

## فهرست مطالب

فصل بیستم: تاریخچه تونلسازی در زمین لهیده.....	۱۱
۱-۲-۲۰- معرفی.....	۱۲
۲-۲-۲۰- زمین شناختی منطقه، مشکلات حفر تونل و گزینه‌های مختلف طرح.....	۱۴
۱-۲-۲۰- روند زمینساخت.....	۱۴
۲-۲-۲۰- سنگ شناسی.....	۱۵
۳-۲-۲۰- ویژگی‌های ساختاری.....	۱۵
۴-۲-۲۰- مشکلات پیش روی تونلسازی و طرح‌های جایگزین.....	۱۵
۵-۲-۲۰- روی دادن مجدد راندگی در داخل زمین.....	۱۶
۶-۲-۲۰- تقسیم بندی تونل اصلی به سه تونل کوچکتر.....	۱۷
۷-۲-۲۰- سیلاب در تونل کلاوار.....	۱۷
۸-۲-۲۰- خواص توده سنگ‌ها.....	۱۸
۳-۲-۲۰- فعالیت زمین‌ساختی و پوشش تونل.....	۲۱
۱-۳-۲۰- تاریخچه زلزله.....	۲۱
۲-۳-۲۰- اندازه گیری حرکت زمین‌ساختی.....	۲۲
۳-۳-۲۰- پوشش انعطاف پذیر تونل.....	۲۲
۴-۲-۲۰- ساخت تونل و تجهیزسازی در ناحیه رانش- داخلی در کلاوار.....	۲۵
۱-۴-۲۰- رفتار تکیه‌گاهی در دالان بازرسی کلاوار.....	۲۵
۲-۴-۲۰- ساخت تونل.....	۲۵
۳-۴-۲۰- تجهیزسازی.....	۲۶
۴-۴-۲۰- مقاطع آزمایش.....	۲۷
۵-۴-۲۰- طراحی تکیه‌گاهها.....	۲۹
۵-۲-۲۰- ساخت تونل و تجهیزات در ناحیه رانش- داخلی در چیپرو.....	۳۰
۱-۵-۲۰- ساخت تونل.....	۳۰
۲-۵-۲۰- تجهیزسازی.....	۳۰
۶-۲-۲۰- نظریه کشسان خمیری.....	۳۱
۱-۶-۲۰- اثر عمق تونل بر روی فشار تکیه‌گاهی.....	۳۳
۲-۶-۲۰- تخمین فشار تکیه‌گاه و الزامات تکیه‌گاه.....	۳۴
۳-۶-۲۰- خاکریز سست با تکیه‌گاه‌های قوس فولادی.....	۳۶
۴-۶-۲۰- نرخ بستار تونل.....	۳۹
۷-۲-۲۰- نتیجه‌گیری.....	۴۰
منابع.....	۴۲



۴۵	فصل بیست و یکم: تونل‌ها در نواحی زلزله‌خیز
۴۶	۲۱-۱- مقدمه
۴۷	۲۱-۲- پاسخ یک سازه‌ی زیرزمینی به بارگذاری دینامیک
۴۸	۲۱-۳- پاسخ مشاهده شده
۵۰	۲۱-۴- تاریخچه‌ی موردی زلزله‌ی اوتارکاشی ۱۹۹۱
۵۰	۲۱-۴-۱- توصیف پروژه
۵۱	۲۱-۴-۲- پاسخ زلزله
۵۲	۲۱-۴-۳- پوشش بتنی قطع‌های در میان گسل فعال (جثوا و سینق (۱۹۸۰))
۵۲	۲۱-۵- نظریه‌ی شبه ایستای فشار تکیه‌گاه لرزهای
۵۴	۲۱-۶- سیستم تکیه‌گاه برای بارگذاری انفجاری
۵۸	منابع
۶۱	فصل بیست و دوم: انفجار سنگ در تونل‌ها
۶۲	۲۲-۱- مقدمه
۶۳	۲۲-۲- شرایط برای انفجار سنگ در تونل‌های عمیق
۶۶	۲۲-۳- مفهوم نرخ رهایی انرژی کرنشی
۶۶	۲۲-۴- انرژی لرزشی آزاد شده در یک انفجار سنگ
۶۷	۲۲-۵- معیار نیمه تجربی پیش بینی انفجار سنگ
۷۱	۲۲-۶- پیشنهاد برای کاهش شدت انفجارات سنگ
۷۳	منابع
۷۵	فصل بیست و سوم: تونل‌های فشار
۷۶	۲۳-۱- مقدمه
۷۷	۲۳-۲- حداقل روبار بر روی یک تونل تحت فشار
۷۸	۲۳-۳- پوشش بتنی جامد
۷۸	۲۳-۴- پوشش بتنی سیمانی ساده‌ی ترک خورده
۸۱	۲۳-۵- پوشش فولادی در بارناو
۸۴	۲۳-۶- شکست هیدرولیک نزدیک به اتصال تونل تحت فشار و بارناو
۸۶	منابع
۸۷	فصل بیست و چهارم: چاه‌ها
۸۸	۲۴-۱- مقدمه
۸۹	۲۴-۲- اشکال مختلف چاه‌ها
۹۰	۲۴-۳- چاه‌ها با سیستم خود نگه‌دارنده
۹۱	۲۴-۴- فشار نگه‌دارنده بر روی دیواره‌ی چاه
۹۳	۲۴-۵- طراحی سیستم نگه‌دارنده



