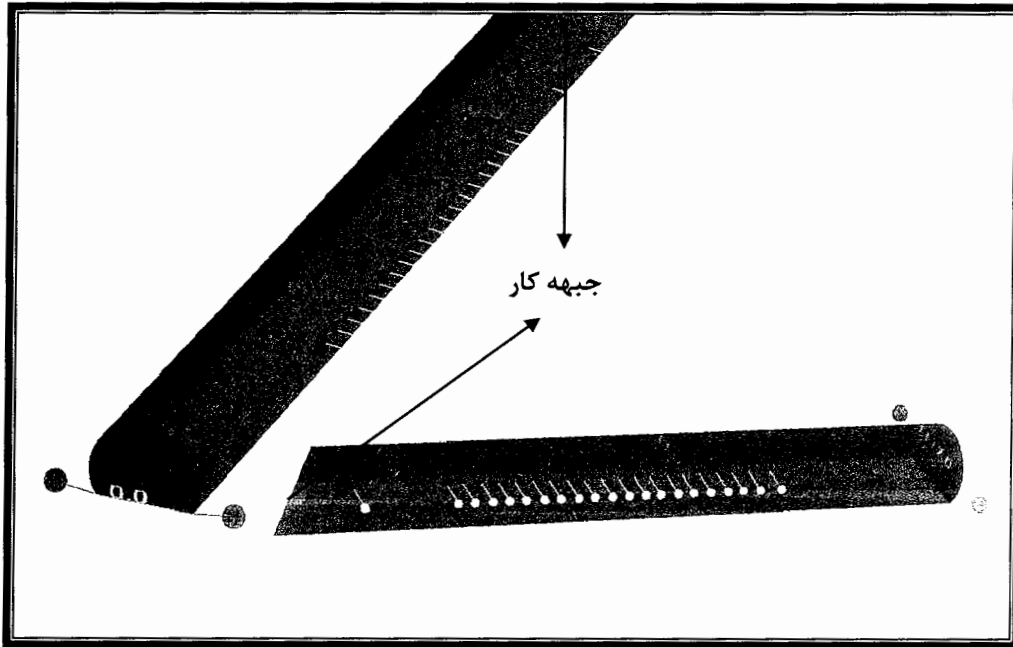
### ۳-۲-۳- عملیات میدانی

پس از بازدید از دو جبهه کار، طرح حفاری برای چالهای انفجاری و گیرنده‌ها ایجاد شد. در آزمایش لرزه‌سنجی به روش TSP 203 احتیاجی به دسترسی مستقیم به سینه‌کار تونل نیست، اما هر چه به سینه‌کار تونل نزدیکتر باشیم عمق بیشتری از تونل را می‌توان با استفاده از این روش شناسایی نمود (Amberg Measuring Technique, 2001a). پس حتی الامکان سعی شد که چالهای انفجاری در نزدیکترین مکان به سینه‌کار تونل حفر گردد. اما از آنجائیکه در محدوده سینه‌کارهای ورودی و خروجی تونل سنگهایی ریزشی وجود داشت که هم چالزنی در آنها با دشواری زیادی انجام می‌شد و هم تقریباً تمامی چالها پس از حفر ریزش کرده و پر می‌شدند، در نتیجه از سینه‌کار تونل فاصله گرفته شد و چالهای انفجاری در مناطقی از تونل حفر شدند که پایداری بیشتری داشتند (شکل ۳-۳).

در زمان انجام آزمایش جبهه کار ورودی تونل در کیلومتر ۱+۱۸۲ از مبداء قرار داشت و گیرنده‌ها در کیلومتر ۱+۱۱۷ نصب گردیدند. برداشت از سمت ورودی تونل، کیلومتر ۱+۱۵۲ تا ۱+۴۸۹ را تحت پوشش قرار داد.

در اولین برداشت از سمت خروجی تونل، جبهه کار در کیلومتر ۱+۷۴۹ از مبداء قرار داشت که با توجه به ریزش‌ها و تخریب جبهه کار تقریباً اولین چال انفجاری در فاصله‌ای حدود ۸۰ متری سینه‌کار قرار گرفت و گیرنده‌ها در کیلومتر ۱+۸۷۴ نصب گردیدند. در این برداشت کیلومترهای ۱+۸۳۶ تا ۱+۴۷۳ تحت پوشش قرار گرفتند.

در دومین برداشت از سمت خروجی تونل، جبهه کار در کیلومتر ۱+۶۱۳ از مبداء قرار داشت و گیرنده‌ها در کیلومتر ۱+۶۹۲ نصب گردیدند. در این برداشت کیلومترهای ۱+۶۵۰ تا ۱+۴۱۷ تحت پوشش قرار گرفتند.



شکل ۳-۳- موقعیت قرارگیری چال‌های انفجاری، گیرنده‌ها و سینه کار - شکل بالا موقعیت برداشت در سمت ورودی تونل و شکل پائین موقعیت برداشت اول را در سمت خروجی تونل نشان می‌دهد (شرکت ژئوتک، ۱۳۸۳).

در ذیل مشخصات چالها نمایش داده شده است:

- چالها در جبهه کار ورودی:

- چالهای انفجاری: ۲۸ حلقه، قطر هر چال ۵۰ میلیمتر، عمق متوسط چال ۱/۵۵ متر، با شیب ۱۰-۱۵ درصد منفی نسبت به افق، ارتفاع متوسط از کف تونل ۱/۳ متر.
- چالهای گیرنده‌ها: ۲ حلقه در هر طرف تونل، قطر هر چال ۴۵ میلیمتر، عمق چال ۲ متر، با شیب ۱۰-۱۵ درصد مثبت نسبت به افق، ارتفاع متوسط از کف تونل ۱/۳ متر.

در این سینه کار، سست بودن دیواره تونل در بعضی مقاطع، منجر به ریزش چالهای انفجاری گردید که فقط عملیات انفجار در ۲۱ چال صورت گرفت.

- چالها در جبهه کار خروجی (در برداشت اول):

- چالهای انفجاری: ۲۸ حلقه، قطر هر چال ۵۰ میلیمتر، عمق متوسط چال ۱/۷ متر، با شیب ۱۰-۱۵ درصد منفی نسبت به افق، ارتفاع متوسط از کف تونل ۱/۴ متر.
  - چالهای گیرندهها: ۲ حلقه در هر طرف تونل، قطر هر چال ۴۵ میلیمتر، عمق چال ۲ متر، باشیب ۱۰-۱۵ درصد مثبت نسبت به افق، ارتفاع متوسط از کف تونل ۱/۴ متر.
- که در اثر ریزش چالهای انفجاری فقط ۲۲ چال با موفقیت منفجر شدند.

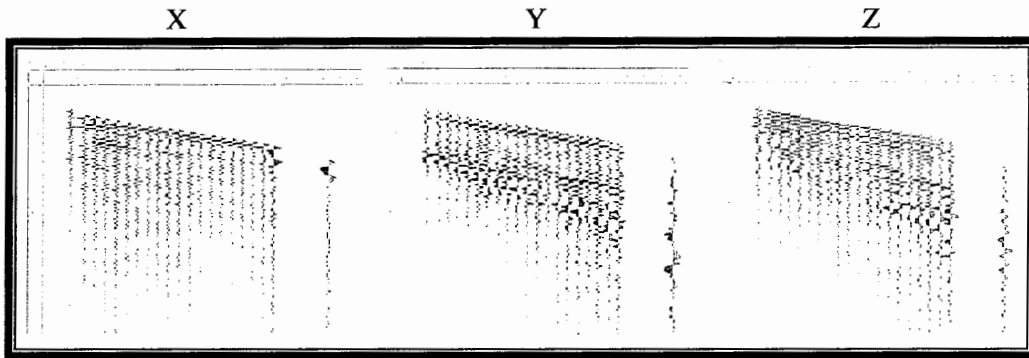
- چالها در جبهه کار خروجی (در برداشت دوم):

- چالهای انفجاری: ۳۰ حلقه، قطر هر چال ۵۰ میلیمتر، عمق متوسط چال ۱/۷ متر، با شیب ۱۰-۱۵ درصد منفی نسبت به افق، ارتفاع متوسط از کف تونل ۱/۴ متر.
  - چالهای گیرندهها: ۲ حلقه در هر طرف تونل، قطر هر چال ۴۵ میلیمتر، عمق چال ۲ متر، باشیب ۱۰-۱۵ درصد مثبت نسبت به افق، ارتفاع متوسط از کف تونل ۱/۴ متر.
- که در اثر ریزش چالهای انفجاری فقط ۲۴ چال با موفقیت منفجر شدند.

پس از اجرای عملیات انفجار، اندازه‌گیری لرزه‌ای در تمام چال‌های دو طرف تونل بدون اشکال صورت پذیرفت.

### ۳-۲-۴- پردازش داده‌ها

بعد از وارد کردن اطلاعات اولیه زمین‌شناسی، مقاطع طولی و عرضی تونل، و محل قرارگیری چالهای انفجاری و گیرنده‌ها به کامپیوتر حامل نرم افزار TSPwin، سیستم آماده اندازه‌گیری و ثبت اطلاعات سه بعدی در جهات X, Y, Z برای هر گیرنده به صورت جداگانه شد (شکل ۳-۴). وجود دو گیرنده در هر مرحله آزمایش یک بررسی مضاعف را امکان‌پذیر می‌نماید.



شکل ۳-۴- اطلاعات لرزه‌ای خام مربوط به گیرنده شماره ۱ در تونل ورودی در سه بعد X, Y, Z

(Amberg Measuring Technique, 2001b)

استخراج و بررسی اطلاعات برای پردازش لرزه‌ای از سیگنال‌های برگشتی حاصل از برخورد امواج انفجار با عوارض زمین‌شناسی مختلف صورت می‌گیرد. نرم افزار پردازش برای انجام این عملیات در ۱۱ مرحله در محیط ویندوز طراحی شده است. مراحل مذکور عبارتند از (Amberg Measuring Technique, 2001a): ۱- تنظیم داده‌ها، ۲- اعمال فیلتر پهنه گذر، ۳- به دست آوردن اولین حادثه موج در روی تریس‌ها، ۴- تعیین سرعت امواج مستقیم، ۵- کنترل انرژی نقاط انفجار، ۶- ارزیابی کیفیت موج، ۷- مشخص کردن امواج انعکاس یافته، ۸- تفکیک امواج طولی و عرضی، ۹- آنالیز سرعت‌ها، ۱۰- تعیین عمق عوارض موجود در جلوی سینه‌کار تونل، ۱۱- مدل‌سازی عوارض موجود در جلوی سینه‌کار تونل. در هر کدام از این مراحل دیدن نتایج امکان‌پذیر است. پردازش اطلاعات به صورت اتوماتیک و دستی می‌تواند انجام گیرد. در مرحله پایانی پردازش، اطلاعات پردازش شده به صورت جداول الف-۳ تا الف-۵ در پیوست الف ارائه شده‌اند.

جدول ۳-۱ بخشی از نتایج مربوط به برداشت از دهانه ورودی تونل در کیلومتر ۱۵۲+۱ را نشان می‌دهد. در ستون دوم این جدول، عدد ۱ بیانگر این موضوع است که برداشت در آن نقطه توسط گیرنده شماره ۱ صورت گرفته و عدد ۲ نیز نشان دهنده برداشت توسط گیرنده شماره ۲ می‌باشد. ستون سوم نوع موج رسیده به گیرنده که دامنه غالب را ایجاد کرده است، نشان می‌دهد. در ستون چهارم موقعیت نقطه تخمین و در مابقی ستون‌ها پارامترهای مکانیک سنگی مربوطه آورده شده است. نرم‌افزار خروجی دیگری نیز به صورت جدول ۳-۲ دارد. دو پارامتر مهم

در این جدول، ستون سوم و پنجم (بزرگی موج رسیده به گیرنده،  $M$ ، و عمق تخمین نسبت به سینه کار،  $X$ ) می‌باشند.

جدول ۳-۱- پارامترهای مکانیک سنگی به دست آمده از نرم افزار TSPwin - ورودی تونل از کیلومتر ۱۵۲+۱ تا

(Amberg Measuring Technique, 2001b) ۱+۲۰۵

No	RCV	Wave Type	Inters TM (m)	Velocity (m/s)	Vp Vs Ratio	Poisson	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Shear Modulus (GPa)	Lambda (GPa)	Bulk Modulus (GPa)	E Dyn (GPa)	E Stat (GPa)
1	2	SV	1152.45	3310	1.69	0.23	2.8	31	26	47	80	61
2	1	SV	1163.02	3436	1.77	0.27	2.85	34	38	61	89	70
3	1	SH	1166.08	3367	1.81	0.28	2.84	32	41	62	85	66
4	1	SH	1169.25	3379	1.79	0.27	2.84	32	40	61	86	67
5	2	SH	1173.91	3257	1.72	0.25	2.79	30	28	48	78	59
6	2	P	1176.29	5725	1.74	0.25	2.8	30	31	51	80	61
7	2	P	1181.6	5641	1.72	0.24	2.8	30	29	49	79	60
8	1	SH	1183.12	3392	1.8	0.28	2.84	33	40	62	87	68
9	2	SV	1185.64	3306	1.69	0.23	2.8	31	27	47	80	61
10	1	SV	1185.88	3431	1.77	0.27	2.84	33	38	61	89	69
11	1	SH	1187.06	3358	1.8	0.28	2.83	32	40	61	85	66
12	2	SV	1188.05	3278	1.74	0.26	2.8	30	31	51	79	60
13	1	P	1188.83	6162	1.79	0.27	2.85	34	41	63	89	70
14	1	SV	1189.8	3425	1.78	0.27	2.84	33	39	61	88	69
15	1	SH	1194.24	3369	1.8	0.28	2.83	32	40	61	85	66
16	2	SH	1195.83	3271	1.75	0.26	2.8	30	32	52	79	60
17	2	SV	1197.29	3291	1.74	0.25	2.8	30	31	51	80	61
18	1	SV	1198.29	3443	1.76	0.26	2.85	34	38	60	89	70
19	2	SV	1198.9	3311	1.69	0.23	2.8	31	26	47	80	61
20	2	SH	1205.35	3268	1.75	0.26	2.8	30	32	52	79	60

نرم افزار TSPwin بر اساس ۹ پارامتر مکانیکی سنگ به دست آمده، به بررسی پایداری مسیر پیشروی تونل می‌پردازد. همانطور که قبلاً نیز ذکر شده است، از بین پارامترهای به دست آمده، سه پارامتر سرعت، ضریب پواسون و مدول یانگ دینامیک بیشترین تأثیر را در تخمین پایداری بر عهده دارند (Amberg Measuring Technique, 2001a). لذا از این سه پارامتر استفاده شد و مسیر پیشروی تونل به صورت اشکال ۳-۵ و ۳-۶ تخمین زده شد. تغییرات رنگ از قرمز به آبی نشانگر کاهش مقاومت سنگ‌ها می‌باشد.

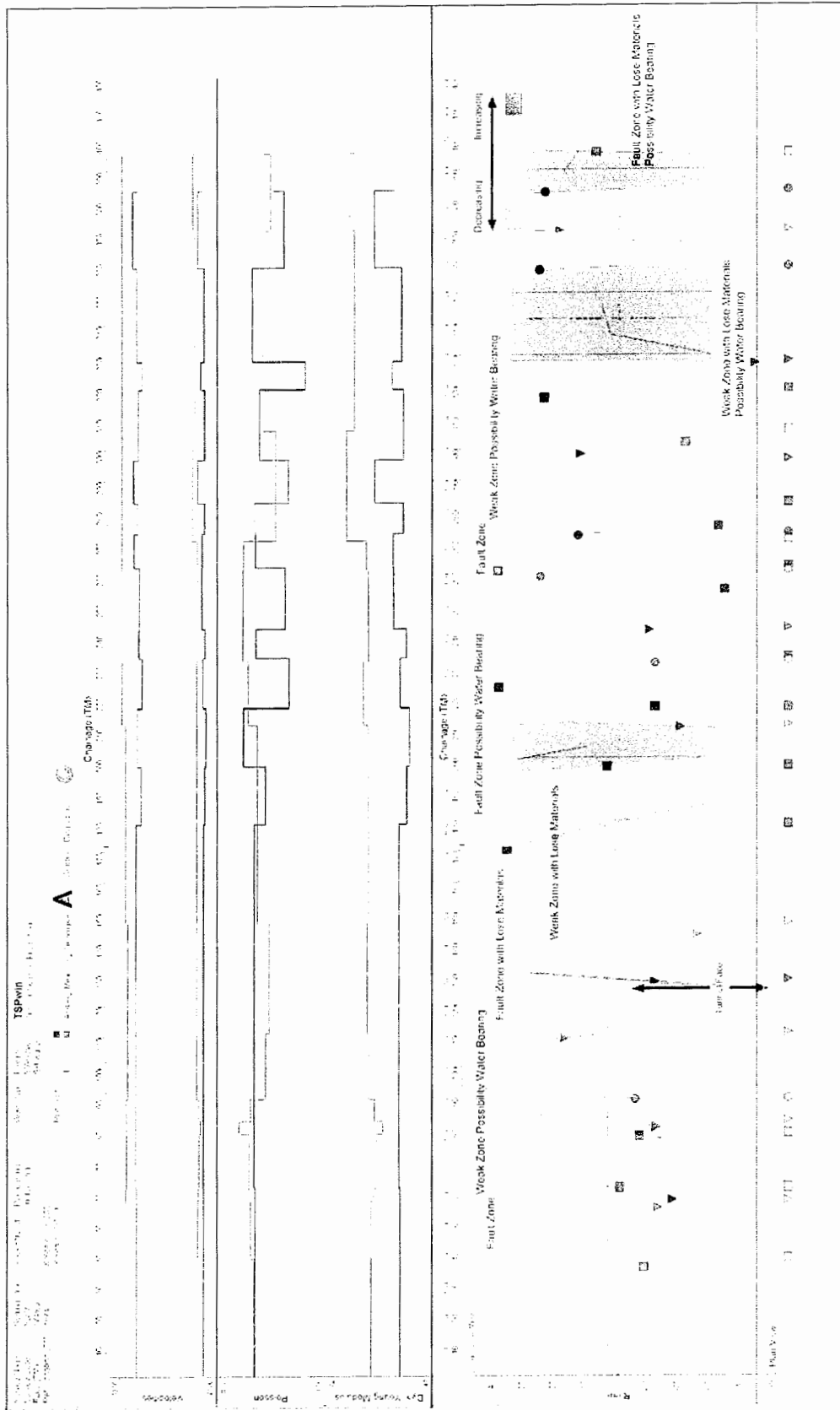
جدول ۳-۲- پارامترهای لرزه‌ای حاصل از نرم‌افزار TSPwin- ورودی تونل از کیلومتر ۱+۱۵۲ تا ۱+۲۰۵

(Amberg Measuring Technique, 2001b)

No	Inters TMI (m)	Magnitude	Polarity	X-coord
1	1152.45	4.08E-03	1	35.45
2	1163.02	1.26E-02	-1	46.02
3	1166.08	2.35E-02	-1	49.08
4	1169.25	1.25E-02	-1	52.25
5	1173.91	5.42E-03	1	56.91
6	1176.29	8.90E-03	-1	59.29
7	1181.6	3.14E-03	-1	64.6
8	1183.12	9.68E-03	-1	66.12
9	1185.64	4.01E-03	1	68.64
10	1185.88	4.57E-03	1	68.88
11	1187.06	5.46E-03	1	70.06
12	1188.05	4.20E-03	1	71.05
13	1188.83	1.87E-02	-1	71.83
14	1189.8	1.03E-02	-1	72.8
15	1194.24	7.02E-03	1	77.24
16	1195.83	5.81E-03	1	78.83
17	1197.29	4.03E-03	-1	80.29
18	1198.29	2.40E-03	-1	81.29
19	1198.9	2.74E-03	-1	81.9
20	1205.35	5.84E-03	1	88.35

عمق  
تخمین  
نسبت به  
جبهه‌کار  
تونل





شکل ۳-۵- پیش‌بینی وضعیت سنگ‌های مسیر پیشروی تونل با استفاده از نتایج برداشت اول از سمت خروجی تونل - کیلومتر از ۱+۸۳۶ تا ۱+۴۷۳ (Amberg Measuring Technique, 2001b)



تخمین مربوط به برداشت از سمت ورودی تونل نیز قبلاً در شکل ۲-۲۷ آورده شده است و در اینجا از ذکر مجدد آن خودداری می‌گردد.

همانطور که ذکر شد هدف از انجام این پایان‌نامه بررسی صحت نتایج روش TSP 203 می‌باشد. تا اینجا روش مذکور، وضعیت سنگ‌های مسیر پیشروی تونل را تخمین زده است، حال باید دید که دقت روش در تعیین و تشخیص مسیر تا چه حد است؟

قبل از وارد شدن به این مبحث باید دید که چه نوع داده‌هایی در دست می‌باشد و سپس یک دسته بندی منظم از داده‌ها ایجاد نمود.

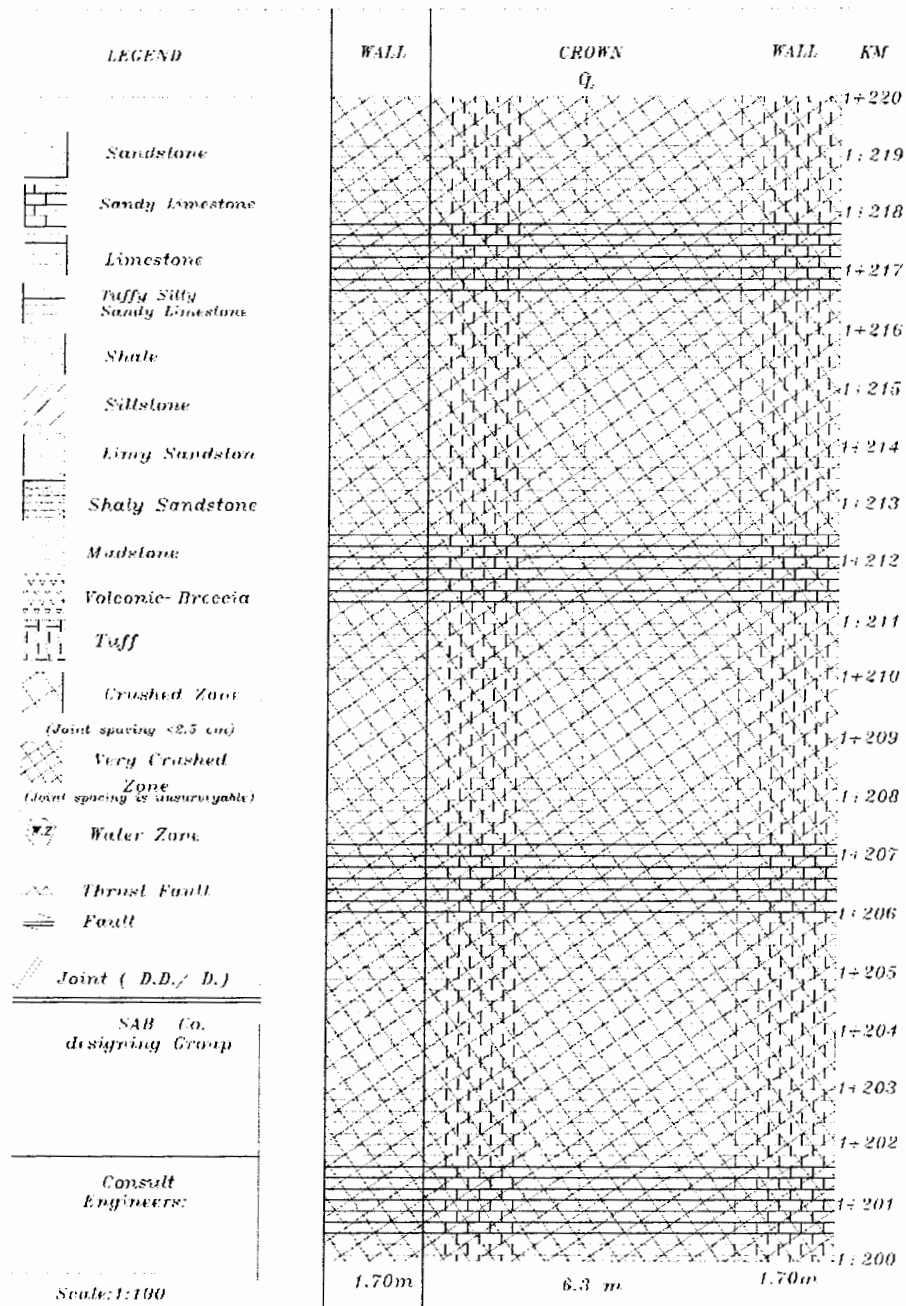
داده‌های موجود به طور کلی به دو دسته تقسیم می‌شوند، داده‌های غیر مستقیم و داده‌های مستقیم.

#### الف- داده‌های غیر مستقیم

این داده‌ها در اصل همان نتایج روش TSP 203 می‌باشند. با حذف قسمت‌هایی که برداشت‌ها با هم همپوشانی داشته‌اند، ۱۳۱ داده یا به عبارتی مقادیر ۹ پارامتر مذکور برای ۱۳۱ نقطه حاصل شد. این ۱۳۱ نقطه کل مسیر ۶۸۴ متری از تونل را شامل می‌شوند. ۹ پارامتر مذکور عبارتند از سرعت موج طولی، سرعت موج عرضی، دانسیته، ضریب پوآسون، مدول برشی، ضریب لامبدا، مدول حجمی، مدول یانگ استاتیک و دینامیک.

#### ب- داده‌های مستقیم

پس از حفر تونل اقدام به برداشت نمونه از دیواره، کف و سقف تونل و فرستادن نمونه‌ها به آزمایشگاه مکانیک سنگ شد. همچنین برداشت‌های درزه نگاری در داخل تونل نیز صورت گرفت (شرکت مهندسين مشاور مهتاب قدس، ۱۳۸۵). سپس با کمک مطالعات زمین‌شناسی، نتایج آزمایش‌های مکانیکی سنگ و برداشت‌های درزه نگاری اقدام به تهیه نقشه زمین‌شناسی تونل شد که نمونه‌ای از آن در شکل ۳-۷ دیده می‌شود. به علت حجم زیاد، نقشه‌ها در پیوست د به صورت لوح فشرده آورده شده‌اند.



شکل ۳-۷- نقشه زمین‌شناسی تونل از کیلومتر ۱+۲۰۰ تا ۱+۲۲۰ (مهندسين مشاور مهتاب قدس، ۱۳۸۵)

### ۳-۲-۵- بررسی صحت روش TSP 203

به منظور تعیین صحت روش پیش‌بینی TSP 203 باید مقایسه‌ای بین نتایج روش TSP (داده‌های غیر مستقیم) و نتایج واقعی (داده‌های مستقیم) انجام شود. نتایج واقعی (روش مستقیم) عبارتند از: مقاومت فشار تک محوره و شرایط درزه‌های موجود در سنگ که با استفاده از

تست‌های آزمایشگاهی بر روی نمونه‌ها به دست آمده‌اند. فواصل درزه‌ها و وضعیت آب زیرزمینی نیز با استفاده از نقشه زمین‌شناسی تونل به دست آمدند. جهت یافتگی درزه‌ها نیز با کمک برداشت‌های درزه نگاری مشخص شد.

همانطور که مشخص است، هیچ پارامتر مشترکی بین نتایج روش TSP 203 و داده‌های واقعی جهت مقایسه وجود ندارد. به همین جهت باید یک پارامتر مشترک ایجاد شود. با بررسی داده‌های واقعی (روش مستقیم) مشخص شد که می‌توان طبقه بندی ژئومکانیکی توده سنگ یا RMR (Rock Mass Rating) را برای مسیر مورد نظر ایجاد کرد. برای به دست آوردن RMR، پارامترهای مورد نیاز عبارتند از (Bieniawski, 1989): مقاومت فشار تک محوره، RQD یا شاخص کیفیت سنگ، فاصله درزه‌ها، شرایط درزه‌ها، وضعیت آب زیرزمینی و جهت یافتگی درزه‌ها. کلیه پارامترهای مذکور به غیر از RQD موجود می‌باشند.

RQD را نیز با به دست آوردن تعداد درزه‌ها در یک متر از طول تونل ( $\delta$ ) (با استفاده از نقشه زمین‌شناسی تونل) و استفاده از رابطه  $RQD = 100e^{-0.1\delta}(0.1\delta + 1)$  (مرادزاده، ۱۳۷۷) می‌توان به دست آورد. به این ترتیب مقادیر RMR را برای ۱۳۱ نقطه مورد نظر می‌توان تعیین کرد. جدول ۳-۳ مقدار RMR به دست آمده را برای ۲۰ نقطه نشان می‌دهد.

در عمل RMR صفر وجود ندارد، مقادیر صفر موجود در جدول مقادیر عددی می‌باشند و احتمالاً مقدار واقعی RMR بین ۱۰ تا ۲۰ می‌باشد. در بخش‌های آینده به منظور استفاده از مقادیر RMR واقعی، تصحیحاتی بر روی آن‌ها اعمال می‌گردد.

پس از به دست آوردن مقادیر RMR برای داده‌های واقعی، نوبت به بدست آوردن RMR برای نتایج TSP 203 می‌گردد. با استفاده از رابطه  $Q = 10^{(V_p - 3500)/1000}$  (Singh & Goel, 1999)، می‌توان مقدار سرعت موج طولی را برای هر نقطه به طبقه بندی بارتون (Q) تبدیل کرد. سپس با استفاده از رابطه  $RMR = 13.3 \log(Q) + 43$  (Rutledge, 1978) مقدار Q به RMR تبدیل می‌شود. نمونه‌ای از مقادیر RMR برای نتایج TSP 203 برای همان ۲۰ نقطه‌ای که در جدول ۳-۳ آمده‌اند، به صورت جدول ۳-۴ می‌باشد. از این پس مقادیر RMR برای داده‌های

واقعی (داده‌های مستقیم) را تحت عنوان  $RMR_{Real}$  و مقادیر RMR برای داده‌های TSP 203 را تحت عنوان  $RMR_{TSP}$  می‌نامیم.

جدول ۳-۳- مقادیر  $RMR_{Real}$  برای ۲۰ نقطه از کیلومتر ۱۵۲+۱ تا ۲۰۵+۱

کیلومتر	امتیاز مقاومت فشار تک محوره	امتیاز RQD	امتیاز فاصله درزه‌ها	امتیاز وضعیت درزه‌ها	امتیاز وضعیت آب زیرزمینی	امتیاز جهت یافتگی درزه‌ها	RMR
1152.45	7	20	20	25	15	0	63
1163.02	7	20	20	30	15	0	70
1166.08	7	20	15	10	15	0	67
1169.25	4	20	15	10	15	-5	59
1173.91	2	20	15	10	15	0	62
1176.29	2	20	15	10	15	0	62
1181.6	0	3	5	0	0	-12	0
1183.12	0	3	5	0	0	-12	0
1185.64	0	3	5	0	0	-12	0
1185.88	0	3	5	0	0	-12	0
1187.06	0	3	5	0	0	-12	0
1188.05	0	3	5	0	0	-12	0
1188.83	0	3	5	0	0	-12	0
1189.8	0	3	5	0	0	-12	0
1194.24	0	3	5	0	0	-12	0
1195.83	0	3	5	0	0	-12	0
1197.29	0	3	5	0	0	-12	0
1198.29	0	3	5	0	0	-12	0
1198.9	0	3	5	0	0	-12	0
1205.35	0	3	5	0	0	-12	0

جدول ۳-۴- مقادیر  $RMR_{TSP}$  برای ۲۰ نقطه از کیلومتر ۱۱۵۲ تا ۱۲۰۵

کیلومتر	$V_p$ (m/s)	Q	RMR
1152.45	5594	124.165	70.8502
1163.02	6082	381.944	77.3406
1166.08	6094	392.645	77.5002
1169.25	6048	353.183	76.8884
1173.91	5602	126.474	70.9566
1176.29	5725	167.88	72.5925
1181.6	5641	138.357	71.4753
1183.12	6106	403.645	77.6598
1185.64	5587	122.18	70.7571
1185.88	6073	374.111	77.2209
1187.06	6044	349.945	76.8352
1188.05	5704	159.956	72.3132
1188.83	6162	459.198	78.4046
1189.8	6096	394.457	77.5268
1194.24	6064	366.438	77.1012
1195.83	5724	167.494	72.5792
1197.29	5726	168.267	72.6058
1198.29	6060	363.078	77.048
1198.9	5596	124.738	70.8768
1205.35	5719	165.577	72.5127

در جدول الف-۶ از پیوست الف مقادیر  $RMR_{Real}$  و  $RMR_{TSP}$  برای ۱۳۱ نقطه مورد نظر

آورده شده است. جهت مقایسه، مقادیر مذکور به صورت شکل ۳-۸ نشان داده شده‌اند.

با بررسی شکل ۳-۸ سه زون جداگانه به دست می‌آید:

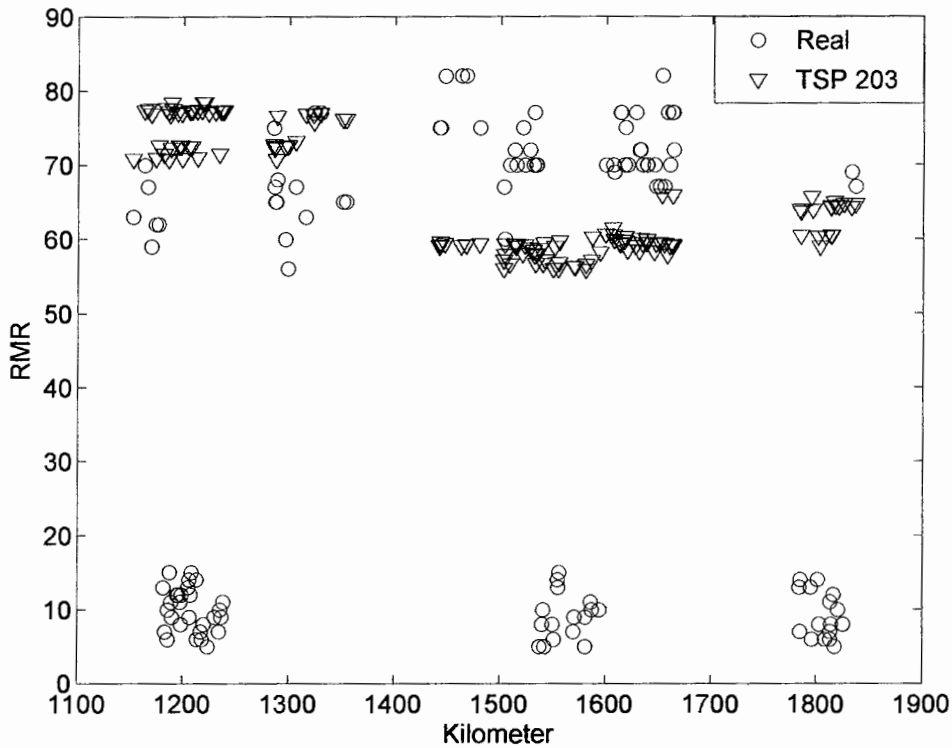
۱- مناطقی که در آنها  $RMR_{TSP}$  و  $RMR_{Real}$  به هم نزدیک می‌باشند، ولی روش TSP 203

مقادیر RMR را کمتر از واقعیت نشان می‌دهد.

۲- مناطقی که در آنها  $RMR_{TSP}$  و  $RMR_{Real}$  به نزدیک می‌باشند، ولی روش TSP 203

مقادیر RMR را بیشتر از واقعیت نشان می‌دهد.

۳- مناطقی که در آنها  $RMR_{TSP}$  و  $RMR_{Real}$  هیچ انطباقی با هم ندارند.



شکل ۳-۸- مقادیر  $RMR_{TSP}$  و  $RMR_{Real}$  برای ۱۳۱ نقطه مورد نظر

با بررسی این مناطق می توان چنین نتیجه گرفت که:

- زون اول مربوط به مناطقی است که سنگ در آنها از کیفیت خوبی برخوردار است (RMR بالای ۶۰) و با توجه به شکل ب-۱ از پیوست ب، که نشان دهنده وضعیت لایه‌ها نسبت به امتداد تونل می‌باشد، جهت برداشت‌های TSP 203 در آن مناطق در خلاف جهت شیب لایه بندی عمومی تونل می‌باشد. به عنوان مثال می‌توان به کیلومترهای ۱+۴۴۰ تا ۱+۵۳۰ و ۱+۶۰۰ تا ۱+۶۸۰ اشاره کرد.
- زون دوم مربوط به مناطقی است که سنگ در آن مناطق نیز از کیفیت خوبی برخوردار است (RMR بالای ۶۰) ولی با توجه به شکل ب-۱ از پیوست ب، جهت انجام برداشت‌های TSP 203 در آن مناطق در جهت شیب لایه بندی عمومی تونل می‌باشد. به عنوان مثال می‌توان به کیلومترهای ۱+۱۵۲ تا ۱+۱۸۰ و ۱+۲۸۰ تا ۱+۳۵۰ اشاره کرد.
- در نهایت زون سوم مربوط به مناطقی است که سنگ در آن مناطق از کیفیت پایینی برخوردار است (RMR زیر ۲۰) و جهت برداشت‌های TSP 203 در بعضی نقاط در جهت



شیب لایه بندی عمومی تونل و در بعضی نقاط در خلاف جهت شیب مذکور می‌باشد. مثال موردی برای این زون، گسل DCF می‌باشد که در شکل ۳-۲ نیز این گسل در مرکز بیضی رسم شده در روی شکل واقع است. گسل DCF تونل چشمه روزیه را در کیلومتر ۱+۱۸۰ تا ۱+۲۴۰ قطع می‌کند. در هنگام حفر تونل نیز این منطقه به شدت ریزش کرد. در صورتیکه روش TSP 203 این منطقه را یک زون با RMR نسبتاً بالا نشان داده است. جهت تأیید خرد شدگی سنگ‌ها در زون مذکور، نقشه زمین‌شناسی تونل (شکل ۳-۷) از کیلومتر ۱+۲۰۰ تا ۱+۲۲۰ را مورد بررسی قرار می‌دهیم. همانطور که از این شکل پیدا است زون مورد نظر به شدت تکتونیزه و خرد شده می‌باشد. این موضوع تأییدی بر این مطلب است که روش TSP 203 در تشخیص این زون ناتوان بوده است.