۹۴	۲۴-۶- چاه فشارشکن .....
۹۵	۲۴-۷- حفاری .....
۹۷	۲۴-۸- بتن خودمتراکم (کاوشیک و کومار ۲۰۰۴) .....
۹۹	منابع .....
۱۰۱	<b>فصل بیست و پنجم: نیمه تونل‌ها</b> .....
۱۰۲	۲۵-۱- مقدمه .....
۱۰۳	۲۵-۲- کاربرد طبقه‌بندی توده سنگ .....
۱۰۶	۲۵-۳- تحلیل گوه .....
۱۰۸	۲۵-۴- توزیع تنش پیرامون نیمه تونل .....
۱۱۰	منابع .....
۱۱۱	<b>فصل بیست و ششم: مخاطرات پیمانکاری</b> .....
۱۱۲	۲۶-۱- خطر .....
۱۱۷	۲۶-۲- مدیریت خطر .....
۱۲۲	۲۶-۱-۲- ابزارهای مدیریت خطر - تحلیل درخت خطا .....
۱۲۳	۲۶-۲-۲- پیشنهادات انجمن بین‌المللی تونل‌سازی (اسکسن و همکاران ۲۰۰۴) .....
۱۲۴	۲۶-۳- برنامه‌ریزی خطر ساخت .....
۱۲۵	۲۶-۴- ارزیابی‌های زمان و هزینه .....
۱۲۷	منابع .....
۱۲۹	<b>فصل بیست و هفتم: سرعت اجرای تونل</b> .....
۱۳۰	۲۷-۱- مقدمه .....
۱۳۰	۲۷-۲- طبقه‌بندی شرایط زمین/کار برای سرعت تونل‌سازی .....
۱۳۲	۲۷-۳- طبقه‌بندی شرایط مدیریتی در سرعت تونل‌سازی .....
۱۳۶	۲۷-۴- اثر ترکیبی شرایط زمین و مدیریتی روی سرعت تونل‌سازی .....
۱۳۷	۲۷-۵- مدیریت تونل (سینگ ۱۹۹۳) .....
۱۳۸	۲۷-۶- مشخصات مناقصه‌ها و مزایده‌های ضعیف .....
۱۳۹	۲۷-۷- انجام و اجرای قرارداد .....
۱۴۰	۲۷-۸- مدیریت کیفیتی توسط انجمن بین‌المللی تونل‌سازی .....
۱۴۲	منابع .....
۱۴۳	<b>فصل بیست و هشتم: روش‌های یکپارچه تونل‌سازی</b> .....
۱۴۴	۲۸-۱- مقدمه .....
۱۴۵	۲۸-۲- سوراخ‌های گمانه پیش رونده .....
۱۴۵	۲۸-۳- اثر لرزه‌خیزی .....
۱۴۵	۲۸-۴- ابزارهای دقیق تونل .....

- ۲۸-۵- انتخاب نوع سیستم نگه‌دارنده ..... ۱۴۶
- ۲۸-۶- شاتکریت مسلح به الیافی فولادی (SFRS) ..... ۱۴۷
- ۲۸-۶-۱ اجزای تشکیل دهنده بتن شاتکریت ..... ۱۴۹
- ۲۸-۶-۲ ظرفیت تحملی شاتکریت مسلح به الیاف ..... ۱۵۲
- ۲۸-۶-۳ تأمین زهکش در بتن شاتکریت برای تونل‌های حمل و نقل با توده‌های سنگ آبدار ۱۵۳
- ۲۸-۷- تقویت ناحیه برشی ..... ۱۵۴
- ۲۸-۸- شاتکریت ..... ۱۵۵
- ۲۸-۹-۱ کلیات ..... ۱۵۵
- ۲۸-۹-۲ اجزای شاتکریت ..... ۱۵۶
- ۲۸-۹-۳ ضخامت شاتکریت ..... ۱۵۶
- ۲۸-۹-۴ ظرفیت تحملی شاتکریت در سقف ..... ۱۵۷
- ۲۸-۱۰- پیچ سنگ‌های سقفی ..... ۱۵۷
- ۲۸-۱۰-۱ کلیات ..... ۱۵۷
- ۲۸-۱۰-۲ انواع پیچ سنگ‌های سقف ..... ۱۵۸
- ۲۸-۱۰-۳ طراحی ..... ۱۶۰
- ۲۸-۱۰-۴ ظرفیت پیچ سنگ‌ها یا مهارها ..... ۱۶۲
- ۲۸-۱۱-۱ انتخاب نوع سیستم ..... ۱۶۴
- ۲۸-۱۱-۲ انتخاب سیستم نگه‌دارنده با توجه به لایه‌های سنگ اطراف و شکل تونل .... ۱۶۵
- ۲۸-۱۱-۳ فاصله بین قاب‌ها ..... ۱۶۶
- ۲۸-۱۱-۴ انتخاب نگه‌دارنده قاب فولادی ..... ۱۶۷
- ۲۸-۱۱-۵ نوع نگه‌دارنده برای چاه‌ها ..... ۱۶۸
- ۲۸-۱۱-۶ اجزای نگه‌دارنده تونل ..... ۱۶۸
- ۲۸-۱۱-۷ عوامل تعیین کننده فاصله و آرایش نگه‌دارنده‌ها ..... ۱۷۶
- ۲۸-۱۱-۸ طراحی ..... ۱۷۷
- ۲۸-۱۲-۱ کلیات ..... ۱۷۹
- ۲۸-۱۲-۲ الگو، عمق و آرایش سوراخ‌های دوغاب‌ریزی ..... ۱۸۰
- ۲۸-۱۲-۳ فشاری که باید برای دوغاب‌ریزی به کار رود ..... ۱۸۳
- ۲۸-۱۲-۴ آزمون برای بررسی اثر بخشی دوغاب‌ریزی ..... ۱۸۴
- ۲۸-۱۲-۵ ظرفیت قوس سنگی دوغاب‌ریزی شده (شکل‌های ۲۸-۱۷ و ۲۸-۱۸) ..... ۱۸۴
- ۲۸-۱۳-۱ طراحی سیستم نگه‌دارنده یکپارچه ..... ۱۸۴
- ۲۸-۱۳-۱ کلیات ..... ۱۸۴
- ۲۸-۱۳-۲ کاربرد روش طراحی نیمه تجربی ..... ۱۸۶
- ۲۸-۱۳-۳ تونل عبوری از ناحیه درون رانشی ..... ۱۸۸



۱۸۹	۲۸-۱۳-۴- تجربیات احداث تونل در شرایط سنگ ضعیف
۱۸۹	۲۸-۱۳-۵- زمین دارای روانگرایی
۱۹۱	۲۸-۱۴- الزامات خاص تونلسازی
۱۹۶	منابع
۱۹۷	<b>فصل بیست و نهم: حالت بحرانی مکانیک سنگ و کاربردهای آن</b>
۱۹۸	۲۹-۱- کلیات
۲۰۲	29-2- مدل پیشنهادی برای توده سنگ
۲۰۵	29-3- مقاومت پسماند
۲۰۹	۲۹-۴- اثر فشار محدود کننده بر زاویه اصطکاک
۲۱۱	منابع
۲۱۳	<b>پیوست الف: مکانیک تونل</b>
۲۱۴	پیوست الف-۱- توزیع تنش الاستیک در اطراف تونل‌های دایروی
	پیوست الف-۲- نظریه الاستو-پلاستیک پیشنهاد شده برای توزیع تنش در ناحیه شکست در
۲۱۹	زمین لهیده
۲۲۱	ناحیه الاستیک
۲۲۱	ناحیه شکست
۲۲۴	پیوست الف-۳- فشار کوتاه مدت نگهدارنده بر تونل‌های نزدیک به هم در شرایط زمین لهیده
۲۲۸	پیوست الف-۴- فشارهای زلزله بر نگهدارنده
۲۲۹	منابع
۲۳۱	<b>پیوست ب: نرم افزار TM برای طراحی تجربی سیستم نگهدارنده برای مغارها و تونل‌ها</b>
۲۳۲	پیوست ب-۱- کلیات
۲۳۴	پیوست ب-۲- نرم افزار TM
۲۳۶	پیوست ب-۳- تجربیات در شرایط سنگ ضعیف
۲۳۷	پیوست ب-۴- نتیجه‌گیری
۲۳۸	پیوست ب-۵- راهنمای کاربران برای نرم افزار TM
۲۴۱	ملاحظات خاص
۲۴۳	منابع
۲۴۵	<b>پیوست ج: ظرفیت مقاطع مسدود شده تیر فولادی در سقف تونل</b>
۲۴۷	نکات
۱	<b>واژگان</b>