بررسی‌های دقیق‌تر نشان داد که زون‌های سستی که روش TSP قادر به تشخیص آنها نیست، مناطقی هستند به شدت خرد شده و فاقد هرگونه سیال که به شدت تحت فشار می‌باشند، لذا موج آن محیط را به عنوان یک محیط متراکم می‌شناسد. بنابراین لازم است که مطالعات تفصیلی با کمک روش‌های مدل‌سازی پیشرفته از جمله روش‌های هوشمند در مدل‌سازی صورت گیرد تا بتوان روابط غیر خطی احتمالی موجود بین داده‌های TSP 203 و مقادیر واقعی RMR را به دست آورد. در فصل بعد خواهیم دید که چگونه با بکارگیری ابزار قدرتمند شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌توان بر این مشکل فائق آمد.

## فصل چهارم

کاربرد شبکه عصبی  
مصنوعی در جهت بهبود  
نتایج روش TSP 203

## ۴-۱- مقدمه

با توجه به نتایج فصل سوم چنین می‌توان نتیجه گرفت که روش TSP 203 در ارزیابی کیفیت مهندسی سنگ‌های مسیر پیشروی تونل در برخی زون‌ها ناکارآمد می‌باشد. از طرفی برای تخمین درست از مسیر پیشروی تونل نیاز به بدست آوردن روابط غیر خطی موجود بین خروجی‌های روش TSP 203 و نتایج واقعی می‌باشد. از این روی لازم است از روشی که قادر به تعیین این روابط می‌باشد بهره گرفت. از آنجایی که شبکه‌های عصبی مصنوعی در این زمینه بسیار موفق عمل می‌کنند، در این فصل به کاربرد این شبکه‌ها به منظور بهبود نتایج روش TSP 203 پرداخته می‌شود. در پیوست ج نیز کلیاتی در مورد شبکه‌های عصبی مصنوعی آورده شده است.

## ۴-۲- مراحل کار

کار با شبکه عصبی شامل مراحل زیر است (نیری ۱۳۸۵):

۱- جمع‌آوری و آماده سازی داده‌ها

۲- تعیین نوع شبکه مورد استفاده و معماری آن

۳- نحوه آموزش شبکه عصبی

۴- روش ارزیابی شبکه عصبی

فلوچارتی از مراحل کار در شکل (۴-۱) دیده می‌شود.

## ۴-۲-۱- جمع‌آوری و آماده سازی داده‌ها

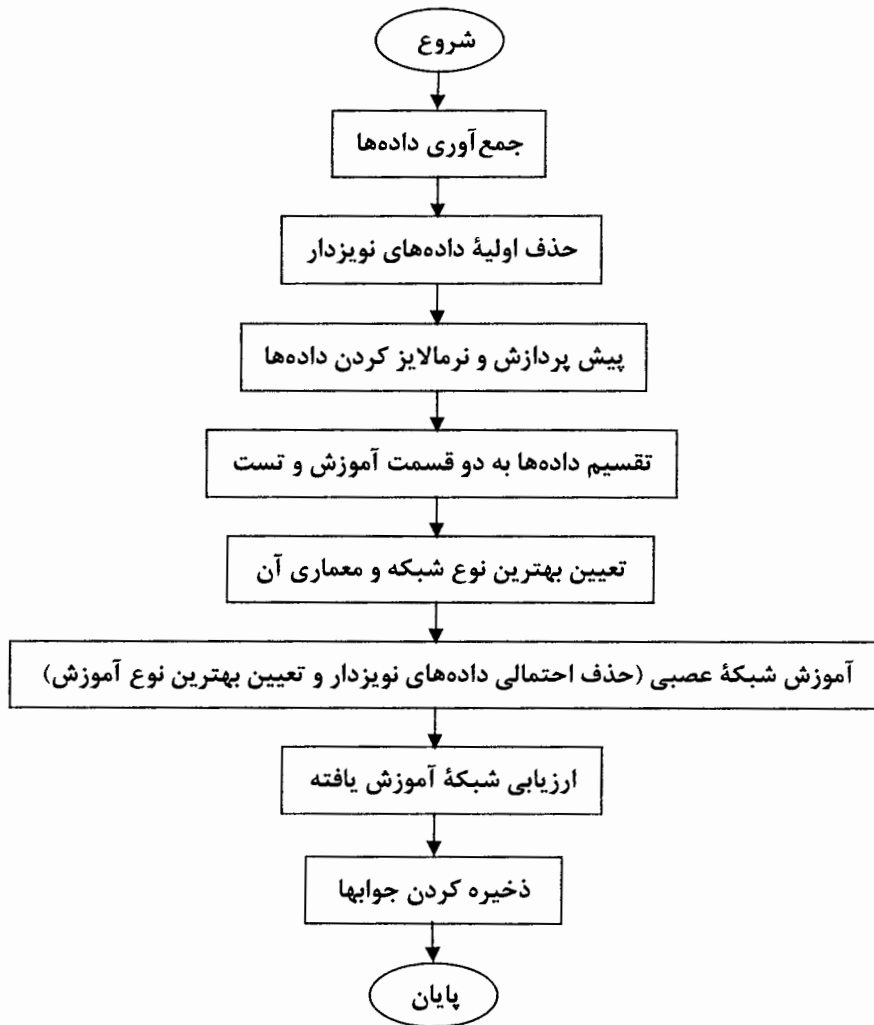
برای آموزش شبکه، نیاز به دو دسته داده می‌باشد: داده‌های ورودی شبکه و داده‌های خروجی شبکه. داده‌های ورودی در اصل خروجی‌های نرم‌افزار TSPwin می‌باشند که عبارتند از

سرعت موج طولی و عرضی ( $V_P$  و  $V_S$ )، نسبت این سرعت‌ها ( $V_P/V_S$ )، بزرگای (دامنه) موج رسیده به گیرنده‌ها ( $M$ )، نوع موج رسیده به گیرنده‌ها ( $WT$ )، عمق نسبت به سینه کار تونل که موج از آنجا بازتاب کرده است ( $X$ ) و جهت برداشتهای TSP 203 نسبت به وضعیت لایه‌بندی تونل ( $O$ ). از بین ۷ پارامتر مذکور، دو پارامتر  $WT$  و  $O$  به صورت کمی نمی‌باشند. لذا برای وارد کردن آنها به شبکه، باید به نوعی آنها را کمی کرد.  $WT$  سه حالت دارد:  $P$  یعنی موج طولی،  $S_H$  یعنی موج عرضی از نوع افقی و  $S_V$  یعنی موج عرضی از نوع قائم. به جای  $P$  عدد ۱، به جای  $S_H$  عدد ۲ و به جای  $S_V$  عدد ۳ قرار داده می‌شود. برای  $O$  نیز دو مقدار ۰ و ۱ در نظر گرفته می‌شود. برای برداشتهایی که با توجه به شکل ب-۱ از پیوست ب در جهت شیب لایه بندی عمومی تونل صورت گرفته‌اند، مقدار ۰ و برای برداشتهایی که در خلاف جهت شیب لایه بندی عمومی تونل صورت گرفته‌اند، مقدار ۱ در نظر گرفته می‌شود.

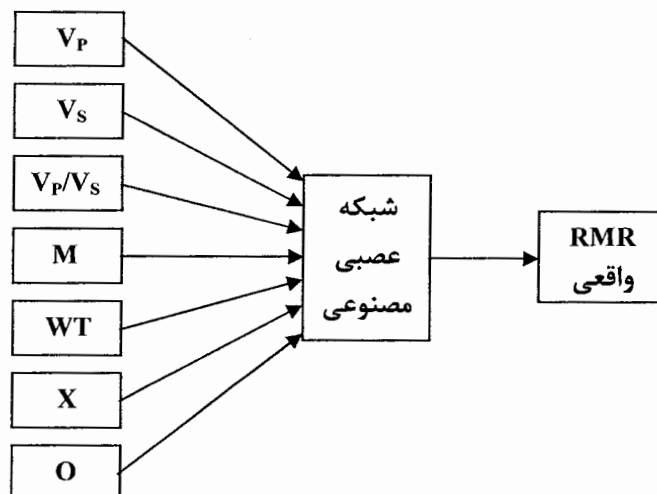
داده‌های خروجی نیز، نتایج واقعی  $RMR$  یا همان  $RMR_{Real}$  می‌باشند که چگونگی به دست آوردن آنها در فصل قبل توضیح داده شده است.

کل داده‌ها ۱۳۱ داده می‌باشند که در بین داده‌های خروجی، ۳ داده به عنوان نویز شناخته شدند و تصحیح گردیدند.

پس از مطالعه و بررسی زیاد، از شبکه‌ای با معماری آورده شده در شکل ۴-۲ استفاده شد.



شکل ۴-۱- مراحل کار با شبکه عصبی (نیری، ۱۳۸۵)



شکل ۴-۲- معماری شبکه عصبی مورد استفاده

## ۴-۲-۲- تعیین نوع شبکه مورد استفاده و معماری آن

پس از مرحله جمع‌آوری داده‌ها و آماده‌سازی آنها، باید نوع شبکه عصبی مورد استفاده را تعیین کرد. در مرحله تعیین نوع شبکه عصبی، شبکه‌های عصبی مختلفی وجود دارند که باید با بررسی آنها، بهترین شبکه را انتخاب کرد. چند نوع از شبکه‌های عصبی معمول عبارتند از (غضنفری و ارکات، ۱۳۸۳؛ منهاج، ۱۳۸۱؛ البرزی، ۱۳۸۰): شبکه پس انتشار خطا یا BP<sup>۱</sup>، شبکه کوهنن<sup>۲</sup>، شبکه آدلاین ADALINE<sup>۳</sup>، شبکه LVQ، شبکه هاپفیلد<sup>۴</sup>، شبکه هامینگ، شبکه تابع شعاع مدار (RBF)<sup>۵</sup>.

در این پایان‌نامه به منظور پیش‌بینی کیفیت سنگ‌های مسیر پیشروی تونل با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی، شبکه عصبی از نوع پرسپترون چند لایه با الگوریتم پس انتشار خطا (BP) بهترین گزینه به نظر می‌رسد. شبکه‌های BP از نوع با ناظر می‌باشند که برای تخمین بسیار مناسب هستند.

دلایل استفاده از شبکه BP بدین شرح می‌باشد:

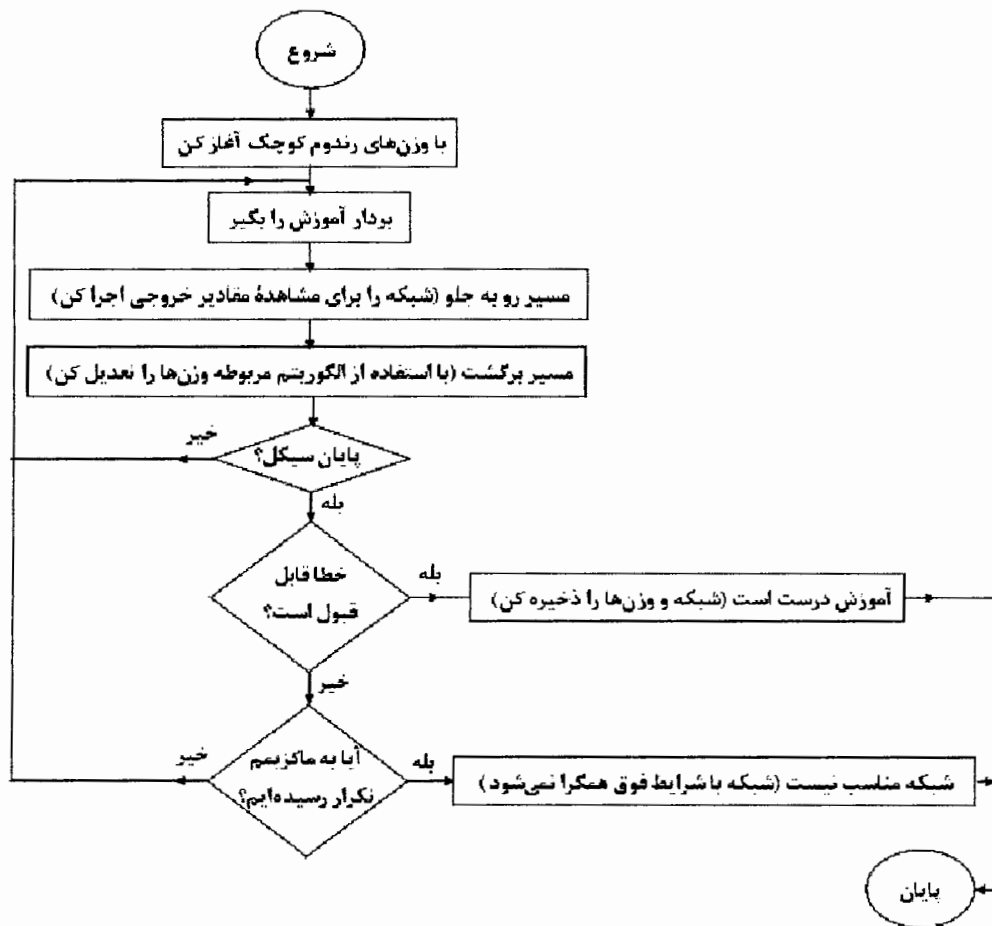
- ۱- هدف کار در این پایان‌نامه پیش‌بینی می‌باشد و شبکه BP در این زمینه قوی عمل می‌کند.
- ۲- یادگیری این شبکه با ناظر است و با توجه به داده‌های این مطالعه که شامل ورودی و خروجی می‌باشند، این شبکه مناسب است.

در شکل (۳-۴) روند اجرای شبکه BP به صورت فلوچارتی نشان داده شده است. لازم به ذکر است که در این پایان‌نامه برای آموزش شبکه عصبی از نرم افزار Matlab 7 استفاده شده است.

پس از انتخاب شبکه، مرحله بعد تعیین معماری شبکه و طراحی پارامترهای موثر بر آن می‌باشد. این پارامترها شامل تعداد نرون‌ها در لایه‌های ورودی و خروجی، تعداد لایه‌های پنهان، تعداد نرون‌ها در لایه‌های پنهان، انتخاب خطای مناسب برای داده‌ها، پیش پردازش داده‌ها، انتخاب

- 
- 1- Back Propagation
  - 2- Kohonen
  - 3- Adaptive Linear Element
  - 4- John Hopfield
  - 5- Radial bias function

روش نرمالایز کردن، تقسیم بندی درست داده‌ها به سریهای آموزش و آزمون و نوع روش آموزش و یادگیری می‌باشد.



شکل ۴-۳- روند اجرای شبکه BP (Pandya & Macy, 1996)

#### ۴-۲-۱- تعداد نرون‌ها در لایه ورودی و خروجی

تعداد گره‌ها (نرون‌ها) در لایه ورودی برابر با بعد (تعداد پارامترهای) ورودی یعنی ۷ عدد می‌باشد. تعداد گره‌ها در لایه خروجی نیز برابر با بعد خروجی یعنی ۱ می‌باشد.

#### ۴-۲-۲- تعداد لایه‌های پنهان

از آنجایی که تعداد داده‌ها زیاد نمی‌باشند و از لحاظ زمانی هم مشکلی وجود ندارد، و با توجه به بررسی‌های انجام شده و نوع الگوریتم آموزش انتخاب شده که توضیح داده خواهد شد، شبکه با سه لایه پنهان، بهترین حالت در نظر گرفته شد.

لازم به ذکر است که انتخاب تمامی پارامترهای موثر بر شبکه بر اساس ضرایب رگرسیون، خطای مطلق آموزش، خطای مطلق تست،  $RMS^F$  آموزش و  $RMS$  تست می‌باشد (طهماسبی، ۱۳۸۳).

#### ۴-۲-۲-۳- تعداد نرونها در لایه پنهان

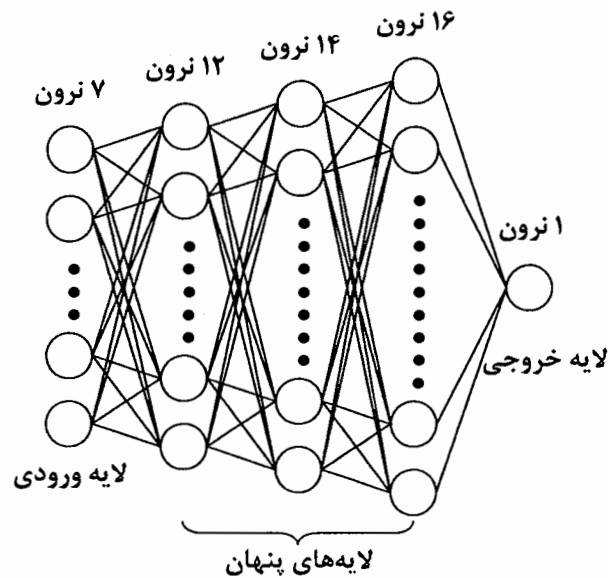
پس از تعیین تعداد لایه‌های پنهان، نوبت به تعیین تعداد نرون‌ها برای هر لایه می‌رسد. به این منظور تعداد نرونهای مختلف برای هر سه لایه پنهان آزمایش شد و در نهایت برای الگوریتم آموزش انتخاب شده، تعداد نرون‌ها به صورت زیر می‌باشند:

لایه پنهان اول: ۱۲ نرون

لایه پنهان دوم: ۱۴ نرون

لایه پنهان سوم: ۱۶ نرون

شکل ۴-۴ شبکه طراحی شده در مطالعه حاضر را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۴- شکل شماتیک از شبکه طراحی شده



## ۴-۲-۲-۴- انتخاب خطای مناسب برای داده‌ها

در شبکه‌های مورد بحث در این پایان‌نامه، خطای مناسب برای داده‌ها، یعنی هدف (Goal) مسأله، میزان  $0/01$  در نظر گرفته شده است.

## ۴-۲-۲-۵- تقسیم بندی داده‌ها

در کار با شبکه عصبی عموماً داده‌ها به دو قسمت آموزش<sup>۷</sup> و آزمون<sup>۸</sup> تقسیم بندی می‌شوند. داده‌های آموزش داده‌هایی هستند که در فرآیند آموزش شبکه مورد استفاده قرار می‌گیرند. داده‌های آزمون نیز برای کنترل کردن درستی شبکه مورد استفاده قرار می‌گیرند. این داده‌ها در طی آموزش شبکه استفاده نمی‌شوند، اما برای مقایسه میزان خطا استفاده می‌شوند. در این پایان‌نامه حدود  $70\%$  داده‌ها به عنوان داده‌های آموزش و حدود  $30\%$  داده‌ها به عنوان داده‌های آزمون در نظر گرفته شدند. برای این کار در نوشتن برنامه برای الگوریتم شبکه دو راه وجود داشت. راه اول آن است که به دلخواه قسمتی از داده‌ها به عنوان داده آموزش و بقیه به عنوان داده‌های آزمون انتخاب شوند. در ابتدا این کار صورت گرفت، ولی مشاهده شد که خطای داده‌های آزمون به شدت بالا رفت یا به عبارتی قدرت تعمیم شبکه پائین آمد. راه دیگر، انتخاب داده‌ها به صورت تصادفی می‌باشد، یعنی با اجرای برنامه به صورت تصادفی حدود  $70\%$  داده‌ها به داده‌های آموزش و حدود  $30\%$  آنها به داده‌های آزمون تقسیم شوند. در این حالت چون داده‌ها از قسمتهای مختلف مجموعه داده‌ها انتخاب می‌شوند، تمام خصوصیات را در بر می‌گیرند و خصوصیات داده‌ها به سمت مجموعه خاصی از داده‌ها میل پیدا نمی‌کند. نتایج این روش دسته‌بندی داده‌ها بسیار قابل قبول بود، لذا این روش انتخاب شد.

## ۴-۲-۲-۶- نرمالایز کردن داده‌ها

نرمالایز کردن داده‌ها روشی برای یکنواخت کردن و یک شکل کردن داده‌ها می‌باشد (نیری، ۱۳۸۵). در این پایان‌نامه شبکه مورد نظر یکبار با داده‌های نرمالایز نشده و یکبار هم با

7- Train

8- Test

داده‌های نرمالایز شده آموزش دید. در حالت اول خطا بالا رفت ولی با نرمالایز کردن داده‌ها خطا نیز بسیار پائین آمد. دلیل آن هم این است که در حالت نرمالایز شده، بازه تغییرات داده‌ها کوچکتر می‌باشد (بین ۰ و ۱ و یا بین -۱ و ۱). برای نرمالایز کردن داده‌ها، مقدار هر ستون بر ماکزیمم آن ستون تقسیم شد تا داده‌ها همگی بین صفر و ۱ قرارگیرند. با توجه به اینکه دامنه تغییرات داده‌ها پس از نرمالایز کردن بین ۰ و ۱ قرار گرفت، لذا می‌توان هم از تابع محرک تانژانتی و هم از تابع محرک لگاریتمی استفاده کرد. نتایج نشان دادند که تابع محرک تانژانتی شبکه را بهتر آموزش می‌دهد.

#### ۴-۲-۳- روشهای ارزیابی شبکه‌های عصبی مصنوعی

به طور کلی برای ارزیابی شبکه‌های عصبی روشهایی مثل مقدار جذر میانگین مربعات خطا (RMS)، ضریب رگرسیون (R) بین خروجی‌های مطلوب و خروجی‌های پیش بینی شده توسط شبکه، مقدار میانگین مربعات خطا (MSE) و همچنین میزان خطا (اختلاف) بین مقادیر مطلوب و مقادیر پیش‌بینی شده توسط شبکه و غیره وجود دارد. برای ارزیابی شبکه مورد بحث در این مطالعه از سه روش مقدار خطای موجود بین مقادیر واقعی و مقادیر پیش بینی شده، مقدار خطای RMS و ضریب رگرسیون استفاده شده است.

#### ۴-۲-۳-۱- خطای بین مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده توسط شبکه

در هر بار اجرای شبکه، شبکه مقداری را به عنوان خروجی می‌دهد و یک مقداری هم به عنوان خروجی واقعی وجود دارد که همان مقادیر داده‌های واقعی می‌باشند. میزان اختلاف بین مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده توسط شبکه، به عنوان خطای مطلق شبکه نامیده می‌شود.

#### ۴-۲-۳-۲- جذر میانگین مربعات خطا (RMS)

RMS به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$E_1 = |r_1 - p_1|, E_2 = |r_2 - p_2|, \dots, E_n = |r_n - p_n| \quad (1-4)$$

$$RMS = \frac{\sqrt{E_1^2 + E_2^2 + \dots + E_n^2}}{\sqrt{n}} \quad (2-4)$$

که در آن  $r$  مقادیر واقعی،  $p$  مقادیر پیش‌بینی شده توسط شبکه و  $n$  تعداد داده‌های موجود می‌باشد.

#### ۴-۳-۲-۳- ضریب رگرسیون (R)

ضریب رگرسیون (همبستگی) ضریبی است جهت اندازه‌گیری میزان خطی بودن رابطه بین دو متغیر، که هر کدام با واحدهای خود اندازه‌گیری شده‌اند. هر چه مقدار این ضریب به ۱ نزدیکتر باشد، بیانگر این موضوع است که مقادیر تخمین زده شده توسط شبکه به مقادیر واقعی نزدیکترند.

#### ۴-۲-۴- نحوه آموزش شبکه عصبی

برای آموزش شبکه عصبی ۱۱ روش کلی آموزش وجود دارد که در جدول (۱-۴) آورده شده است. در این مطالعه، ۱۱ روش فوق برای آموزش شبکه عصبی مورد استفاده قرار گرفت. نتایجی که از به کار بردن این ۱۱ روش به دست آمد، در جدول (۲-۴) مشاهده می‌شود. نتایج حاصل مقدار میانگین چند بار آموزش شبکه برای یک الگوریتم خاص می‌باشد.

جدول ۱-۴- روش‌های آموزش شبکه عصبی (Demuth and Beale, 2002)

روش	دستور در نرم افزار Matlab	توضیحات
Levenberg-Marquardt	Trainlm	سریعترین الگوریتم آموزشی برای شبکه های معمولی است. در اجرای این روش، وقتی که شبکه آموزشی بزرگ باشد، در حین انجام آموزش، حافظه <sup>۱۰</sup> مورد استفاده به تدریج کاهش می‌یابد.
Basic gradient descent	Traingd	این شبکه از لحاظ زمانی دیرتر به جواب می‌رسد و می‌تواند در روشهای نموی <sup>۱۱</sup> آموزش استفاده شود.

ادامه جدول ۴-۱

معمولاً از روش <code>traingd</code> سریعتر است و می‌توان از آن در روشهای نموی آموزش استفاده کرد.	<code>Traingdm</code>	Gradient descent with momentum
از روش <code>traingd</code> سریعتر است، اما فقط در آموزش دسته‌ای <sup>۱۲</sup> می‌توان از آن استفاده کرد.	<code>Traingdx</code>	Adaptive learning rate
دارای الگوریتم آموزش دسته ای ساده با همگرایی سریع است و کمترین حافظه را نیاز دارد.	<code>Trainrp</code>	Resilient back propagation
کمترین حافظه را در بین الگوریتمهای گرادیان توأم نیاز دارد.	<code>Traincgf</code>	Fletcher-Reeves conjugate gradient
حافظه بیشتری نسبت به روش <code>traincgf</code> نیاز دارد و عموماً سریعاً همگرا می‌شود.	<code>Traincgp</code>	Polak-Ribiere conjugate gradient
اندکی حافظه بیشتر از روش <code>traincgp</code> نیاز دارد و عموماً سریعاً همگرا می‌شود.	<code>Traincgb</code>	Powel-Beale conjugate gradient
تنها الگوریتم توأمی می‌باشد که احتیاج به جستجوی خطی ندارد.	<code>Trainscg</code>	Scaled conjugate gradient
احتیاج به حافظه برای تخمین ماتریس هسیان <sup>۱۳</sup> دارد و در هر تکرار محاسبات بیشتری نسبت به روش گرادیان توأم دارد، اما با تعداد تکرار کمتری همگرا می‌شود.	<code>trainbfg</code>	BFGS Quasi-Newton
حد واسطی بین دو روش گرادیان توأم و روش <code>trainbfg</code> می‌باشد.	<code>Trainoss</code>	One step secant

- 11- Incremental  
 12- Batch mod training  
 13- Hessian Matrix

جدول ۴-۲- نتایج الگوریتم‌های آموزش مختلف

No.	Algorithm	Optimum State	Performance	RMS <sub>train</sub>	RMS <sub>test</sub>
		تعداد نرون‌ها در هر لایه میانی			
1	Trainlm	12 14 16	0.5	0.028	0.33
2	Traingdx	8 10	0.06	0.137	0.22
3	Trainrp	15 17	0.05	0.094	0.24
4	Traincgf	8 10 12	0.02	0.077	0.21
5	Traincgp	13 15	0.02	0.1	0.2
6	Traincgb	13 15	0.02	0.094	0.2
7	Trainscg	12 14 16	0.012	0.064	0.17
8	Trainbfg	10 15 15	0.015	0.05	0.2
9	Trainoss	13 15	0.02	0.093	0.23
10	Traingd	8 8	0.04	0.188	0.25
11	Traingdm	8 8	0.03	0.156	0.23

در جدول فوق ستون دوم مربوط به الگوریتم‌های مختلف آموزش می‌باشد. برای هر الگوریتمی حالت‌های مختلف از نظر تعداد لایه میانی و تعداد نرون‌های هر لایه امتحان شدند. بهترین حالت آموزش برای هر الگوریتم از لحاظ تعداد لایه‌های میانی و تعداد نرون‌های مربوط به هر لایه در ستون سوم نمایش داده شده است. ستون چهارم بیانگر عملکرد شبکه است. برای تمام شبکه‌های آموزش داده شده، خطای ۰/۰۱ در نظر گرفته شده است. شبکه‌ای مناسب‌تر است که نزدیکترین مقدار به خطای فرض شده را داشته باشد. ستون‌های پنجم و ششم نیز به ترتیب RMS داده‌های آموزش و آزمون می‌باشند.

با توجه به نتایج جدول می‌توان گفت که الگوریتم Trainlm دارای نامناسب‌ترین عملکرد بوده و با اینکه دارای کمترین مقدار RMS<sub>train</sub> می‌باشد، ولی RMS<sub>test</sub> آن بالا می‌باشد. این موضوع

بیانگر این است که در حالت مذکور آموزش مبالغه‌ای اتفاق افتاده است. ما بقی الگوریتم‌ها تقریباً وضعیت مشابهی دارند ولی پس از آموزش‌های مکرر الگوریتم Trainscg انتخاب شد.

اگر به جدول ۴-۲ مراجعه شود، ملاحظه می‌شود که به غیر از الگوریتم آموزش Trainlm مابقی الگوریتم‌ها وضعیت تقریباً مشابهی دارند. به همین دلیل ممکن است در ابتدای امر این شبهه بوجود آید که می‌توان هر کدام از الگوریتم‌ها را انتخاب کرد. ولی در اینجا این سوال پیش می‌آید که میزان انحراف استاندارد نتایج حاصل چه مقدار است؟

با تکرار آموزش شبکه برای هر یک از حالات این نتیجه حاصل شد که به غیر از الگوریتم آموزش Trainscg، در بقیه حالت‌ها میزان انحراف استاندارد  $RMS_{test}$  زیاد می‌باشد. به عنوان مثال در الگوریتم آموزش Trainbfg کمترین مقدار  $RMS_{test}$ ، 0.07 و بیشترین مقدار آن هم 0.33 می‌باشد. این مقدار تغییرات زیاد (0.26) قابلیت اعتماد شبکه را پائین می‌آورد. در الگوریتم آموزش Trainscg مقدار انحراف استاندارد برای مقادیر  $RMS_{test}$  حدود 0.11 می‌باشد (جدول ۴-۳).

جدول ۴-۳- مینیمم و ماکزیمم مقادیر خطا برای الگوریتم آموزش Trainscg

$E_{train}$	$E_{test}$	$RMS_{train}$	$RMS_{test}$
0.0480	0.0776	0.0702	0.0957
0.0492	0.1315	0.0632	0.2066

در جدول مذکور E خطای مطلق بین مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده توسط شبکه می‌باشد. الگوریتم آموزش Trainscg دارای کمترین مقدار انحراف استاندارد در مقادیر خطا می‌باشد، لذا قابلیت اعتماد شبکه نیز در این حالت بالاتر از الگوریتم‌های دیگر است.

#### ۴-۳- شبکه عصبی آموزش داده شده و نتایج آن

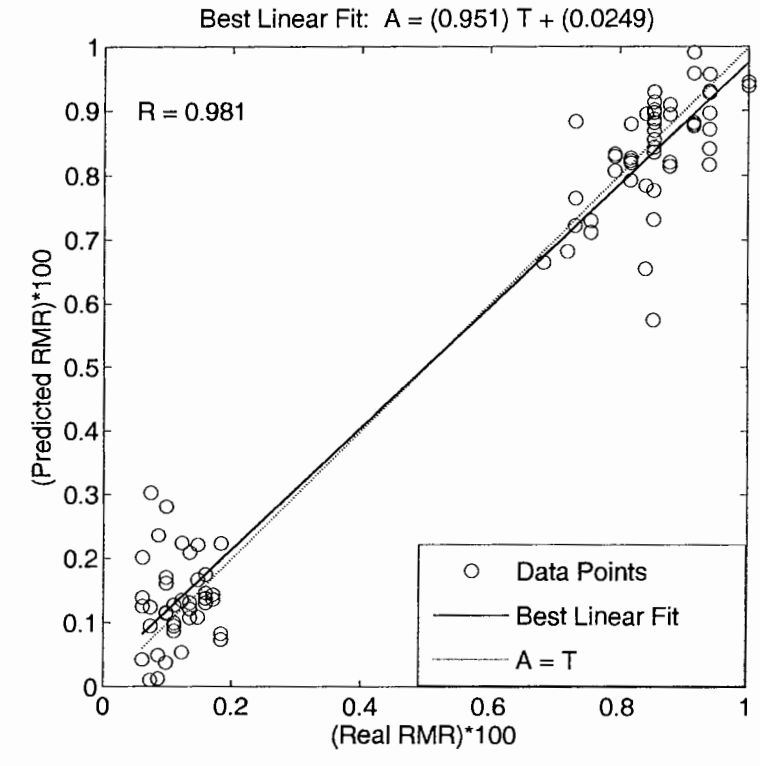
با توجه به مطالب ذکر شده، می‌توان مشخصات شبکه عصبی طراحی شده را به صورت

جدول ۴-۴ نشان داد.

جدول ۴-۴- مشخصات شبکه طراحی شده

مقدار	پارامتر
BP	شبکه
Trainscg	الگوریتم آموزش
3	تعداد لایه‌های پنهان
7	تعداد نرون‌های لایه ورودی
1	تعداد نرون‌های لایه خروجی
12	تعداد نرون‌های لایه پنهان اول
14	تعداد نرون‌های لایه پنهان دوم
16	تعداد نرون‌های لایه پنهان سوم
0.01	Trainparam.Goal
10000	Trainparam.Epochs
10	Trainparam.Show
0.8	Learning Rate

پس از آموزش شبکه با داده‌های آموزش (۷۰ درصد داده‌ها)، نتیجه به صورت شکل ۴-۵ می‌باشد. در این شکل،  $R$  ضریب رگرسیون بین نتایج  $RMR_{Real}$  و  $RMR$  پیش‌بینی شده توسط شبکه می‌باشد.  $A$ ، مقدار پیش‌بینی شده توسط شبکه و  $T$  مقدار واقعی می‌باشد. ضریب رگرسیون بسیار نزدیک به ۱ می‌باشد که بیانگر عملکرد خوب شبکه است. فاصله بین کمترین و بیشترین مقادیر که داده‌ای در آن بازه وجود ندارد، به علت نبود مقادیر  $20 < RMR < 60$  در تونل انتقال آب چشمه روزیه می‌باشد. به عبارت دیگر سنگ‌ها در مسیر پیشروی تونل یا مقاوم می‌باشند ( $RMR > 60$ ) و یا بسیار سست می‌باشند ( $RMR < 20$ ) و حالت متوسط از نظر کیفیت سنگ وجود ندارد.

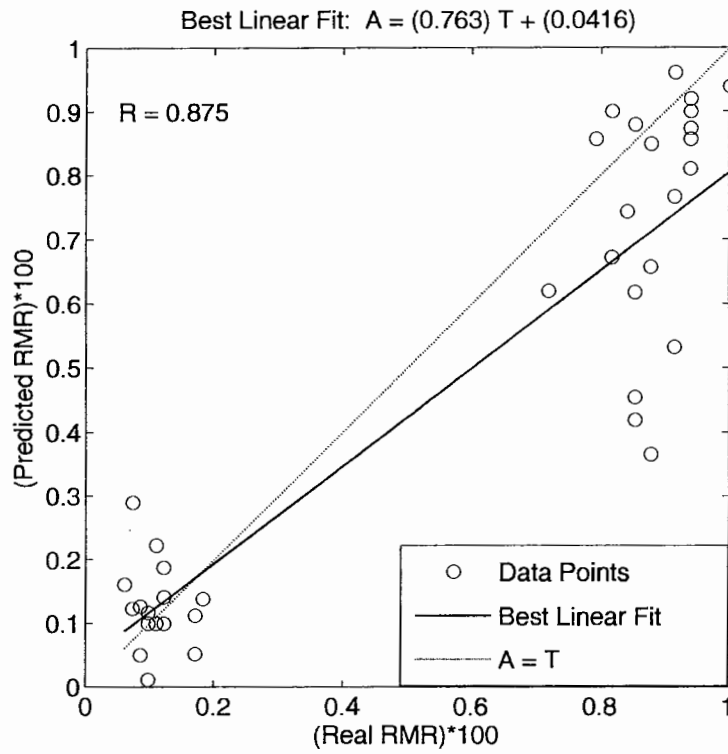


شکل ۴-۵- ضریب رگرسیون برای داده‌های آموزش

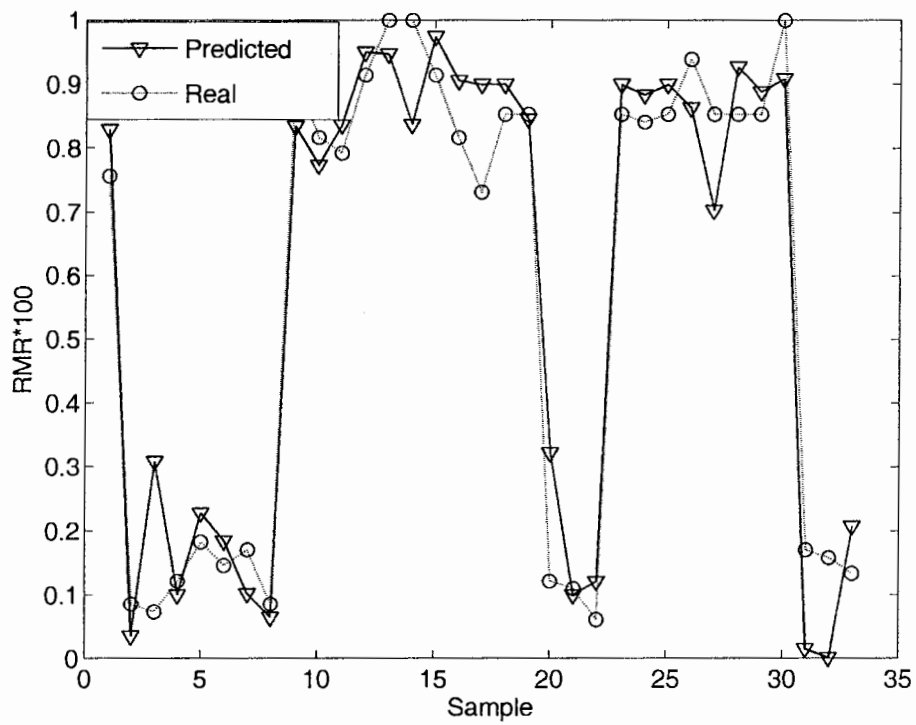
شبکه آموزش داده شده مذکور برای طبقه بندی داده‌های آزمون (۳۰ درصد داده‌ها) بکار گرفته شد. نتیجه در شکل ۴-۶ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، ضریب رگرسیون بالای 0.85 به دست آمده است. و این نشان می‌دهد که مقادیر RMR واقعی در داده‌های آزمون همبستگی بسیار خوبی با مقادیر پیش‌بینی شده توسط شبکه دارند.