فصل بیستم

تاریخچه تونلسازی در زمین لئیده

## ۲۰-۱- معرفی

در این فصل نمونه‌ای از مشکلات تونلسازی در زمین‌های مستعد لهیدگی در داخل ناحیه راندگی<sup>۱</sup> زمین در بخش پایین دستی هیمالیا آورده شده است. هدف از مرحله دوم پروژه برق آبی یامونا<sup>۲</sup> در منطقه پایین دستی هیمالیا، استفاده کامل از نیروی برق رودخانه تونس<sup>۳</sup> در مابین مناطق ایچاری<sup>۴</sup> و خودری<sup>۵</sup> است. یک سد انحرافی در ایچاری و یک تونل تحت فشار به طول ۶/۲۵ کیلومتر با قطر ۷ متر از ایچاری تا چیبرو<sup>۶</sup> به همراه نیروگاه برقی با ظرفیت ۲۵۰ مگاوات، مهمترین بخش این پروژه می‌باشند. بخش دوم پروژه، تونلی به طول ۵/۶ کیلومتر با قطر ۷/۵ متر مابین چیبرو و خودری است تا از آن برای تخلیه نیروگاه برق چیبرو استفاده شود. یک نیروگاه سطحی با ظرفیت ۱۲۰ مگاوات در خودری جهت تأمین ارتفاع آزاد ۶۴ متری ساخته شد.

ساخت تونل در بخش دوم آن هم‌زمان در چیبرو و خودری آغاز شد. در نزدیکی محل کالوار<sup>۷</sup> دالانی مابین این دو نقطه، جهت بازرسی و مشاهده رفتارهای توده‌های سنگی در منطقه گسل به سوی سطح فوقانی تونل ساخته شد (شکل ۲۰-۱). در ادامه از این دالان جهت حفر تونل اصلی در این منطقه با استفاده از دو جبهه کاری جدید، استفاده گردید.

---

1 Trust Zone  
2 Yamuna  
3 Tons  
4 Ichari  
5 Khodri  
6 Chhibro  
7 Kalawar





## ۲۰-۲- زمین شناختی منطقه، مشکلات حفر تونل و گزینه‌های مختلف طرح

نقشه زمین شناسی منطقه توسط اودن<sup>۱</sup> (۱۹۳۴-۱۹۴۲) و سپس توسط مهتا<sup>۲</sup> (۱۹۶۲) و کریشناسوامی<sup>۳</sup> (۱۹۶۷) تهیه گردید. بر اساس مشاهدات در تعدادی از چاه‌ها، مته چال‌ها، ترانشه‌ها و ویژگی‌های سطحی در منطقه، اطلاعات تکمیلی توسط شامه<sup>۴</sup> و همکاران در سال ۱۹۷۳ ارائه شد که در شکل ۱-۲۰ آورده شده است.

## ۲۰-۲-۱- روند زمین ساخت

ادن (۱۹۳۴) زمین ساخت منطقه مابین ادچاری و خودری را از شمال تا جنوب به شرح ذیل بیان نمود:

- تخته سنگ‌های سیملا <sup>۶</sup>	مرز راندگی جانسار ساپنکلین <sup>۵</sup>
- نامولیتیکس <sup>۷</sup>	
- راندگی تن <sup>۸</sup>	
- کوارتزیت‌های ناگست <sup>۹</sup>	
- رشته‌های چاندپور <sup>۱۰</sup>	
- رشته‌های ماندهالی <sup>۱۱</sup>	
- راندگی کرول <sup>۱۲</sup>	
- نامولیتیکس <sup>۱۳</sup>	
- راندگی ناهان <sup>۱۴</sup>	
- رشته‌های ناهان <sup>۱۵</sup>	

- 
- 1 Auden
  - 2 Mehta
  - 3 Krishnaswami
  - 4 Shome
  - 5 Thrust Bound Jaunsar Syncline
  - 6 Simlaslates
  - 7 Nummulitics
  - 8 Tons thrust
  - 9 Nagthat quartzites
  - 10 Chandpur series
  - 11 Mandhali series
  - 12 Krol thrust
  - 13 Nummulitics
  - 14 Nahan thrust
  - 15 Nahan series



### ۲۰-۲-۲- سنگ شناسی

تونل چیبرو-کودری از شمال تا جنوب از سه چینه بندی ذیل شکل گرفته است:

<ul style="list-style-type: none"> <li>- لوحه سنگ‌ها</li> <li>- تخته سنگ‌های کوارتزی و گرافیتی</li> <li>- کوارتزهای بهادرج<sup>۱</sup> عرض هر واحد ۵-۱۰ متر</li> <li>- کوارتزهای شکسته نزدیک روندگی کرول</li> </ul>	رشته‌های ماندهالی
راندگی کرول	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- ۱ تا ۳ متر ضخامت رسهای سیاه پلاستیک در طول ناحیه مرزی روندگی، شیل‌های قرمز و اروغانی و لای سنگ‌ها</li> <li>- کوارتزهای سبز و خاکستری فرعی، ۲۲ متر ضخامت رسهای سیاه با اتصال نازک کوارتز</li> <li>- ۵ تا ۱۰ متر ضخامت رسهای سیاه پلاستیک در طول ناحیه مرزی روندگی ناهان</li> </ul>	رشته‌های سوباسو- داگشای <sup>۲</sup>
راندگی ناهان	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- ماسه سنگ میکادار خاکستری متمایل به سبز تا خاکستری</li> <li>- لای سنگ‌های ارغانی</li> <li>- رسهای منجمد قرمز، ارغانی، خاکستری و آبی خالدار</li> </ul>	رشته‌های ناهان

امتداد منطقه‌ای این چینه بندی با شیب نرمال ۲۰ تا ۳۰ درجه در جهت NNW تا NNE در سمت مخالف جریان رودخانه با مسیر تونل برخورد می‌کند.