از آنجایی که مشکل روش TSP 203 عدم کاربرد آن در پیش‌بینی زون‌های ضعیف و خرد شده می‌باشد، ایجاد یک ابزار پیش‌بینی کامپیوتری قابل اعتماد که برای یک مورد مطالعه واقعی به خوبی جواب بدهد، بسیار ارزشمند است. این موضوع در شکل ۴-۷ به وضوح نمایان است. شکل مذکور عملکرد بسیار عالی شبکه آموزش داده شده را با توجه به شکل ۳-۸ نشان می‌دهد.





شکل ۴-۶- ضریب رگرسیون برای داده‌های آزمون



شکل ۴-۷- مقایسه نتایج حاصل از شبکه و داده‌های واقعی برای سری داده‌های آزمون

مقادیر RMR واقعی که در این شکل با دایره‌های کوچک نشان داده شده‌اند، با توجه به شکل ۳-۸، با استفاده از روش TSP 203 پیش‌بینی نشدند، ولی نتایج شبکه عصبی BP که با مثلث‌های معکوس کوچک نشان داده شده است، بیانگر تشخیص خوب هر سه زون ضعیف می‌باشد.

پس از محاسبه مقادیر واقعی RMR با استفاده از شبکه عصبی، می‌توان مقادیر سرعت‌ها را تصحیح کرده و سپس مدول یانگ دینامیک واقعی ( $E_{dyn}$ ) و ضریب پواسون واقعی ( $\sigma$ ) لایه‌ها را محاسبه کرد. این مقادیر می‌توانند برای بررسی‌های ژئوتکنیکی در آینده مفید باشند. مقادیر مذکور با حل معادلات زیر به دست می‌آیند (Singh & Goel, 1999):

$$Q = 10^{\left(\frac{RMR-43}{13.3}\right)} \quad (3-4)$$

$$V_p = 1000 \times \log Q + 3500 \quad (4-4)$$

$$E_{dyn} = 25 \times \log Q \quad (3-4)$$

$$\sigma = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad (3-4)$$

در روابط بالا  $Q$  طبقه بندی بارتون و  $\sigma$  ضریب پواسون می‌باشد.

#### ۴-۴- کاربرد شبکه آموزش یافته برای تونل‌های دیگر

به منظور بررسی قابلیت کاربرد (تعمیم) شبکه حاصل برای دیگر تونل‌ها، تصمیم گرفته شد که یک سایت تونل‌سازی دیگر که دخالتی در آموزش شبکه نداشته است انتخاب شود و خروجی نرم‌افزار TSPwin حاصل از برداشت‌های TSP 203 در محل تونل مورد نظر، به عنوان داده‌های ورودی به شبکه داده شود و خروجی آن با مقادیر واقعی RMR مقایسه گردد. متأسفانه در هیچ یک از پروژه‌های تونل‌سازی که در آنها از روش TSP 203 برای پیش‌بینی مسیر پیشروی تونل استفاده شده است، پس از حفر تونل، نمونه‌گیری از سنگ‌های مسیر و انجام آزمایشات مکانیکی سنگ و همچنین تهیه نقشه زمین‌شناسی تونل صورت نگرفته است و یا دستیابی به آنها

امکان پذیر نمی‌باشد. ولی از آنجایی که پس از حفر تونل، مسیر پیشروی از نظر کیفی قابل تعیین می‌باشد و اطلاعات مربوط به آن نیز قابل دسترسی است، بنابراین چاره‌ای جز مقایسه کیفی نتایج شبکه و مسیر پیشروی تونل نمی‌باشد.

تونل انتخاب شده، تونل اکتشافی تونل‌های دوقلوی البرز می‌باشد. تونل‌های دوقلوی البرز از بزرگترین سازه‌های در حال احداث در مسیر ۱۲۰ کیلومتری آزاد راه تهران - شمال در زون البرز می‌باشند. ارتفاع این تونل‌ها ۲۵۴۰ متر از سطح دریا، طول هر یک ۶۳۰۰ متر و دارای روند تقریبی شمالی - جنوبی می‌باشند. تونل‌های مذکور از شمال گچسر شروع و تا پل زنگوله در جاده کرج - چالوس ادامه می‌یابند. تونل اکتشافی البرز نیز با سطح مقطع ۲۲ متر مربع، قطر ۵/۲ متر و طول ۶۵۳۵ متر با امتداد تقریبی شمالی - جنوبی در حال حفاری می‌باشد. این تونل در مسیر خود روباره متوسطی در حدود ۳۰۰-۴۰۰ متر را دارا است که در نواحی دهانه شمالی آن به ۸۵۰ متر نیز می‌رسد (شرکت زئوتک، ۱۳۸۵).

یک برداشت TSP 203 از کیلومتراژ ۳+۱۱۶ تا ۳+۲۹۸ انجام گرفت. تعداد داده‌های حاصل ۳۱ عدد می‌باشد (جدول ۴-۵). نتایج روش TSP 203 نشان می‌دهند که مقادیر RMR برای این بخش از تونل بیشتر از ۷۰ می‌باشند.

شکل ۴-۸ مقادیر RMR به دست آمده از روش TSP 203 و مقادیر پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی را برای ۳۱ نقطه مورد نظر نشان می‌دهد. شبکه عصبی بکار گرفته شده جهت پیش‌بینی مقادیر RMR، همان شبکه آموزش یافته با استفاده از داده‌های تونل چشمه روزبه می‌باشد.

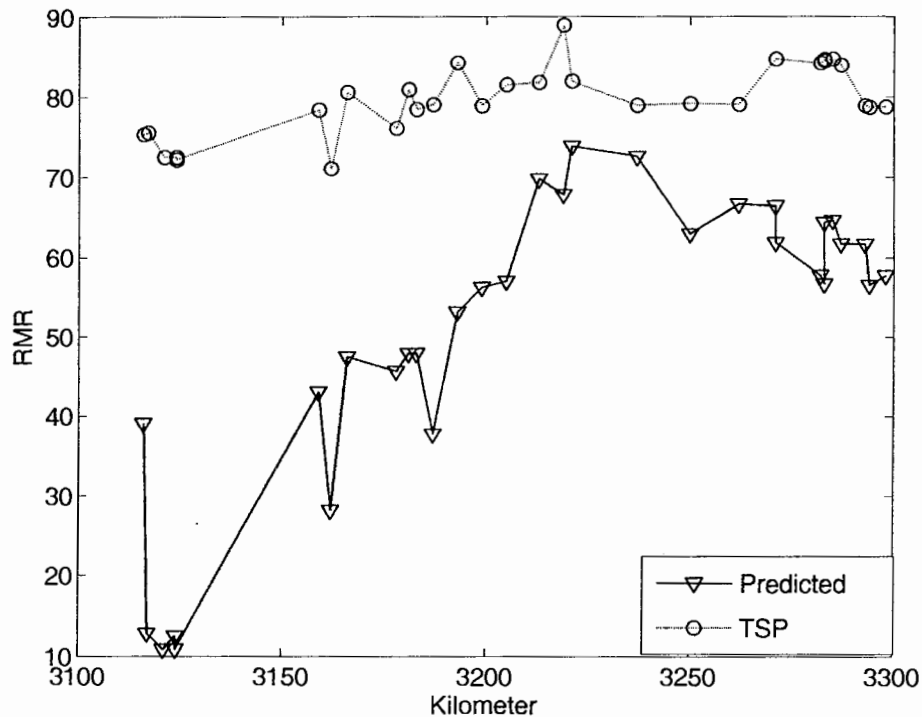
شکل ۴-۸ اختلاف زیادی بین نتایج روش TSP 203 و نتایج شبکه نشان می‌دهد. در این شکل، شبکه عصبی برای ۸۰ متر اول تونل مقادیر پائین RMR را پیش‌بینی کرده است که می‌تواند بیانگر یک زون ضعیف در این بخش از تونل باشد. جالب توجه است که پس از حفر تونل دو زون ناپایدار شناسایی شد. یکی از کیلومتراژ ۳+۱۱۰ تا ۳+۲۰۰ که به خوبی توسط شبکه شناسایی شده است و دیگری از کیلومتراژ ۳+۲۳۵ تا ۳+۲۵۰ که شبکه قادر به تشخیص این زون نبوده است.

جدول ۴-۵- نتایج برداشت TSP 203 در تونل البرز از کیلومتر ۳+۱۱۶ تا ۳+۲۹۸

<i>Distance</i>	$V_P$	$V_S$	$V_P/V_S$	$O$	$M$	$WT$	$X$
3116	5016	3077	1.63	0	9.20E-02	1	81.29
3117	5026	3028	1.66	0	4.21E-02	3	82.14
3121	4879	2887	1.69	0	2.35E-02	3	86.75
3124	4879	2957	1.65	0	3.03E-02	1	89.61
3124	4864	3021	1.61	0	4.28E-02	2	89.63
3159	5162	2790	1.85	0	5.82E-02	1	124.72
3162	4810	2797	1.72	0	1.74E-02	1	127.1
3166	5268	2817	1.87	0	3.32E-02	2	131.61
3178	5052	2937	1.72	0	1.58E-02	3	143.3
3181	5284	2887	1.83	0	1.76E-02	1	146.94
3183	5167	3004	1.72	0	2.13E-02	3	148.65
3187	5194	3110	1.67	0	7.96E-03	2	152.77
3193	5444	2930	1.86	0	4.06E-02	1	158.53
3199	5188	3050	1.7	0	1.29E-02	3	164.71
3205	5313	2952	1.80	0	3.43E-02	1	170.2
3213	5326	2848	1.87	0	8.40E-03	2	178.48
3219	5671	3080	1.84	0	3.19E-03	2	184.84
3221	5333	2807	1.90	0	2.63E-03	2	186.78
3237	5190	2932	1.77	0	1.83E-03	3	202.83
3250	5201	2989	1.74	0	2.13E-02	1	215.77
3262	5196	2764	1.88	0	2.12E-03	3	227.78
3271	5467	2939	1.86	0	1.04E-03	3	236.23
3271	5466	3003	1.82	0	1.71E-02	1	236.27
3282	5442	3040	1.79	0	2.07E-02	1	247.08
3283	5464	3019	1.81	0	2.14E-02	1	248.77
3283	5456	2965	1.84	0	9.25E-03	1	248.8
3285	5467	3004	1.82	0	1.10E-03	2	250.6
3287	5429	2890	1.88	0	6.58E-04	3	252.23
3293	5188	3052	1.70	0	1.18E-03	3	258.23
3294	5176	3027	1.71	0	1.95E-02	1	259.83
3298	5178	2861	1.81	0	2.16E-03	3	263.9

دلیل عدم تشخیص این زون می‌تواند کم بودن داده‌های آموزش شبکه باشد. به این صورت که امکان دارد دامنه تغییرات داده‌های ورودی برای دو تونل متفاوت بوده و داده‌های تونل البرز در بازه‌ای واقع باشند که برای شبکه آموزش یافته به وسیله داده‌های تونل چشمه روزیه نا آشنا باشند. از طرف دیگر تونل البرز کیلومترها دورتر و در شرایط زمین‌شناسی متفاوت نسبت به تونل چشمه روزیه واقع می‌باشد. از این رو با شبکه آموزش یافته داده‌های تونل چشمه روزیه نمی‌توان دقیقاً شرایط زمین‌شناسی و کیفیت مهندسی سنگ‌های مسیر پیش‌روی تونل البرز را

پیش‌بینی کرد. به همین خاطر اختلاف بین نتایج پیش‌بینی شده توسط شبکه و شرایط واقعی وجود دارد.



شکل ۴-۸- مقادیر RMR حاصل از روش TSP 203 (دایره‌های کوچک) و شبکه عصبی (مثلث‌های کوچک) در تونل البرز.

به هر حال چنین به نظر می‌رسد که در صورت وجود داده‌های مناسب از محل سایت‌های مختلف تونل‌سازی و آموزش یک شبکه مناسب برای داده‌های مذکور، می‌توان یک ابزار پیش‌بینی کارآمد برای ارزیابی مسیر پیشروی تونل‌ها ایجاد کرد.

## فصل پنجم

نتیجه‌گیری و پیشنهاد

### جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

به منظور تعیین قابلیت کاربرد روش TSP 203، نتایج روش مذکور در تونل چشمه روزبه با بهره‌گیری از یکسری روابط به طبقه‌بندی مهندسی توده سنگ RMR تبدیل شدند تا نتایج به دست آمده از این روش با نتایج واقعی RMR حاصل از مطالعات زمین‌شناسی و آزمایشات مکانیک سنگی انجام شده بر روی نمونه‌های اخذ شده پس از حفر تونل، قابل مقایسه باشند. بررسی نتایج حاصل نشان داد که این روش در تعیین کیفیت مهندسی سنگ‌های مسیر حفر تونل در مواردی که سنگ‌ها از کیفیت خوبی برخوردار باشند و یا در صورت وجود خرد شدگی، حاوی آب در بین درز و ترک‌ها باشند، درست عمل می‌کند. ولی در مواردی که سنگ‌ها خرد شده، به شدت تحت فشار و فاقد آب در بین درز و ترک‌ها باشند، نتایج با شرایط واقعی اختلاف زیادی دارد که این امر ممکن است به خاطر وجود ارتباط غیر خطی حاکم بر سرعت امواج و پارامترهای مهندسی سنگ‌ها باشد. به همین خاطر برای تکمیل و تصحیح نتایج به دست آمده سعی شده است تا از روش هوشمند شبکه‌های عصبی مصنوعی برای رفع بعضی از نواقص و به دست آوردن نتایج واقعی‌تر استفاده شود.

پس از بررسی‌های فراوان نهایتاً شبکه‌ای از نوع پرسپترون چند لایه با الگوریتم پس انتشار خطا (BP) انتخاب شد. شبکه دارای سه لایه پنهان و الگوریتم آموزش Trainscg می‌باشد. تعداد نرون‌های لایه ورودی و خروجی برابر با بعد آنها به ترتیب ۷ و ۱ نرون می‌باشند. لایه‌های پنهان نیز به ترتیب ۱۲، ۱۴ و ۱۶ نرون در خود جای داده‌اند. شبکه از سرعت امواج طولی و عرضی، نسبت سرعت‌ها، جهت برداشت‌های TSP 203 نسبت به وضعیت لایه‌بندی عمومی تونل، بزرگای موج، نوع موج رسیده به گیرنده و عمق مورد تخمین نسبت به سینه کار تونل، به عنوان ورودی‌های سیستم استفاده کرده است. سپس با آموزش لازم به جستجوی روابط غیر خطی موجود بین

ورودی‌ها و خروجی مطلوب که در این مورد مقدار واقعی RMR می‌باشد، پرداخته و از آن برای پیش‌بینی کیفیت مهندسی سنگ‌های مسیر پیش‌روی تونل‌های چشمه روزیه و البرز استفاده شده است.

آموزش شبکه که توسط داده‌های تونل چشمه روزیه صورت گرفت، نشان دهنده همبستگی عالی بین مقادیر RMR واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده توسط شبکه می‌باشد. اعمال شبکه بر روی داده‌های آزمون تونل مذکور نیز نشان داد که شبکه از قابلیت بالایی در تخمین زون‌های ضعیف برخوردار است.

شبکه آموزش یافته با کمک داده‌های تونل چشمه روزیه، بر روی داده‌های واقعی تونلی دیگر (تونل راه البرز) که در فاصله بسیار زیادی نسبت به تونل چشمه روزیه قرار دارد و در آموزش شبکه دخالت نداشته است، به کار گرفته شد. زون مورد تخمین ۱۸۲ متر و از کیلومتر ۱۱۶+۳ تا ۲۹۸+۳ می‌باشد. روش TSP 203 کل مسیر ۱۸۲ متری مورد نظر را از لحاظ کیفیت مهندسی سنگ‌های مسیر پیش‌روی تونل، مناسب ارزیابی کرده است. نتایج شبکه عصبی حاکی از وجود یک زون ضعیف در ۸۰ متر اول بود. شبکه همچنین کیفیت مهندسی سنگ‌های ۱۰۰ متر مابقی تونل را نیز خوب ارزیابی کرد. پس از حفر تونل دو زون ضعیف و خرد شده شناسایی شدند: یکی در ۹۰ متر اول که با دقت بسیار بالایی توسط شبکه پیش‌بینی شده است و دیگری در کیلومتر ۲۳۵+۳ الی ۲۵۰+۳ که شبکه قادر به شناسایی آن نبوده است. دلایل زیر می‌توانند توجیه کننده عدم قابلیت شبکه برای اعماق زیاد باشند:

- شرایط زمین‌شناسی دو تونل ذکر شده در این مطالعه بسیار متفاوت می‌باشند.
- امکان دارد دامنه تغییرات داده‌های ورودی برای دو تونل متفاوت باشد و داده‌های تونل البرز در بازه‌ای واقع باشند که برای شبکه آموزش یافته به وسیله داده‌های تونل چشمه روزیه نا آشنا باشند.
- تعداد داده‌های آموزش (۷۰ درصد از ۱۳۱ داده) برای در نظر گرفتن تمامی حالات و شرایط ممکن، کافی نمی‌باشند.