### ۲۰-۲-۳- ویژگی‌های ساختاری

مهمترین ویژگی ساختاری در این منطقه دو گسل مرزی است که از منطقه پنجاب تا آسام در امتداد تپه ماهوری هیمالیا قرار دارد. این گسل‌ها در رودخانه تونس نزدیک خادار و تعدادی آبراهه نزدیک کالوار مشاهده شده است. این گسل‌ها با کمک چندین مته چال، چاهک و ترانشه شناسایی گردید (تصویر ۱-۲۰). شیب سرازیری راندگی‌های ناهان و کرول از ۲۷ تا ۳۰ درجه دقیقاً در جهت N10°E تا N10°W و ۲۶ درجه در جهت N26°W متفاوت است. امتداد نسبت به مسیر تونل تقریباً نرمال است.

### ۲۰-۲-۴- مشکلات پیش روی تونلسازی و طرح‌های جایگزین

کریشناسوامی (۱۹۶۷) مشکلات زمین‌های مجاله شده در ناحیه داخل راندگی را پیش‌بینی نمود و نشان داد که ممکن است حجم فراوان آب در سنگ‌های کوارتز شکسته ماندهالی جمع شده

1Bhadraj

2Subathu-Dagshaiseries



باشد. در نتیجه کریشناسوامی و جالوت<sup>۱</sup> (۱۹۶۸) سعی کردند از ناحیه داخل راندگی فاصله بگیرند و یا طول تونل عبوری از این قسمت را کاهش دهند. آنها چندین طرح جایگزین تونل مستقیم پیشنهاد کردند. این طرح‌ها به همراه هزینه‌های آن در جدول ۲۰-۱ و شکل ۲۰-۱ آمده است.

جدول ۲۰-۱- طرح‌های جایگزین برای پروژۀ برق آبی یامونا، مرحله دوم- قسمت سوم (شکل ۲۰-۱)

افزایش هزینه نسبت به طرح اولیه (میلیون روپیه)	شماره و جزئیات طرح
ناچیز	۱- طول ۵/۵ کیلومتر و ۷ تا ۷/۵ متر قطر تونل مستقیم AE، عرض داخل ناحیه راندگی برابر ۸۰۰ متر
اندک	۲- طول ۵/۶ کیلومتر و ۷ تا ۷/۵ متر قطر تونل مستقیم E، AK <sub>g</sub> ، باپیچ خوردگی در K <sub>g</sub> نزدیک روستای کالوار با عرض داخل ناحیه راندگی برابر ۲۳۰ متر
۳۳/۸	۳- ۵۱ متر ارتفاع زمین و سد راکفیلی در نزدیک کلاسی، طول ۳ کیلومتر و ۷ متر قطر تونل AB، ناحیه راندگی حذف شد.
۶۸/۴	۴- طول ۲/۴ کیلومتر و ۷ متر قطر تونل AB، ۳۰ متر ارتفاع و ۱/۶ کیلومتر امتداد مخزن BC در کالوار و ۲/۸ کیلومتر طول و ۷ متر قطر تونل CE، مخزن باز از میان ناحیه راندگی
۲۲/۳	۵- جایگزینی مخزن باز در کالوار طرح ۴ با کانال باز BC به طول ۱/۵ کیلومتر، کانال باز از میان ناحیه راندگی
۲۲/۱	۶- سد بتنی به ارتفاع ۵۰ متر در دهائیرا <sup>۲</sup> ، طول ۱/۲ کیلومتر و ۸ متر قطر تونل A2B، ۱/۲ کیلومتر کانال باز BC در کالوار و ۲/۸ کیلومتر طول و ۷ متر قطر تونل CE، کانال باز از میان ناحیه راندگی

با در نظر گرفتن ملاحظات هزینه‌ای طرح شماره ۲ با پیچ در کالوار پذیرفته شد. اگر چه طول تونل در مقایسه با تونل مستقیم به مقدار ۰/۴ کیلومتر افزایش یافت اما طول عبوری از ناحیه راندگی از ۸۰۰ متر به ۲۳۰ متر کاهش پیدا کرد. شکل ۲۰-۲ مقاطع زمین شناختی را در طول مسیر نشان می‌دهد.

## ۲۰-۲-۵- روی دادن مجدد راندگی در داخل زمین

علاوه بر حضور ناحیه راندگی در کالوار، تونل در مسیر خود در فواصل ۱۱۴۰ تا ۱۳۰۰ متری از انتهای چمبرو، شیل‌های قرمز در داگشایی را، قطع می‌کند. یک چال مته در فاصله ۱۱۸۰ از



چیبرو در سقف تونل با زاویه انحراف ۶۰ درجه شرقی، حضور ناحیه راندگی کرول را محرز کرد. سرانجام جین<sup>۱</sup> (۱۹۷۵) تفسیر مبتکرانه‌ای از اطلاعات زمین شناختی ارائه داد و وجود یکسری گسستگی گسلی مابین چیبرو و کالوار را ما بین فواصل ۱۸۶۱ و ۲۱۶۶ متری از چیبرو را پیش بینی نمود که یک سوم عرض آن دارای راندگی می‌باشد. بنابراین عرض کلی ناحیه راندگی در مقایسه با عرض پیش بینی شده ۲۳۰ متر در طول مسیر تونل، به ۶۹۵ متر رسید. در نتیجه زمین شناختی زیر سطحی و طبقه بندی صحیح سنگ‌ها ضرورت یافت. مشکلات فراوانی در ساخت تونل در ناحیه راندگی زمین پدیدار گردید. از روش چند مقطعی برای جلوگیری از ریزش مکرر سنگ‌ها در جبهه کار استفاده شد. پایلوت مرکزی با فورپولینگ<sup>۲</sup> حفاری گردید. کمانهای فولادی سنگین (با مقطع ۱۴۰×۳۰۰ میلی متر و ۱۵۰×۱۵۰ میلی متر با ورق‌هایی به ضخامت ۲۰-۲۵ میلی متر که به بالها جوش داده شده بود) در فضای ۰/۵۰-۰/۲۵ متر (طبق جدول ۴-۲۰ و تصویر ۱۱-۲۰) بکار گرفته شد تا بر فشار بالای لهیدگی غلبه کند.