## پیشنهادهای

- ۱- پیشنهاد می‌شود که تعداد کافی نمونه از بخش حفر شده تونل دوم برداشت شود و سپس با انجام آزمایشات فیزیکی و مکانیکی لازم، از نتایج آنها برای محاسبه مقادیر واقعی RMR برای آن بخش از تونل استفاده شود.
- ۲- با تلفیق داده‌های دو تونل مذکور و ایجاد یک سری داده‌های جدید، شبکه جدیدی آموزش داده شود. این عمل قابلیت تعمیم شبکه را بالا برده و باعث افزایش صحت شبکه در پیش‌بینی بخش باقی‌مانده از تونل خواهد شد.
- ۳- همچنین پیشنهاد می‌گردد برای تمامی تونل‌هایی که با روش TSP 203 ارزیابی می‌گردند، برای بخشی از تونل با صرف هزینه‌ای اندک عمل نمونه برداری و محاسبه RMR واقعی صورت گرفته و با آموزش شبکه‌ای مشابه، مابقی مسیر پیشروی تونل با دقت بالایی پیش‌بینی گردد. با انجام این عمل همچنین می‌توان در آینده یک بانک اطلاعاتی ایجاد کرده و کلیه تونل‌های در دست احداث در هر نقطه از کشور را با دقت مناسبی ارزیابی نمود.

منابع

## فهرست منابع

- اصانلو، م.، (۱۳۷۵)، روش های حفاری، چاپ اول، انتشارات مرکز نشر صدا، تهران، ۴۸۶ ص.
- البرزی، م.، (۱۳۸۰)، آشنایی با شبکه های عصبی، چاپ اول، موسسه انتشارات علمی دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ۱۳۷ ص.
- پیروز، الف.، (۱۳۸۴)، طراحی پروژه های ژئوفیزیکی، جزوه آموزشی، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- زمردیان، ح.، حاجب حسینی، ح.، (۱۳۷۵)، ژئوفیزیک کاربردی، جلد اول، چاپ دوم، انتشارات دانشگاه تهران، تهران، ۶۸۷ ص.
- شرکت ژئوتک، (۱۳۸۳)، گزارش نهایی تونل انتقال آب چشمه روزیه به سمنان.
- شرکت ژئوتک، (۱۳۸۵)، گزارش نهایی تونل البرز - آزادراه تهران-شمال.
- طهماسبی، ف.، (۱۳۸۳)، مدل سازی معکوس دو بعدی داده های مگنتوتلوریک با استفاده از شبکه های عصبی مصنوعی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- علی مرادی، الف.، (۱۳۸۵)، کاربرد روش *TSP* به عنوان یک روش غیر مخرب در تونل سازی، سمینار کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- غضنفری، م. و ارکات، ج.، (۱۳۸۳)، شبکه های عصبی (اصول و کارکردها)، مرکز انتشارات دانشگاه علم و صنعت.
- مدنی، ح.، (۱۳۷۷)، تونلسازی، جلد اول، چاپ دوم، انتشارات دانشگاه صنعتی امیر کبیر.
- مرادزاده، ع.، (۱۳۷۷)، مکانیک سنگ، جزوه آموزشی، انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود.
- منهاج، م. ب.، (۱۳۸۱)، مبانی شبکه های عصبی، جلد اول، چاپ سوم، مرکز نشر دانشگاهی دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ۷۱۵ ص.

مهندسین مشاور مهتاب قدس، (۱۳۸۵)، نقشه‌های زمین‌شناسی تونل انتقال آب چشمه روزیه به سمنان.

نیری، ن.، (۱۳۸۵)، تحلیل پایداری فضا‌های زیرزمینی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود.

Alimoradi, A., Moradzadeh, A., Naderi, R., Zad Salehi, M., Etemadi, A., (2007), *Prediction of Geological Hazardous Zones in Front of a Tunnel Face Using TSP-203 and Artificial Neural Networks*, Journal of Tunneling and Underground Space Technology, Submitted.

Alvarez, G. M., (2000), *Nero-Fuzzy modeling in engineering geology, applications to mechanical rock excavation, rock strength estimation, and geological mapping* Balkema, Rotterdam, 244p.

Amberg Measuring Technique, (2001a), *TSP Win, Processing & Evaluation Software, Manual Version 1.1*, Amberg Co., Switzerland, 52p.

Amberg Measuring Technique, (2001b), *TSP Win Software, Version 1.1*, Amberg Co., Switzerland.

Amberg Measuring Technique, (2002a), *TSP 203 processing*, Amberg Co., Switzerland.

Amberg Measuring Technique, (2002b), *TSP 203 Training*, Amberg Co., Switzerland.

Bickel, J. O., Kuesel, T.R., (1996), *Tunnel Engineering Handbook*, Chapman & Hall, New York, 544p.

Bieniawski, Z. T., (1989), *Engineering Rock Mass Classification*, John Wiley & sons, Rotterdam, 251p.

Borm, G., Giese, R., Klose, C., Mielitz, S., (2003), *Integrated Seismic Imaging System for the Geological Prediction Ahead of Underground Construction*, EAGE 56<sup>th</sup> Conference & Exhibition.

Bosshard, M., (2004), *Herrenknecht Theme Talks: Top Experts Discussed Trends of Tunneling*, Zeitschrift Tunnel 2004.

Demuth, H., Beale, M., (2002), *Neural Network Toolbox for Use with MATLAB, Version 3.0*, 742p.

Geotech Co., (2004), *TSP 203: Case Histories*, Amberg Co., Switzerland, 26p.

Klinghoffer, O., (2002), *Non-Destructive Testing (NDT) and Examination (NDE)*. In: Concrete Inspection and Analysis, Force Technology, Denmark.

Klose, C. D., Loew, S., (2004), *Engineering Geological Rock Mass Characterization of Granitic Gneisses Based on Seismic In-situ Measurements during Tunnel Excavations*, EUROCK 2004 & 53<sup>rd</sup> Geomechanics Colloquium.

Newman, P., (1973), *Divergence effects in a layered earth. Geophysics*.

Newman, P., Mahoney, J.T., (1973), *Patterns-with a pinch of salt. Geophysics Prospecting*.

Pandya, A. S., Macy, R. B., (1996), *Pattern recognition with Neural networks in C++*, CRC press, Inc., Boca Raton, Fla., 410p.

Principe, J. C., Euliano, N. R., and Lefebvre, W. C., (1999), *Neural and Adaptive Systems: fundamentals through simulations*. John Whily & sons, New York, 656p.

Rutledge, J. C., Preston, R. L., (1978), *Experience with Engineering Classification in Coal Mine Roadways*, Proc. Int. Tunneling Sym., Tokyo, pp. A3.1-A3.7

Singh, B., Goel, R.K., (1999), *Rock Mass Classification: A Practical Approach in Civil Engineering*, Elsevier, Amsterdam, 267p.

Zoeppritz, K., (1919), *Über reflexion und durchgang seismischer wellen durch Unstetigkeitsflächen. Berlin, Über Erdbebenwellen VII B, Nachrichten der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, math-phys*.

پیوست‌ها

پوست الف

جداول

جدول الف-۱- روابط تجربی محاسبه دانسیته

نوع سنگ	Vp (m/s)
آذرین درونی	$\rho = \frac{V_p + 6730}{4360}$
آذرین بیرونی	$\rho = \frac{V_p + 2370}{2810}$
دگرگونی	$\rho = \frac{V_p + 6930}{4410}$
رسوبی	$\rho = 1.741 \cdot \left[ \frac{V_p}{1000} \right]^{0.25}$

جدول الف-۲- روابط مکانیک سنگی

مدول یانگ دینامیک	ضریب پواسون	مدول حجمی	مدول برشی	ثابت لامه
E	$\sigma$	k	$\mu$	$\lambda$
$\rho V_s^2 \left( \frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{V_p^2 - V_s^2} \right)$	$\frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)}$	$\rho \left( V_p^2 - \frac{4}{3} V_s^2 \right)$	$\rho V_s^2$	$\rho(V_p^2 - 2V_s^2)$



جدول الف-۳- پارامترهای مکانیکی سنگ به دست آمده از نرم افزار TSP Win - ورودی تونل از کیلومتر ۱۵۲ تا ۱۰۱

۱۰۴۸۹

No	RCV	Wave Type	Inters. TM (m)	Velocity (m/s)	Vp Vs Ratio	Poisson	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Shear Modulus (GPa)	Lambda (GPa)	Bulk Modulus (GPa)	F Dyn (GPa)	F Stat (GPa)
1	2	SV	1152.45	3310	1.69	0.23	2.8	31	26	47	80	61
2	1	SV	1163.02	3436	1.77	0.27	2.85	34	38	61	89	70
3	1	SH	1166.08	3367	1.81	0.28	2.84	32	41	62	85	66
4	1	SH	1169.25	3379	1.79	0.27	2.84	32	40	61	86	67
5	2	SH	1173.91	3257	1.72	0.25	2.79	30	28	48	78	59
6	2	P	1176.29	5725	1.74	0.25	2.8	30	31	51	80	61
7	2	P	1181.6	5641	1.72	0.24	2.8	30	29	49	79	60
8	1	SH	1183.12	3392	1.8	0.28	2.84	33	40	62	87	68
9	2	SV	1185.64	3306	1.69	0.23	2.8	31	27	47	80	61
10	1	SV	1185.88	3431	1.77	0.27	2.84	33	38	61	89	69
11	1	SH	1187.06	3358	1.8	0.28	2.83	32	40	61	85	66
12	2	SV	1188.05	3278	1.74	0.26	2.8	30	31	51	79	60
13	1	P	1188.83	6162	1.79	0.27	2.85	34	41	63	89	70
14	1	SV	1189.8	3425	1.78	0.27	2.84	33	39	61	88	69
15	1	SH	1194.24	3369	1.8	0.28	2.83	32	40	61	85	66
16	2	SH	1195.83	3271	1.75	0.26	2.8	30	32	52	79	60
17	2	SV	1197.29	3291	1.74	0.25	2.8	30	31	51	80	61
18	1	SV	1198.29	3443	1.76	0.26	2.85	34	38	60	89	70
19	2	SV	1198.9	3311	1.69	0.23	2.8	31	26	47	80	61
20	2	SH	1205.35	3268	1.75	0.26	2.8	30	32	52	79	60
21	1	SV	1205.96	3415	1.78	0.27	2.84	33	39	61	88	69
22	1	P	1206.28	6080	1.79	0.27	2.84	33	39	61	87	68
23	2	P	1207.18	5718	1.75	0.26	2.8	30	32	52	79	60
24	1	SH	1208.18	3378	1.8	0.28	2.84	32	40	62	86	67
25	1	SV	1212.98	3439	1.77	0.26	2.84	34	38	60	89	70
26	2	P	1213.31	5605	1.71	0.24	2.79	30	27	48	79	60
27	1	SH	1217.38	3345	1.82	0.28	2.83	32	41	62	84	65
28	1	SH	1218.14	3388	1.82	0.28	2.84	33	42	64	87	68
29	1	SV	1219.84	3523	1.75	0.26	2.86	36	38	62	94	74
30	1	SV	1223.83	3545	1.71	0.24	2.86	36	34	58	94	75
31	1	P	1230.05	6074	1.76	0.26	2.85	34	37	60	89	70
32	2	P	1234.45	5645	1.73	0.25	2.79	30	30	49	78	59
33	1	P	1235.17	6075	1.73	0.25	2.85	35	35	59	92	73
34	1	SH	1236.62	3553	1.71	0.24	2.86	36	34	58	94	75
35	1	SV	1238.17	3476	1.75	0.26	2.85	34	37	60	91	71
36	1	SV	1240.91	3503	1.74	0.25	2.86	35	36	60	92	73
37	1	SH	1241.12	3381	1.78	0.27	2.83	32	38	59	86	67
38	2	P	1243.41	5611	1.71	0.24	2.8	30	28	48	79	60
39	1	P	1244.42	6122	1.73	0.25	2.86	36	35	59	94	75
40	2	P	1245.98	5749	1.74	0.25	2.81	31	31	52	81	62
41	2	P	1249.59	5619	1.72	0.25	2.79	30	29	48	78	59
42	1	SV	1252.98	3505	1.74	0.25	2.85	35	36	59	92	73
43	1	P	1253.73	6087	1.73	0.25	2.86	36	35	59	93	74
44	2	SH	1255.38	3267	1.76	0.26	2.8	30	32	52	79	60
45	1	SH	1256.04	3365	1.57	0.16	2.79	32	14	35	80	61
46	1	P	1268.42	6082	1.77	0.27	2.84	34	38	60	89	69
47	1	SV	1268.66	3489	1.69	0.23	2.84	35	29	52	90	71
48	2	SH	1269.92	3295	1.74	0.25	2.8	30	31	52	80	61
49	1	SH	1271.06	3368	1.75	0.26	2.82	32	34	55	84	65
50	2	SH	1271.74	3368	1.72	0.25	2.82	32	31	52	84	65

ادامة جدول الف-٣

No	RCV	Wave Type	Inters. TM (m)	Velocity (m/s)	Vp Vs Ratio	Poisson	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Shear Modulus (GPa)	Lambda (GPa)	Bulk Modulus (GPa)	F Dyn. (GPa)	E Stat. (GPa)
51	2	SV	1271.78	3312	1.74	0.25	2.81	31	32	52	81	62
52	1	SH	1273.93	3449	1.75	0.26	2.84	34	36	58	89	70
53	2	SV	1273.94	3344	1.72	0.24	2.81	31	30	51	82	63
54	1	SV	1273.98	3503	1.74	0.25	2.85	35	36	59	92	73
55	1	P	1275.69	5801	1.66	0.22	2.84	35	26	49	90	70
56	1	SV	1278.52	3503	1.74	0.26	2.86	35	37	60	92	73
57	2	SV	1285.14	3295	1.74	0.25	2.8	30	31	52	80	61
58	2	SH	1285.94	3354	1.7	0.24	2.81	32	29	50	83	64
59	2	SV	1287.06	3269	1.75	0.26	2.8	30	32	52	79	60
60	2	SH	1287.61	3250	1.72	0.25	2.79	29	29	48	77	59
61	1	P	1288.71	6027	1.72	0.25	2.85	35	34	57	92	72
62	2	SV	1296.5	3194	1.79	0.27	2.79	28	34	53	75	57
63	2	SH	1298.88	3271	1.75	0.26	2.8	30	32	52	79	60
64	2	SV	1306.21	3335	1.73	0.25	2.81	31	31	52	82	63
65	1	P	1315.65	6043	1.72	0.25	2.85	35	34	57	92	73
66	1	SH	1323.22	3494	1.73	0.25	2.85	35	35	58	91	72
67	1	P	1323.63	5966	1.76	0.26	2.83	32	36	58	85	66
68	1	P	1329.3	6053	1.73	0.25	2.85	35	34	58	92	73
69	1	SH	1350.84	3485	1.72	0.25	2.85	35	33	56	91	71
70	1	P	1353.8	5993	1.75	0.26	2.84	33	36	58	87	68
71	2	P	1383.86	5825	1.72	0.24	2.82	32	31	53	85	66
72	1	P	1398.95	6068	1.73	0.25	2.85	35	35	58	92	73
73	2	SH	1402.03	3301	1.75	0.26	2.81	31	33	53	81	62
74	2	P	1410.22	5690	1.63	0.2	2.83	34	23	46	89	69
75	2	P	1411.83	5575	1.63	0.2	2.81	33	21	43	85	66
76	2	P	1414.94	5562	1.65	0.21	2.8	32	23	44	82	63
77	2	P	1418.78	5732	1.69	0.23	2.82	32	28	50	84	65
78	2	SV	1436.69	3418	1.68	0.23	2.82	33	27	49	86	67
79	2	SH	1462.84	3396	1.7	0.24	2.82	33	29	51	85	66
80	2	SV	1464.37	3358	1.72	0.25	2.82	32	31	52	83	64
81	2	SV	1468.74	3204	1.69	0.23	2.77	28	24	43	74	56
82	2	SH	1475.92	3137	1.67	0.22	2.75	27	22	40	70	52
83	2	SH	1489.18	3137	1.67	0.22	2.75	27	22	40	70	52

جدول الف-۴- پارامترهای مکانیکی سنگ به دست آمده از نرم افزار TSP Win - خروجی تونل از کیلومتر ۱+۸۳۶ تا

۱+۴۷۳

No	RCV	Wave Type	Iners. TMI (m)	Velocity (m/s)	Vp Vs Ratio	Poisson	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Shear Modulus (GPa)	Lambda (GPa)	Bulk Modulus (GPa)	E Dyn. (GPa)	E Stat. (GPa)
1	1	SV	1836.01	2945	1.74	0.25	2.71	23	24	40	62	44
2	1	SV	1832.45	2930	1.74	0.25	2.7	23	24	39	61	43
3	1	SH	1825.39	2967	1.73	0.25	2.71	24	23	39	63	45
4	1	P	1824.93	5130	1.73	0.25	2.71	24	24	40	62	44
5	1	SH	1820.4	2968	1.72	0.25	2.71	24	23	39	63	45
6	1	P	1817.13	5112	1.74	0.25	2.71	23	24	40	61	43
7	1	SV	1815.85	2925	1.76	0.26	2.71	23	25	41	61	43
8	2	P	1813.74	4809	1.73	0.25	2.66	21	20	34	54	36
9	1	SV	1813.07	2912	1.75	0.26	2.7	23	24	39	60	42
10	1	SH	1812.88	2968	1.72	0.24	2.71	24	23	39	63	45
11	2	P	1812.77	4808	1.73	0.25	2.66	21	20	34	54	36
12	2	P	1808.13	4799	1.73	0.25	2.66	20	20	34	54	36
13	2	P	1802.43	4698	1.7	0.24	2.65	20	18	32	53	35
14	2	P	1800.84	4799	1.73	0.25	2.66	20	20	34	54	36
15	1	SV	1795.5	2864	1.77	0.27	2.69	22	25	40	58	41
16	1	P	1794.49	5200	1.77	0.26	2.71	24	26	42	62	44
17	1	P	1791.59	5093	1.74	0.25	2.7	23	24	39	61	43
18	1	P	1787.84	5059	1.71	0.24	2.71	24	22	38	62	44
19	2	P	1784.42	4809	1.73	0.25	2.66	21	20	34	54	36
20	1	SH	1784.31	2973	1.7	0.24	2.71	24	21	37	62	45
21	1	SV	1783.75	2932	1.73	0.25	2.7	23	23	39	61	43
22	1	P	1774.45	5171	1.74	0.25	2.72	24	24	41	63	45
23	1	P	1763.21	5053	1.69	0.23	2.71	24	21	37	63	45
24	2	P	1746.02	4806	1.73	0.25	2.66	20	20	34	54	36
25	1	P	1736.32	5020	1.7	0.24	2.7	24	21	37	62	44
26	2	P	1728.09	4776	1.73	0.25	2.65	20	20	33	53	36
27	1	P	1727.57	5119	1.72	0.25	2.71	24	23	39	63	45
28	2	SV	1695.39	2736	1.7	0.24	2.64	20	18	31	52	34
29	2	SH	1693.51	2765	1.69	0.23	2.65	20	17	31	53	35
30	2	SV	1687.49	2730	1.71	0.24	2.64	20	18	31	51	34
31	1	SH	1687.04	3015	1.85	0.29	2.75	25	36	52	67	49
32	2	SV	1678.35	2731	1.71	0.24	2.64	20	18	32	52	34
33	2	SH	1677.86	2775	1.68	0.23	2.65	20	17	31	53	36
34	2	SV	1676.97	2748	1.71	0.24	2.64	20	18	31	52	35
35	2	SV	1676.65	2701	1.76	0.26	2.64	19	21	34	51	33
36	2	SV	1670.24	2768	1.64	0.2	2.64	20	14	27	52	35
37	2	SV	1663.82	2739	1.72	0.24	2.64	20	19	32	52	34
38	1	P	1663.43	5220	1.75	0.26	2.72	24	26	42	64	46
39	2	SH	1662.35	2775	1.7	0.23	2.65	20	18	32	53	36
40	2	SV	1660.17	2736	1.72	0.24	2.64	20	19	32	52	34
41	2	SV	1657.85	2798	1.65	0.21	2.65	21	15	29	53	36
42	2	SH	1655.19	2779	1.7	0.23	2.65	20	18	32	53	36
43	1	P	1652.86	5222	1.74	0.25	2.72	24	25	42	64	46
44	1	SH	1647.01	2972	1.76	0.26	2.72	24	26	42	63	45
45	1	SH	1643.03	2957	1.76	0.26	2.72	24	26	42	63	45
46	2	SV	1641.96	2733	1.73	0.25	2.64	20	19	32	52	34
47	2	P	1638.8	4859	1.76	0.26	2.66	20	22	36	54	36
48	1	SV	1638.15	3017	1.73	0.25	2.73	25	25	41	65	47
49	1	SH	1636.79	2956	1.77	0.26	2.72	24	26	42	63	45
50	2	P	1632.44	4701	1.66	0.21	2.66	21	16	30	55	38