### ۲۰-۲-۶- تقسیم بندی تونل اصلی به سه تونل کوچکتر

پروژه به دلیل کاهش پیشرفت حفر تونل (برای ۵ تا ۶ متر در هر ماه) در ناحیه راندگی زمین، تا شش سال به تعویق افتاد. با این روند، ۵ سال و نیم نیاز بود تا مابقی ۶۹۵ متر تونل از دو طرف حفر شود. در این مرحله حفر سه تونل کوچکتر را برای جایگزینی تونل اصلی مطرح گردید (۵ متر قطر حفاری شده). بنابراین حفر تونل مرکزی در اواخر سال ۱۹۷۶ آغاز و در اواسط سال ۱۹۷۹ به پایان رسید. با فرض اینکه حفر دو تونل دیگر نیز همین مقدار زمانبر باشد، بنابراین حداقل ۶ ماه در کل پروژه صرفه جویی شده است. بنابراین تقسیم و شاخه‌بندی تونل اصلی به سه تونل کوچکتر عاقلانه نبوده است. اگرچه حفر همزمان سه تونل می‌توانست سریع‌تر باشد.

### ۲۰-۲-۷- سیلاب در تونل کالوار

در نوامبر ۱۹۷۲، آبهای جمع‌شده در توده سنگ‌ها به طور ناگهانی لایه‌های سنگی رسوبی نفوذناپذیر را در ناحیه کرال سوراخ کردند و از سقف تونل در فاصله ۱۸۲ متری سمت چیبرو از

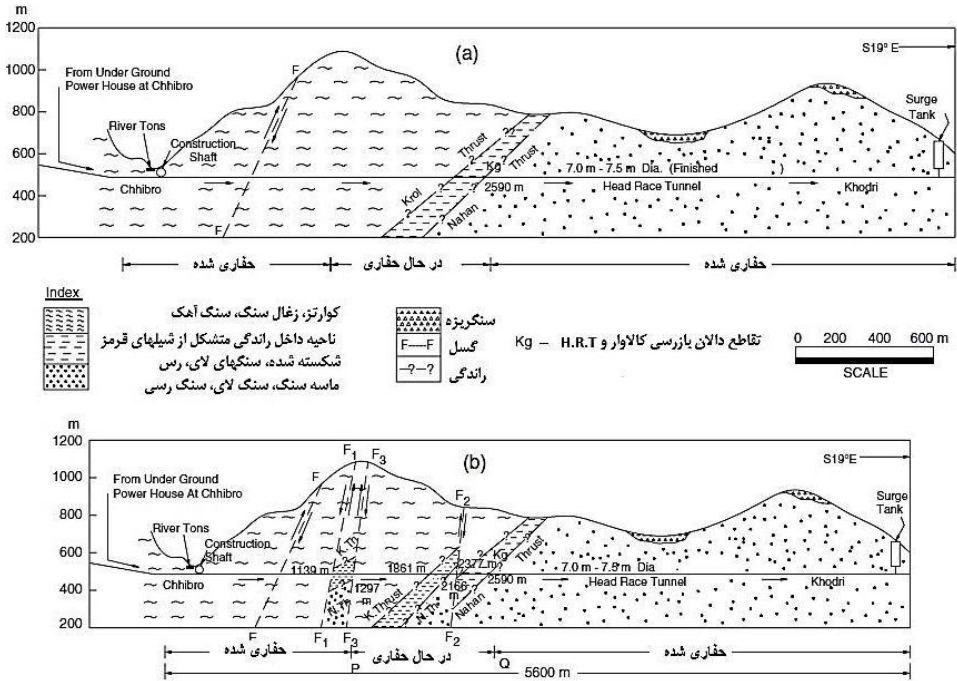
1 jain

2forepoling

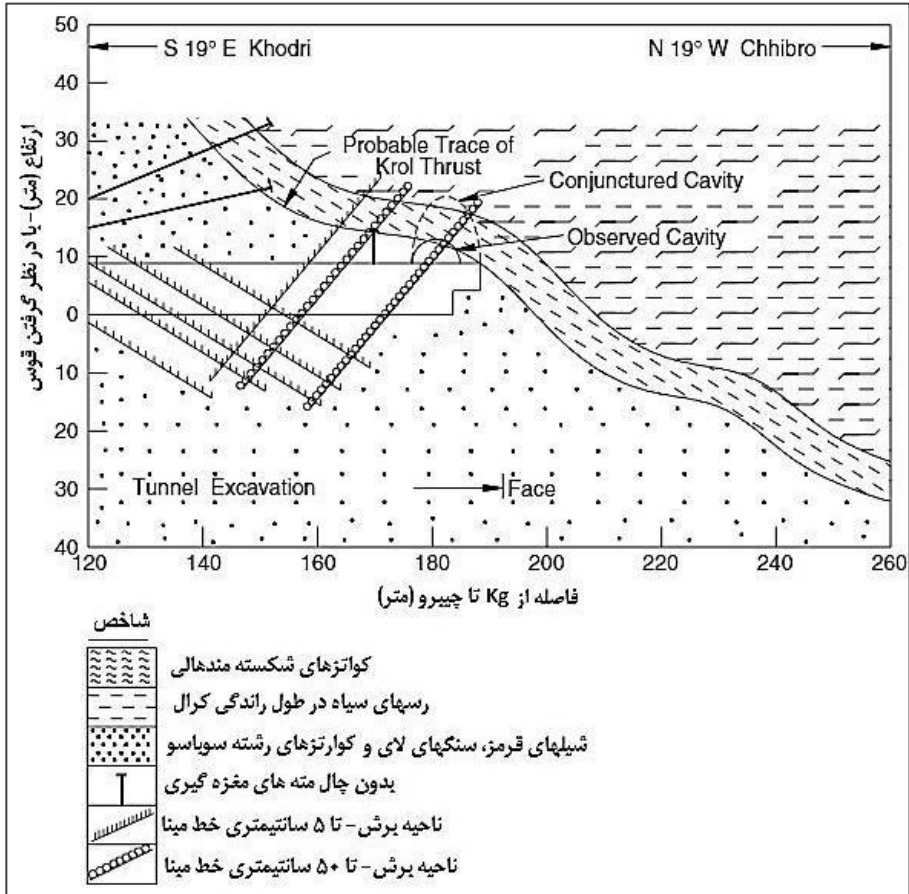
نقطه  $K_g$ ، در نقطه محل تلاقی دالان بازرسی و تونل اصلی، به داخل تونل سرازیر شد و سیلاب تمامی تونل را در بخش کلاوار فرا گرفت. شکل (۲۰-۳) جزئیات زمین شناختی محدوده محل تلاقی دالان بازرسی و تونل اصلی، را نشان می‌دهد. میزان سیلاب حدود ۳۴ لیتر بر ثانیه بود و ۱۱۰۰۰۰ متر مکعب آب در سه ماه تخلیه شد.

### ۲۰-۲-۸- خواص توده سنگ‌ها

ویژگی‌های شیل‌های قرمز و خاکهای سیاه سوباسو در جداول ۲۰-۲a و ۲۰-۲b آمده است. این نمونه‌ها از دالان بازرسی در کلاوار و آبراهه نزدیک کالا-آم<sup>۱</sup> جمع آوری گردید.



شکل ۲۰-۲-الف- نقشه‌های اولیه زمین شناسی در امتداد تونل چمبرو-خودری-۱۹۴۲ و ب- نقشه‌های اصلاح شده زمین شناسی در امتداد تونل چمبرو-خودری-۱۹۷۵



شکل ۲۰-۳- نقشه زمین شناسی در محل رخداد سیلاب در تونل کالوار

جدول ۲۰-۲- الف- خصوصیات شیل‌های قرمز و رس‌های سیاه

رسپهای سیاه		شیل‌های قرمز		مشخصات
کلا-آمب	کلاوار	کلا-آمب	کلاوار	
خصوصیات عمومی				
-	۲/۶۴	-	۲/۷۳	وزن مخصوص (g/cm <sup>3</sup> )
۲/۱	-	۱/۴۳-۱/۶۸	-	وزن مخصوص خشک طبیعی (g/cm <sup>3</sup> )
-	۱/۸۸	-	۱/۸۶	وزن مخصوص در درصد رطوبت صفر (g/cm <sup>3</sup> )
۱۸/۹۵	۱۱/۷	۹/۵	۸/۰۲	درصد رطوبت طبیعی
-	۱۶/۲۵	-	۷/۳۲	درصد رطوبت بهینه

رس‌های سیاه		شیل‌های قرمز		مشخصات
کلا-آمب	کلاوار	کلا-آمب	کلاوار	
دانه بندی (درصد)				
۳۸-۵۰	۱۰/۵۰		۵۸/۴۰	شن- بالای ۲ میلی‌متر
	۳/۵۰		۲/۵۰	ماسه خیلی درشت- ۱ تا ۲ میلی‌متر
	۲/۰۰	۷۸-۸۴	۲/۰۰	ماسه درشت- ۰/۵ تا ۱ میلی‌متر
	۱/۵۰		۱/۵۰	ماسه متوسط- ۰/۲۵ تا ۰/۵ میلی‌متر
	۳/۵۰		۱/۵۰	ماسه ریز- ۰/۱ تا ۰/۲۵ میلی‌متر
	۲۱/۲۰		۰/۴۶	ماسه خیلی ریز- ۰/۰۵ تا ۰/۱ میلی‌متر
	۲۳-۲۹	۲۶/۰۵	۹-۱۴	لای- ۰/۰۵ تا ۰/۰۵ میلی‌متر
۲۷-۳۳	۳۱/۷۵	۷	رس- کمتر از ۰/۰۵ میلی‌متر	
آنالیز شیمیایی- درصد				
۵۳/۰۰	۷۲/۵۵	۵۶/۴۲	۷۳/۵۴	اکسید سیلیسیم
۳/۱۴	۷/۳۲	۱/۴۰	۶/۹۳	اکسید آهن
۳۰/۹۸	۱۵/۵۲	۲۹/۰۰	۱۲/۹۳	اکسید آلومینیم
۱/۱۰	۲/۱	۱/۰۰	۱/۴۰	اکسید کلسیم
۱/۳۰	-	۲/۰۰	-	اکسید منیزیم
۳/۶۵	-	۲/۳۰	-	گوگرد
حدود اتربرگ-درصد				
۳۶/۰-۵۲/۵	۱۶/۰-۴۴/۳	۲۱/۰-۶۵/۰	۱۲/۰-۱۶/۰	حد روانی
۱۹/۸-۲۱/۰	۱۲/۰-۲۲/۷	۱۵/۰-۱۶/۸	۱۳/۰-۲۲/۷	حد خمیری
-	۴/۰-۲۶/۶	۴/۳-۴۰/۰	۳/۰	نشانه خمیری
پارامترهای مقاومت				
۱/۳۵	۰/۳۳	۲/۵۴	۲۱/۰	مقاوت فشاری محدود نشده ( $\text{kg/cm}^2$ )
۰/۱۸	۰/۲۰-۰/۴۲	۰/۲۹	۱/۰	چسبندگی ( $\text{kg/cm}^2$ )-درصد رطوبت بهینه
-	۰/۳۵-۰/۶۱	-	-	چسبندگی ( $\text{kg/cm}^2$ )-حالت اشباع
۰/۱۸	۱۲/۰	۳/۰	۸/۵۴	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)- درصد رطوبت بهینه
-	۱۱/۵	۲۸/۰	-	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)- حالت اشباع
۵۵	-	۶۰	-	تورم آزاد-درصد
ترکیب مینورالوژی <sup>۱</sup> رس				
۳۵	-	۳۵	-	آیلیت <sup>۲</sup>
۱۵	-	۲۵	-	کائولینیت <sup>۳</sup>

1Mineralogical

2Illite

3Kaolinite





رسهای سیاه		شیل‌های قرمز		مشخصات
کلا-آمب	کلاوار	کلا-آمب	کلاوار	
۱۰	-	۱۰	-	کلرید <sup>۱</sup>
۱۵	-	۱۵	-	آتاپولگیت <sup>۲</sup>
۵	-	۰	-	مونموریلونیت <sup>۳</sup>
۵	-	۵	-	میکا <sup>۴</sup>

جدول ۲۰-۲-ب- مدول‌های تغییر شکل شیل‌های قرمز و رس‌های سیاه

مدول تغییر شکل (۱۰ <sup>۳</sup> کیلوگرم بر سانتیمتر مربع)		روش	نوع سنگ	محل
عمودی	افقی			
۱۲/۱۸	۲/۷	آزمایش طاقت صفحه ای <sup>۵</sup>	رسهای سیاه	دالان بازرسی کلاوار
۶/۱۰	-	آزمایش جک مسطح <sup>۶</sup>		
-	۱/۴۰۵	آزمایش طاقت صفحه ای	رسهای سیاه	تونل پایلوت با قطر ۳ متر
حداقل	۳/۷	آزمایش فشار شعاعی تیواگ <sup>۷</sup>	شیل‌های قرمز	تونل پایلوت با قطر ۳ متر
حداکثر	۳۵/۲			
متوسط	۱۹/۵			