ادامة جدول الف-٤

No	RCV	Wave Type	Intrs. TM (m)	Velocity (m/s)	Vp Vs Ratio	Poisson	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Shear Modulus (GPa)	Lambda (GPa)	Bulk Modulus (GPa)	E Dyn (GPa)	E Stat. (GPa)
51	1	SH	1632.16	2970	1.76	0.26	2.72	24	26	42	63	45
52	1	SV	1625.46	3018	1.73	0.25	2.73	25	25	41	65	47
53	1	SH	1613.75	2968	1.76	0.26	2.72	24	26	42	63	45
54	2	SV	1612.58	2817	1.73	0.25	2.67	21	21	35	56	38
55	1	SV	1611.07	3065	1.7	0.24	2.74	26	23	40	67	49
56	1	SH	1609.62	2952	1.77	0.27	2.72	24	27	43	63	45
57	1	SV	1607.11	3019	1.73	0.25	2.73	25	25	41	65	47
58	1	SV	1603.86	3112	1.68	0.22	2.74	27	22	39	69	51
59	2	SV	1602.94	2791	1.64	0.2	2.64	21	14	28	53	36
60	2	SH	1601.56	2731	1.72	0.25	2.64	20	19	32	52	34
61	2	SH	1601.34	2752	1.73	0.25	2.65	20	20	33	53	35
62	2	SV	1591.44	2957	1.65	0.21	2.69	24	17	33	61	43
63	1	SH	1582.46	2977	1.75	0.26	2.72	24	26	42	64	46
64	2	P	1581.53	4769	1.62	0.19	2.68	23	15	30	60	42
65	2	P	1577.41	4731	1.72	0.24	2.65	20	19	32	53	35
66	2	P	1576.42	4834	1.77	0.26	2.65	20	22	35	52	35
67	1	SV	1571.59	3042	1.72	0.24	2.73	25	24	41	66	48
68	1	SV	1571.22	3033	1.72	0.25	2.73	25	24	41	66	48
69	1	P	1569.79	5217	1.74	0.25	2.72	24	25	42	64	46
70	2	SH	1569.23	2766	1.69	0.23	2.64	20	17	31	53	35
71	2	SV	1568.92	2935	1.58	0.17	2.68	23	12	27	59	41
72	1	SV	1568.15	3056	1.71	0.24	2.73	26	23	40	67	49
73	1	SH	1562.06	2975	1.76	0.26	2.72	24	26	42	63	45
74	2	SV	1554.85	2860	1.62	0.19	2.66	22	13	28	56	38
75	1	P	1554.12	5219	1.74	0.25	2.72	24	25	42	64	46
76	2	SH	1552.61	2758	1.64	0.21	2.63	20	14	27	52	34
77	2	P	1548.74	4759	1.63	0.2	2.68	23	15	30	59	41
78	2	P	1545.94	4788	1.74	0.25	2.65	20	20	34	53	36
79	1	SH	1531.79	3166	1.65	0.21	2.75	28	20	38	71	53
80	1	SH	1524.22	3150	1.66	0.21	2.75	27	20	39	71	52
81	2	SH	1515.89	2956	1.66	0.22	2.7	24	18	34	61	43
82	2	SH	1514.06	2884	1.65	0.21	2.67	22	16	31	57	40
83	1	P	1503.6	5221	1.69	0.23	2.74	26	22	40	68	50
84	2	SH	1499.8	3017	1.56	0.15	2.69	25	10	27	62	44
85	2	SH	1494.22	2997	1.54	0.13	2.68	24	9	25	60	43
86	2	SH	1491.98	3289	1.28	-0.29	2.7	29	-11	9	65	47
87	2	SH	1490.71	2826	1.68	0.23	2.66	21	18	32	55	38
88	1	P	1484.48	5218	1.7	0.24	2.74	26	23	40	67	49
89	1	SV	1478.71	3053	1.71	0.24	2.73	25	23	40	67	48
90	2	SH	1473.6	2864	1.85	0.29	2.7	22	31	46	59	42

جدول الف-۵- پارامترهای مکانیکی سنگ به دست آمده از نرم افزار TSP Win - خروجی تونل از کیلومتر ۱+۶۵۰ تا

۱+۴۷۳

No	RCV	Wave Type	Incrs. TM (m)	Velocity (m/s)	Vp Vs Ratio	Poisson	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Shear Modulus (GPa)	Lambda (GPa)	Bulk Modulus (GPa)	F Dyn. (GPa)	F Stat. (GPa)
1	1	SV	1650.94	2690	1.76	0.26	2.63	19	21	34	50	33
2	1	SV	1647.18	2673	1.77	0.27	2.63	19	21	34	50	32
3	2	SV	1645.61	2733	1.7	0.24	2.64	20	18	31	51	34
4	1	P	1638.64	4767	1.79	0.27	2.63	19	22	35	50	32
5	1	SV	1638.45	2659	1.78	0.27	2.63	19	22	34	49	32
6	1	SH	1634.49	2659	1.78	0.27	2.63	19	22	34	49	32
7	1	P	1631.28	4779	1.77	0.27	2.64	19	22	35	51	33
8	2	P	1631.28	4658	1.71	0.24	2.64	20	18	31	51	34
9	1	SH	1628.11	2644	1.78	0.27	2.62	18	22	34	49	31
10	2	P	1620.02	4661	1.75	0.26	2.62	19	20	32	49	32
11	1	SH	1618.23	2667	1.8	0.28	2.63	19	23	36	50	32
12	1	SH	1617.31	2657	1.79	0.27	2.63	19	22	35	49	32
13	2	SV	1613.55	2785	1.7	0.24	2.65	21	18	32	54	36
14	1	SV	1613.32	2716	1.74	0.25	2.64	19	20	33	51	34
15	1	SV	1607.85	2727	1.75	0.26	2.64	20	21	34	52	34
16	1	SV	1607.29	2738	1.76	0.26	2.65	20	22	35	52	35
17	1	SH	1606.29	2686	1.82	0.28	2.64	19	25	38	51	33
18	1	P	1599.51	4827	1.83	0.29	2.63	18	25	37	49	32
19	2	SH	1594.41	2667	1.74	0.25	2.62	19	19	32	49	32
20	1	SH	1587.05	2549	1.88	0.3	2.61	17	26	37	46	28
21	2	SV	1586.41	2590	1.76	0.26	2.6	17	19	31	46	29
22	2	SV	1581.28	2708	1.65	0.21	2.62	19	14	27	50	32
23	2	P	1581.14	4519	1.73	0.25	2.6	18	18	29	47	30
24	2	SH	1570.96	2660	1.69	0.23	2.61	18	16	28	48	31
25	2	P	1569.83	4500	1.7	0.24	2.61	18	16	29	48	30
26	1	P	1556.09	4752	1.8	0.28	2.63	18	23	35	49	31
27	2	SV	1555.22	2606	1.74	0.26	2.6	18	18	30	47	29
28	2	P	1554.75	4477	1.7	0.24	2.6	18	16	28	47	30
29	2	SH	1551.28	2669	1.76	0.26	2.63	19	20	33	49	32
30	2	SH	1550.3	2663	1.68	0.23	2.61	19	16	28	48	31
31	2	SH	1542.32	2700	1.69	0.23	2.62	19	16	29	50	32
32	1	P	1541.05	4736	1.75	0.26	2.64	19	21	33	51	33
33	1	SH	1540.32	2711	1.67	0.22	2.62	19	15	28	50	33
34	2	P	1537.83	4676	1.72	0.25	2.64	19	19	32	51	34
35	1	SH	1534.03	2737	1.69	0.23	2.64	20	17	30	51	34
36	2	SV	1533.15	2587	1.75	0.26	2.6	17	18	30	46	29
37	1	P	1532.11	4613	1.69	0.23	2.63	20	17	30	51	34
38	1	SV	1531.29	2662	1.75	0.26	2.62	19	20	32	49	32
39	2	SH	1527.6	2706	1.73	0.25	2.63	19	19	32	51	33
40	2	SH	1522.96	2726	1.73	0.25	2.64	20	19	32	51	34
41	1	P	1520.67	4630	1.71	0.24	2.63	19	18	31	50	33
42	1	SH	1514.96	2719	1.73	0.25	2.64	19	19	32	51	34
43	1	P	1514.88	4722	1.73	0.25	2.64	20	19	33	52	34
44	2	SV	1513.33	2728	1.73	0.25	2.64	20	20	33	52	34
45	2	P	1509.01	4520	1.72	0.25	2.61	18	17	29	47	30

ادامة جدول الف-٥

No	RCV	Wave Type	Intrrs. TM (ms)	Velocity (m/s)	Vp Vs Ratio	Poisson	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Shear Modulus (GPa)	Lambda (GPa)	Bulk Modulus (GPa)	E Dyn. (GPa)	E Stat. (GPa)
46	1	P	1504.29	4723	1.73	0.25	2.64	20	20	33	51	34
47	2	SV	1504.2	2686	1.72	0.25	2.63	19	18	31	50	32
48	2	SH	1503.19	2716	1.68	0.23	2.63	19	16	29	50	33
49	2	SH	1503.16	2665	1.68	0.23	2.61	19	15	28	48	31
50	2	SH	1499.43	2665	1.68	0.23	2.61	19	15	28	48	31
51	1	SH	1498.72	2737	1.69	0.23	2.64	20	17	30	51	34
52	1	SH	1497.22	2737	1.73	0.25	2.64	20	20	33	52	35
53	1	P	1480.54	4726	1.73	0.25	2.64	20	20	33	52	34
54	2	SH	1467.57	2665	1.77	0.26	2.63	19	21	33	49	32
55	2	P	1462.64	4706	1.73	0.25	2.64	20	19	32	52	34
56	1	P	1447.38	4732	1.73	0.25	2.64	20	20	33	52	34
57	1	P	1443.09	4744	1.76	0.26	2.64	19	21	34	51	33
58	2	P	1442.86	4716	1.73	0.25	2.64	20	19	32	52	34
59	1	SH	1442.08	2737	1.72	0.24	2.64	20	19	32	52	34
60	2	P	1417.34	4710	1.73	0.25	2.64	20	19	32	52	34

جدول الف-۶- مقادیر  $RMR_{TSP}$  و  $RMR_{Real}$  برای ۱۳۱ نقطه

No	Inters. TM (m)	RMR (TSP)	Real RMR
1	1152.45	70.8	63
2	1163.02	77.3	70
3	1166.08	77.5	67
4	1169.25	76.8	59
5	1173.91	70.9	62
6	1176.29	72.5	62
7	1181.6	71.4	13
8	1183.12	77.6	7
9	1185.64	70.7	6
10	1185.88	77.2	10
11	1187.06	76.8	15
12	1188.05	72.3	15
13	1188.83	78.4	11
14	1189.8	77.5	9
15	1194.24	77.1	12
16	1195.83	72.5	12
17	1197.29	72.6	11
18	1198.29	77	8
19	1198.9	70.8	12
20	1205.35	72.5	13
21	1205.96	77.2	14
22	1206.28	77.3	9
23	1207.18	72.4	12
24	1208.18	77.3	15
25	1212.98	77.4	14
26	1213.31	70.9	6
27	1217.38	77.4	7
28	1218.14	78.4	6
29	1219.84	78.4	8
30	1223.83	77	5
31	1230.05	77.2	9
32	1234.45	71.5	7
33	1235.17	77.2	10
34	1236.62	77.2	9
35	1238.17	77.3	11
36	1285.14	72.7	75
37	1285.94	72.2	67
38	1287.06	72.5	65
39	1287.61	70.7	65
40	1288.71	76.6	68
41	1296.5	72.4	60
42	1298.88	72.5	56
43	1306.21	73.1	67
44	1315.65	76.8	63
45	1323.22	76.8	77

ادامة جدول الف-٦

No	Inters. TMI (m)	RMR (TSP)	Real RMR
46	1323.63	75.7	77
47	1329.3	76.9	77
48	1350.84	76.1	65
49	1353.8	76.1	65
50	1442.08	59	75
51	1442.86	59.1	75
52	1443.09	59.5	75
53	1447.38	59.3	82
54	1462.64	59	82
55	1467.57	59.1	82
56	1480.54	59.3	75
57	1503.16	55.9	67
58	1503.19	57.1	67
59	1504.2	57.8	60
60	1504.29	59.2	60
61	1509.01	56.5	70
62	1513.33	59.2	72
63	1514.88	59.2	70
64	1514.96	59	70
65	1520.67	58	75
66	1522.96	59.1	70
67	1527.6	58.7	72
68	1531.29	58.4	70
69	1532.11	57.8	77
70	1533.15	56.6	70
71	1534.03	57.9	70
72	1537.83	58.6	5
73	1540.32	56.6	8
74	1541.05	59.4	10
75	1542.32	57.1	5
76	1550.3	55.9	8
77	1551.28	58.9	6
78	1554.75	55.9	14
79	1555.22	56.7	13
80	1556.09	59.6	15
81	1569.83	56.3	7
82	1570.96	56.2	9
83	1581.14	56.5	5
84	1581.28	55.8	9
85	1586.41	57	11
86	1587.05	60.1	10
87	1594.41	58.1	10
88	1599.51	60.6	70
89	1606.29	61.4	70
90	1607.29	60.5	69



ادامة جدول الف-٦

No	Inters. TM (m)	RMR (TSP)	Real RMR
91	1607.85	59.9	69
92	1613.32	59.3	77
93	1613.55	59.4	77
94	1617.31	59.7	70
95	1618.23	60.2	75
96	1620.02	58.4	70
97	1628.11	59	77
98	1631.28	58.4	72
99	1632.28	60	72
100	1634.49	59.3	70
101	1638.45	59.3	70
102	1638.64	59.8	70
103	1645.61	58.2	70
104	1647.18	59.3	67
105	1650.94	59.4	67
106	1652.86	65.9	82
107	1655.19	59.2	67
108	1657.85	57.8	77
109	1660.17	59	70
110	1662.35	59.1	77
111	1663.43	65.8	77
112	1663.82	59.1	72
113	1783.75	63.9	13
114	1784.31	63.6	14
115	1784.42	60.4	7
116	1794.49	65.6	13
117	1795.5	63.8	6
118	1800.84	60.2	14
119	1802.43	58.9	8
120	1808.13	60.2	6
121	1812.77	60.3	11
122	1812.88	64.3	7
123	1813.07	64.2	6
124	1813.74	60.4	8
125	1815.85	64.9	12
126	1817.13	64.4	5
127	1820.4	64.3	10
128	1824.93	64.6	8
129	1825.39	64.7	8
130	1832.45	64.2	69
131	1836.01	64.6	67

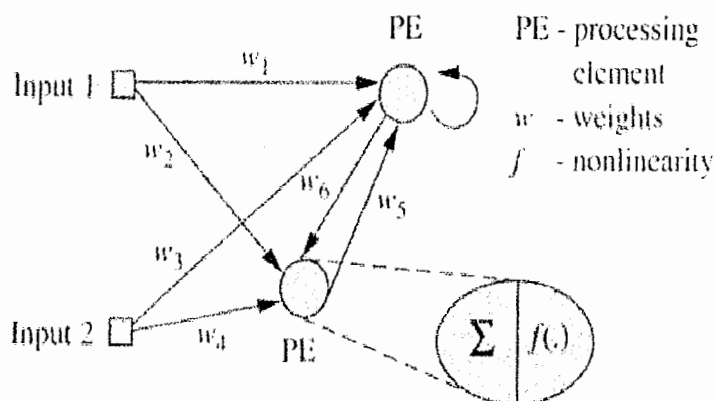
## پیوست ج

کلیاتی در مورد شبکه‌های  
عصبی مصنوعی

## ۱- مقدمه

دیر زمانی است که بشر در پی یافتن روشی جهت شبیه سازی عملکرد مغز انسان در قالب یک سیستم مصنوعی می باشد. این امر سبب انجام پژوهش های بسیاری در این زمینه شده است، که شبکه های عصبی مصنوعی<sup>۱</sup> ماحصل آن می باشد (منهاج، ۱۳۸۱).

شبکه های عصبی مصنوعی (ANN)، گسترده، قابل انطباق و عموماً یک ماشین یادگیری غیر خطی هستند که از چندین المان پردازش (PE)<sup>۲</sup> متفاوت به نام نرون تشکیل شده اند. هر نرون اتصالاتی را از نرون های دیگر و یا از خود دریافت می کند. جریان سیگنال در اتصالات توسط یک پارامتر تعدیل پذیر که وزن ( $W_{ij}$ ) نامیده می شود مقیاس بندی می شود. المان های پردازش این قسمت ها را با هم جمع می کنند و یک خروجی را تولید می کنند، که یک تابع غیر خطی از مجموعها است. شکل زیر مثالی از شبکه عصبی را نشان می دهد.