## ۲۰-۳- فعالیت زمین‌ساختی و پوشش تونل

### ۲۰-۳-۱- تاریخچه زلزله

محل پروژه در گرهوآل<sup>۸</sup> در پایین‌دست هیمالیا و در مجاورت مرز گسل قرار دارد. از این منطقه تعدادی گسل ثانویه و ناحیه‌های راندگی زمین عبور می‌کند که به داشتن فعالیت‌های زمین‌ساختی شدید معروفند. سن این فعالیت‌ها مشخص نیست اما اودن (۱۹۳۴) بر این باور است که راندگی کرول ممکن است نتیجه فعالیت‌های زلزله‌ای در دوره طولانی از زمان ماقبل پلیوس<sup>۹</sup> تا ما بعد پلیوس باشد. در سالهای اخیر مهمترین زمین لرزه که در نزدیکی این منطقه

1Chloride

2Attapulgate

3Montmorillonite

4Mica

5Plate-bearingtest

6Flatjacktest

7Tiwaq radial Press test

8Garhwal

9pliocene

گزارش شده است مربوط به سال ۱۹۰۵ می‌باشد که کانون آن مابین مناطق کانگرا<sup>۱</sup> و داراهامشالا<sup>۲</sup> بود. در اثر این زمین لرزه شهر دهرادان<sup>۳</sup> نسبت به موسوری<sup>۴</sup>، ۰/۱۳ متر بالاتر آمده است. از دیگر نکات فعالیت زمین‌ساختی تخته سنگ‌های عظیم کوارتزی (به اندازه ۵ متر) برش یافته و ساییده شده در روستایی نزدیک کالا- آمب می‌باشد.

### ۲۰-۳-۲- اندازه گیری حرکت زمین‌ساختی

اگراوال و گائور<sup>۵</sup> (۱۹۷۱) یک ستون سنگی بر روی ماسه سنگ واقع در ناهان و ستونی دیگر بر روی خاک روسی واقع در سوباسو در میان راندگی ناهان در محل تلاقی دالان بازرسی را نصب و ثابت نموده‌اند (تصویر ۴-۲۰) آنها جابه‌جایی قائم ما بین دو ستون را از طریق تیلتمتر لوله آبی<sup>۶</sup> اندازه گرفتند. بعد از گذشت سه سال پی بردند میزان جابه‌جایی نسبتی قائم در راندگی ناهان، در هر ماه بین ۰/۴ تا ۱ میلی متر متغیر است. اما آنها پذیرفتند قسمت اعظم این جابه‌جایی ممکن است در اثر لهیدگی خاک رس بوده و نتیجه‌گیری کردند که میزان جابه‌جایی زمین‌ساختی عمودی در راندگی ناهان ۰/۵ میلی‌متر در ماه است. بعد از آن جسوا و سینگ (۱۹۷۳) گزارش کردند میزان جمع‌شدگی شعاعی خاک رس در سال دوم بعد از حفاری، برابر با ۱ میلی‌متر در هر ماه در جهت عمودی بوده است.

یک نوع انبساط سنج تک نقطه‌ای میله‌ای چال‌مته‌ای در عرض راندگی زمین ناهان در دالان بازرسی کالاوار نصب شد تا میزان حرکت نسبی ماسه سنگ ناهان و شیل قرمز سوباسو را اندازه‌گیری نماید. (تصویر ۵-۲۰) مشاهدات در طول شش ماه هیچ حرکت و جابه‌جایی را در عرض راندگی زمین ناهان نشان نداده است. نتیجه‌گیری مشاهدات فوق نشان می‌دهد که لهیدگی خاک رس هنگام ارزیابی لغزش گسل نباید نادیده گرفته شود.

### ۲۰-۳-۳- پوشش انعطاف پذیر تونل

با توجه به یافته‌های اگراوال و گائور (۱۹۷۱) و کریشنا (۱۹۷۴) پیشنهاد شد که پوشش تونل برای ناحیه راندگی زمین باید بگونه‌ای طراحی شود که جابه‌جایی عمودی حدود ۰/۵ متر در طول

1Kangra

2Dharamshala

3Dehradun

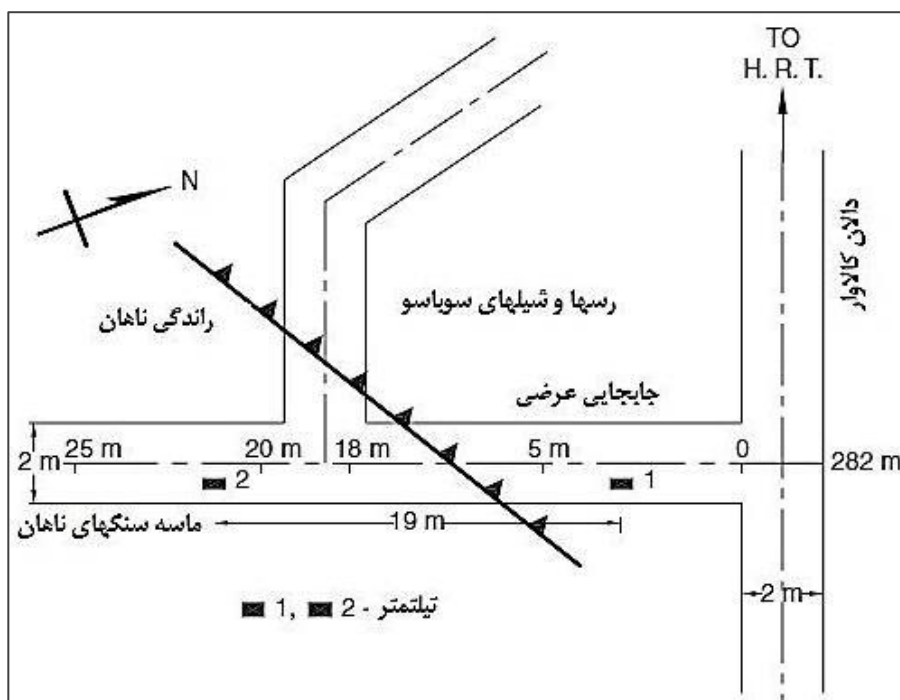
4Mussoorie

5AgrawalandGaur

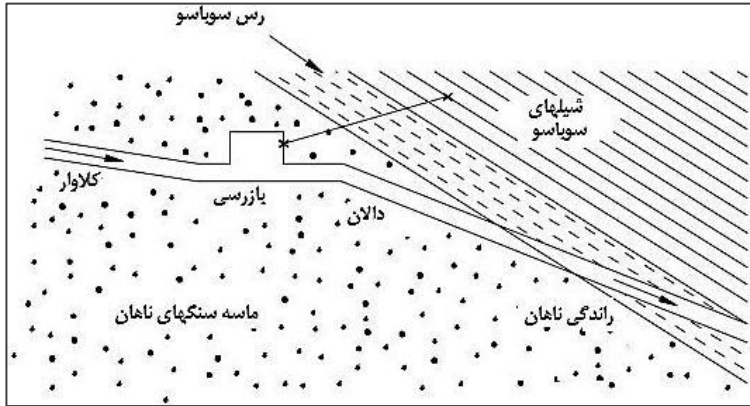
6water-tubetiltmeter

عمر پروژه (۱۰۰ سال) در نظر گرفته شود. همچنین آنها فرض کردند که لغزش کلی بصورت یکپارچه در عرض ناحیه راندگی زمین توزیع گردد.