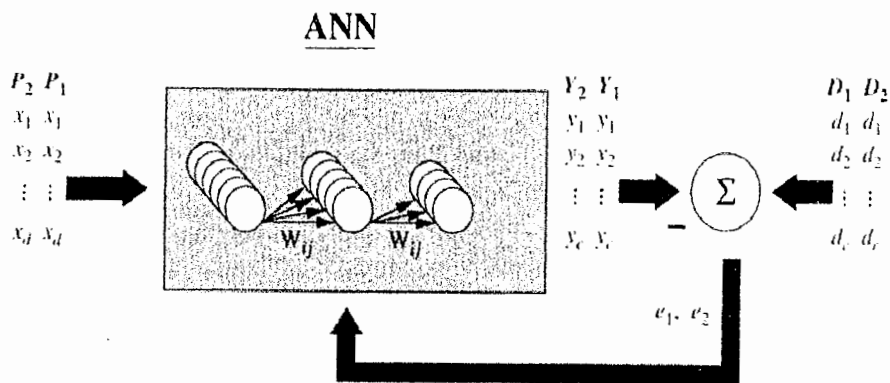


شکل ج-۱- یک شبکه عصبی مصنوعی (Principe et al, 1999)

- 1- Artificial Neural Network (ANN)
- 2- Processing Element (PE)

شبکه‌های عصبی توابع محرک از المان‌های پردازش خود می‌سازند. توپولوژی شبکه عصبی، تعداد و شکل توابع محرک را تعیین می‌کند. یکی از مزایای شبکه‌های عصبی مصنوعی این است که آنها به اندازه کافی در ایجاد تابع محرک دلخواه قوی‌اند، تا شبکه عصبی به قابلیت طبقه‌بندی بهینه برسد (نیری، ۱۳۸۵).

توابع محرک توسط وزنهای شبکه کنترل می‌شوند. وزنهای شبکه بدون هیچ فرضی درباره توزیع آماری داده‌ها، به طور مستقیم از داده‌های آموزش تعدیل می‌شوند. بنابراین یکی از نتایج طراحی شبکه‌های عصبی، یکسان کردن برنامه سیستماتیک (یک الگوریتم آموزش) برای تنظیم کردن وزنهای برای دقیق‌تر کردن طبقه‌بندی است. دقت کار با توجه به میزان خطا تعیین می‌شود. برای آموزش شبکه عصبی ترتیبی وجود دارد که در شکل ج-۲ مشاهده می‌شود. ابتدا داده‌ها به شبکه داده می‌شوند و خروجی با توجه به داده‌ها محاسبه می‌شود. خطایی از مقایسه خروجی شبکه و مقدار واقعی به دست می‌آید و این مقدار خطا برای تنظیم وزنهای استفاده می‌شود. این پروسه با استفاده از همه داده‌های آموزش تکرار می‌شود تا اینکه شبکه به مقدار همگرایی لازم برسد. بنابراین در شبکه عصبی، طراح شبکه عصبی نمی‌تواند خیلی از پارامترهای سیستم را تعیین کند. این پارامترها به طور اتوماتیک از داده‌های ورودی و جوابهای مطلوب به وسیله الگوریتم آموزش به دست می‌آید (نیری، ۱۳۸۵).



شکل ج-۲- فرآیند آموزش شبکه عصبی (Principe et al, 1999)

## ۲- ساختار شبکه‌های عصبی مصنوعی

تمام شبکه‌های عصبی حداقل در سه مولفه اصلی مشترک هستند:

۱- نرون یا گره (PE)

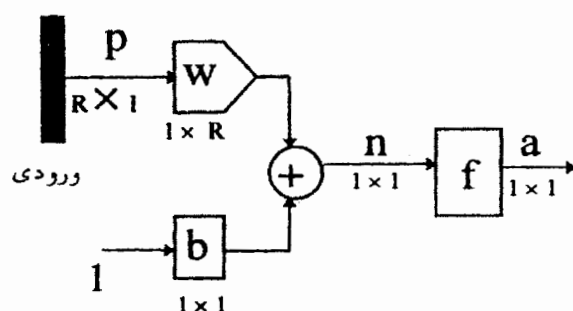
۲- وزنهای ارتباطی ( $W_{ij}$ )

۳- لایه‌های مجزایی که شامل نرونها هستند و توسط وزنها به هم مرتبط می‌شوند.

نرون‌ها به عنوان واحدهای محاسباتی پایه، اساس عملکرد شبکه‌ها را تشکیل می‌دهند.

شکل ج-۳ نرونی را با چند ورودی نشان می‌دهد. حاصلضرب بردار ورودی ( $P$ ) و ماتریس وزنی ( $W$ )

و جمع آن با جمله بایاس<sup>۲</sup> ( $b$ ) تشکیل ورودی خالص<sup>۴</sup> ( $n$ ) را برای تابع محرک ( $f$ ) می‌دهد.



شکل ج-۳- یک نرون با چند ورودی (منهاج، ۱۳۸۱)

در مورد عملکرد شبکه، جمع وزنی ورودی‌ها به هنگام عبور از تابع محرک، با آستانه تابع مقایسه می‌شود. چنانچه این جمع وزنی از مقدار آستانه فراتر رود، نرون فعال می‌شود و چنانچه این مقدار کمتر از آستانه باشد، نرون غیر فعال باقی می‌ماند.

یکی از ویژگی‌های شبکه‌ها تک لایه یا چند لایه بودن آنها است. شکل ج-۴ یک شبکه سه

لایه‌ای را نشان می‌دهد. لایه‌ها در شبکه‌ها عبارتند از:

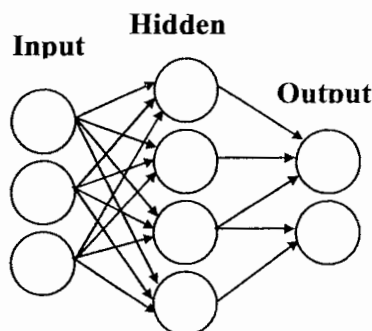
۱- لایه ورودی: در این لایه، ورودی‌ها به دنیای خارج متصل شده‌اند. در این لایه سه ورودی به

گونه‌ای ساده به لایه بعدی شبکه متصل شده‌اند. در این لایه هیچ پردازشی صورت نمی‌گیرد.

3- Bias  
4- Net Input

۲- لایه پنهان<sup>۵</sup>: این لایه را به این دلیل پنهان نامند زیرا از بیرون این لایه، خروجی‌ها و ورودی‌های چهار عصب موجود در این لایه را نمی‌توان مشاهده کرد. این نخستین لایه‌ای است که در آن پردازش انجام می‌شود.

۳- لایه خروجی: در این لایه، خروجی‌ها به دنیای خارج متصل می‌شوند.



شکل ج-۴- یک شبکه سه لایه‌ای (Alimoradi, et al, 2007)

### ۳- دسته‌بندی شبکه‌ها بر اساس روش یادگیری

از آنجا که ارتباط بین ورودی و خروجی کاملاً مشخص نیست، به پروسه یادگیری نیاز است. نوع دیگری از تقسیم بندی شبکه‌ها براساس نحوه یادگیری می‌باشد. بر این اساس شبکه‌ها به دو دسته تقسیم می‌شوند:

#### ۳-۱- شبکه‌های دارای یادگیری با ناظر<sup>۶</sup>

در یادگیری با ناظر فرض بر این است که در هر مرحله از تکرار الگوریتم یادگیری، جواب مطلوب سیستم یادگیرنده از قبل آماده است و به عبارتی الگوریتم یادگیری به جواب واقعی و مطلوب دسترسی دارد. در این روش یادگیری، الگوهای خروجی مطلوب با خروجی محاسبه شده توسط شبکه مقایسه می‌شوند و اختلاف بین آنها می‌بایست با تغییر پارامترهای شبکه (وزن و بایاس) جبران شود. نحوه تغییر پارامترهای شبکه توسط نوع الگوریتم آموزش<sup>۷</sup>، تعیین می‌شود.

- 
- 5- Hidden Layer
  - 6- Supervised Learning
  - 7- Learning Algorithm

### ۳-۲- شبکه‌های دارای یادگیری بدون ناظر<sup>۸</sup>

در یادگیری بدون ناظر جواب مطلوب برای سیستم یادگیرنده موجود نیست. به عبارتی به خطای یادگیری جهت بهبود رفتار سیستم یادگیرنده دسترسی نداریم. چگونگی ارتباط بین نرون‌ها اعم از ارتباط داخلی بین نرون‌های یک لایه با نرون‌های لایه‌های مختلف و نحوه یادگیری، نوع شبکه را مشخص می‌کند. در این حالت فرد طراح است که هدف و مقصد نهایی، یعنی چیزی را که باید به آن رسید مشخص می‌کند (منهاج، ۱۳۸۱).

### ۴- دسته بندی شبکه ها براساس پیشخور و پسخور بودن

یکی دیگر از روش‌های دسته‌بندی شبکه‌ها، بر طبق جهت جریان اطلاعات در آنها می‌باشد، که بر این اساس دو نوع شبکه وجود دارد.

#### ۴-۱- شبکه‌های پیشخور

در این شبکه‌ها، نرون‌ها، ورودی خود را تنها از لایه قبلی دریافت می‌کنند و خروجی خود را تنها به لایه بعدی منتقل می‌کنند (منهاج، ۱۳۸۱).

#### ۴-۲- شبکه‌های پسخور یا برگشتی

در شبکه‌های پسخور، حداقل یک سیگنال برگشتی از یک نرون به همان نرون یا نرون‌های همان لایه و یا لایه قبل ارسال می‌شود (منهاج، ۱۳۸۱).

### ۵- پارامترهای شبکه

پارامترهای زیر اثر مستقیم در نحوه عملکرد شبکه دارند و کاربر می‌تواند این پارامترها را کنترل کند:

۱- تعداد لایه‌های شبکه

۲- تعداد نرون‌ها (المان‌های پردازش) در لایه پنهان

۳- مقدار دهی اولیه وزن‌ها<sup>۹</sup>

۴- تابع محرک

۵- نرخ یادگیری و گشتاور<sup>۱۰</sup>.

### ۵-۱- تعداد لایه‌های شبکه

یک شبکه چند لایه می‌تواند با به کارگیری تعداد کافی از لایه‌ها در شبکه و تعداد مناسب گره در هر لایه طبقه‌بندی‌های پیچیده را انجام دهد. به کارگیری تعداد لایه‌های بیشتر می‌تواند منجر به استفاده از تعداد کمتری نرون در کل شبکه شود. از لحاظ تئوری ثابت شده است که شبکه‌های سه لایه‌ای با تابع محرک سیگموئیدی تقریب زنده‌های جامع هستند، بدین معنی که این شبکه‌ها را می‌توان برای تقریب زدن هر تابعی آموزش داد. میزان دقت تقریب به کار رفته به تعداد نرون‌های موجود در لایه پنهان بستگی دارد (غضنفری و ارکات، ۱۳۸۳). البته بهترین راه برای محاسبه تعداد لایه‌ها و تعداد نرون‌های موجود در آنها استفاده از روش سعی و خطا می‌باشد.

### ۵-۲- اثر تعداد نرون‌ها در لایه‌های میانی

یکی از مسائل اساسی در شبکه‌های عصبی محاسبه تعداد نرون‌ها در لایه‌های میانی است. تعیین تعداد درست المان‌های پردازش با توجه به اطلاعات موجود کار مشکلی است. محققین تلاش‌های بسیاری را برای یافتن روشی برای انتخاب بهینه تعداد نرون‌های لایه میانی انجام داده‌اند و روش‌هایی را نیز برای این منظور ارائه کرده‌اند. با بررسی همه روش‌های پیشنهادی این نتیجه حاصل می‌شود که هیچ یک از این روش‌ها در همه موارد عمومیت ندارند و بهترین روش برای تعیین تعداد بهینه المان‌های پردازش در لایه پنهان همانگونه که قبلاً نیز گفته شد، استفاده از روش آزمون و خطا می‌باشد.

---

9- Weight initialization

10- Momentum



### ۵-۳- مقدار دهی اولیه وزنها

یکی از عواملی که در کاهش خطای شبکه موثر است، انتخاب مناسب وزن‌های اولیه می‌باشد. وقتی که وزن‌های اولیه دور از مقدار بهینه انتخاب شوند، پیدا کردن مقدار مینیمم سخت‌تر می‌شود و احتمال اینکه تابع درگیر نقاط مینیمم محلی گردد زیاد می‌شود (نیری، ۱۳۸۵). یک راه معمول برای مقدار دهی وزن‌های اولیه، شروع کردن وزن‌های شبکه به صورت تصادفی است.

### ۵-۴- انتخاب نوع تابع محرک

در شبکه پس انتشار خطا، هر تابع مشتق‌پذیر و پیوسته‌ای که به طور یکنواخت افزایش یابد، می‌تواند به عنوان تابع محرک استفاده شود. معمول‌ترین این توابع، سیگموئیدی، تانژانت هیپربولیک و خطی می‌باشند. انتخاب نوع تابع محرک به هدف مسأله بستگی دارد. چنانچه شبکه یک مسأله دسته‌بندی را حل می‌کند، بهتر است از تابع سیگموئیدی یا تانژانت هیپربولیک در لایه خروجی استفاده شود. اگر هدف از حل مسأله، تخمین تابع می‌باشد بهتر است از تابع محرک غیر خطی مانند سیگموئیدی برای نرونهای لایه پنهان و از تابع خطی برای لایه خروجی استفاده شود. خطی بودن تابع لایه خروجی اجازه می‌دهد تا شبکه مقادیر خارج از یک گستره محدود را هم تولید کند (طهماسبی، ۱۳۸۳).

### ۵-۵- نرخ یادگیری و گشتاور

این دو کمیت میزان تغییر وزنها را کنترل می‌کند. انتخاب نرخ یادگیری (7) بسیار مهم است و اندازه گامها را در راستای حصول به حداقل خطا تنظیم می‌کند. زمانی که تابع خطا نسبتاً تخت باشد، استفاده از نرخ آموزشی بزرگتر سودمند است. استفاده از نرخ آموزشی کوچک باعث طولانی‌تر شدن زمان همگرایی می‌شود. در روشهای آموزشی سریعتر که با اعمال تغییراتی در الگوریتم پس انتشار خطا حاصل شده است، نرخ یادگیری ثابت نیست و در خلال آموزش تغییر می‌کند.

گشتاور ( $\alpha$ ) برای بهتر کردن اجرای الگوریتم استفاده می‌شود، که همگرایی را سریعتر و پایدار می‌کند. به طور نرمال  $\alpha$  عددی بین ۰/۵ و ۰/۹ می‌باشد (طهماسبی، ۱۳۸۳).

در جایی که شبکه در یک گودی (مینیمم محلی) گیر می‌افتد، مومنتم به رهایی از مینیمم محلی کمک می‌کند. مومنتم روشی برای سریع‌تر کردن آموزش است و پیشنهاد می‌شود که مومنتم به عنوان پیش فرض شبکه‌های غیر خطی قرار گیرد (Principe et al, 1999).

یک نرخ یادگیری کوچک می‌تواند با یک گشتاور بزرگتر جهت تسریع همگرایی استفاده شود و یک نرخ یادگیری بزرگتر معمولاً با یک گشتاور کوچکتر جهت اطمینان از پایداری شبکه می‌تواند همراه شود. مقادیر گشتاور و نرخ یادگیری اغلب توسط آزمون و خطا انتخاب می‌شوند (طهماسبی، ۱۳۸۳).

## ۶- توقف آموزش

در خلال آموزش میزان خطای بین خروجی حاصل و خروجی واقعی اندازه‌گیری می‌شود. هدف فاز آموزش، کاستن مقدار خطا از طریق تعدیل اوزان می‌باشد. لذا در خلال آموزش خطا باید کاهش یابد و آموزش زمانی متوقف خواهد شد که این مقدار کاهش مقدار ناچیزی باشد. واضح است که، مطلوب آن است که خطا حتی الامکان کاهش یابد، اما به هر حال تجربه نشان می‌دهد که یک شبکه نمی‌تواند به همان خوبی که بر روی مجموعه آموزش عمل می‌کند، بر روی مجموعه آزمون کار کند. این پدیده را آموزش مبالغه‌ای<sup>۱۱</sup> گویند و گفته می‌شود که شبکه بر روی داده‌های آموزش فوق العاده منطبق شده است.

در طول فرآیند آموزش، میزان خطای بین خروجی نرم‌افزار و خروجی واقعی باید کاهش یابد. در نقطه‌ای از آموزش، مقدار خطای مجموعه آزمون از کاهش یافتن باز می‌ماند و حتی ممکن است شروع به بالا رفتن کند. این همان نقطه‌ای است که از آن به بعد آموزش مبالغه‌ای شروع می‌شود و شبکه شروع به انطباق بیش از حد با مجموعه آموزش می‌نماید. در صورتیکه در نقطه‌ای که از آنجا خطای مجموعه آزمون شروع به بالا رفتن می‌کند، آموزش متوقف شود، می‌توان از آموزش مبالغه‌ای اجتناب کرد (غضنفری و اراکات، ۱۳۸۳).

## ۷- یادگیری<sup>۱۲</sup> و تعمیم<sup>۱۳</sup> شبکه‌ها

شبکه‌های عصبی، الگوها را طبقه‌بندی می‌کنند، اما هر طبقه‌بندی الگو، شبکه عصبی نیست. یکی از مهمترین ویژگی‌های شبکه‌های عصبی توانایی آنها در یادگیری و تعمیم است. شبکه‌های عصبی قادرند با کمک الگوریتم‌های آموزش، خود را آموزش داده و با به دست آوردن روابط غیر خطی حاکم بین پارامترهای ورودی و خروجی به حل مساله پرداخته و رابطه حاصل را به ورودی‌های دیگر نیز تعمیم دهند.

---

12- Learning  
13- Generalization

## **Abstract**

Finding the location of small scale geotechnical hazardous structures such as faults in deep underground excavations is nearly impossible when only using surface-based exploration methods. This thesis aims at improving the methods of interpretation of seismic data collected in underground surveys. The site of Cheshmeh Roozieh Water Supply Tunnel System was used for developing and testing our procedures. A geotechnical survey was carried out using a series of seismic measurements with a newly established method of Tunnel Seismic Prediction (TSP 203) in a 684m of the 3200m of the tunnel. Determination of rock mechanical and seismic parameters such as compressional and shear wave velocities, Poisson's ratio, and dynamic Young's modulus was sought in geotechnical investigations. These parameters are highly correlated with the engineering geological characteristic of the rock mass that help in successful determination of the location of the faults and assists in decision-making about the stability and strength of the rocks.

Collected seismic data were interpreted in proprietary software called TSPwin. TSP 203 precisely predicted the fractured zones that contain water and strong zones. However, in three segments of the tunnel that was under investigation, compressed fractured rocks without water existed that could not be detected easily in the TSP 203 method. We speculate the reason for this is the complicated nature of the recorded seismic waves further made difficult by the nonlinear relationship between seismic data and the site geology. An alternative modeling method of tunnel route stability using neural information processing was used to determine these unknown nonlinear relationships and to enhance the accuracy of TSP 203 in detecting the weak zones. A network of artificial neurons was trained using the parts of outputs of the TSPwin software that were assigned for training of the network. We reserve a small portion of the same data for testing of the network.

The proposed Artificial Neural Network (ANN) method was then applied to the tunnel's data which were not used in the training of the ANN-based method. Subsequently, the proposed method was able to detect the weak zones precisely. This technique uses more than one seismic parameter for rock mass classification therefore its results are more reliable. In the final part of this thesis, the already trained neural network was applied to the data collected from another tunnel. The results showed a better estimation of the prediction of the route.