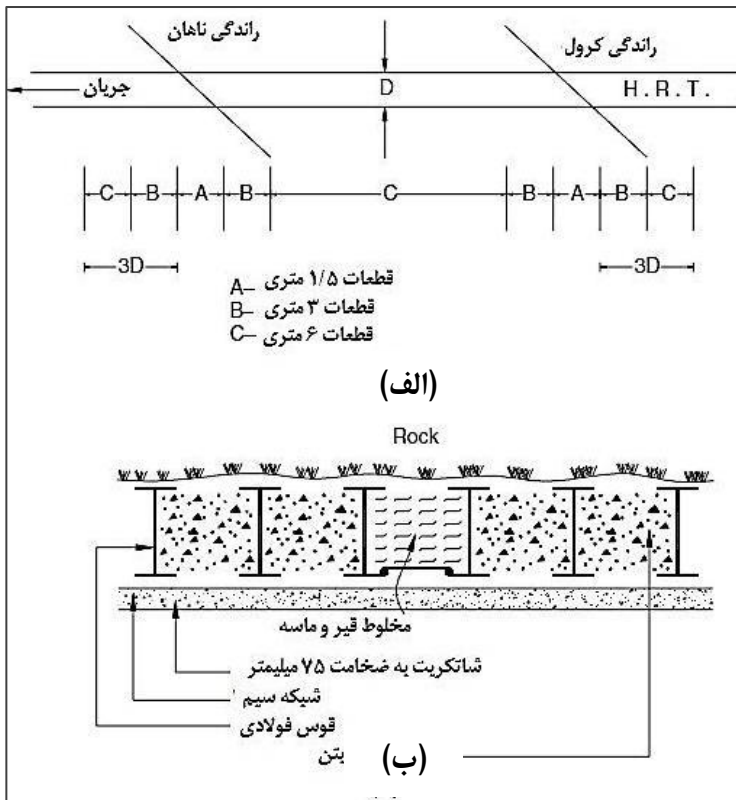
با توجه به فرض فوق، پوشش انعطاف‌پذیر برای مقابله با لغزش زمین‌ساختی پیشنهاد گردید (شکل ۲۰-۶)، که آن شامل قطعات دایره‌ای شکل با طول‌های متفاوتی می‌شود که با درزهای قابل انعطاف به هم متصل می‌باشند. همان‌طور که برک و بایرلی در توضیح مکانیزم زلزله بوسیله عارضه "stick-slip" بیان نمودند، برخلاف فرض فوق، لغزش زمین‌ساختی در منقار گسل‌های ضخیم ممکن است در امتداد هر یک از صفحات اتفاق بیافتد. منحصراً با توجه به موارد فوق نمی‌توان گفت گسل فعال است. اگر هم این تصور درست باشد ارائه پوشش تونل با فرض توزیع یکنواخت، لغزش زمین‌ساختی در سراسر عرض ناحیه راندگی زمین، محل بحث می‌باشد.



شکل ۲۰-۴- پلان پایه‌های تیلتمتر برای اندازه‌گیری حرکات زمین‌ساختی در طول ناحیه راندگی ناهان



شکل ۲۰-۵- چینش شماتیک برای اندازه‌گیری جابجایی‌ها در ناحیه راندگی ناهان با انبساط‌سنج نقطه‌ای میله‌ای چال‌مته‌ای



شکل ۲۰-۶- پوشش انعطاف‌پذیر تونل در داخل ناحیه راندگی (الف) قطعات پوشش (ب) درزه‌های انعطاف‌پذیر

## ۲۰-۴- ساخت تونل و تجهیزسازی در ناحیه رانش - داخلی در کالوار<sup>۱</sup>

### ۲۰-۴-۱- رفتار تکیه‌گاهی در دالان بازرسی کالوار

تیرک‌های فولادی برای دالان بازرسی کالوار، تحت یک پوشش حداکثر ۲۸۰ متری، ابتدا برای ضریب بار سنگ ترزاقی<sup>۲</sup> (۱۹۴۶) برابر  $1.1 (B+H_t)$  طراحی شدند که  $B$  عرض و  $H_t$  ارتفاع دهانه است (جدول ۲۰-۳). این حالت مطابق با فشردن سنگ‌ها در اعماق متوسط می‌باشد. مشاهده شد که سطح آب کمتر از معکوس تونل است ولی برای هدف طراحی، بالاتر از دالان شناسایی تونل لحاظ شد. برای جلوگیری از تغییر شکل تیرک، ضریب بار سنگ به آرامی به ۳.۵  $(N+H_t)$  افزایش یافت که معادل با فشردن سنگ‌ها در «اعماق زیاد» می‌باشد.

### ۲۰-۴-۲- ساخت تونل

یک تونل راهنما با قطر ۳/۰ متر در هر دو طرف از  $K_g$  ساخته شد. در سنگ‌های رسی سرخ سوباثو<sup>۳</sup> این قطر از طرف چیبرو<sup>۴</sup> از یک نقطه<sup>۵</sup> ۳۶ متری دورتر از  $K_g$ ، به ۹/۰ متر افزایش یافت. تونل با روش چند-رانشی<sup>۶</sup> حفاری شد. دالان شناسایی آن توسط قوس‌های فولادی نیم‌دایره‌ای با پشت‌بندهای معکوس موقت برای مقاومت در برابر فشارهای جانبی تحمل می‌شد (شکل ۲۰-۷). رانش ناهان<sup>۶</sup> در تونل راهنما در فاصله ۴ متری از  $K_g$  به طرف خودری<sup>۷</sup> قرار داده شد در حالیکه رانش کرول<sup>۸</sup> در فاصله ۱۹۰ متری از  $K_g$  به سمت چیبرو قرار داده شد. آردگسل در ناحیه رانش داخلی با عرض ۲۳۰ متر شامل رس نرم و سیاه خمیری در طول‌های ۱۶ متر و ۲ متر در جهت رانش‌های به ترتیب ناهان و کرول بود و از سنگ رس قرمز خرد شده بریده شده و موزائیکی شده و سنگ‌های لای در یک طول ۲۱۲ متری بین لابه‌های رس سیاه تشکیل شده بود.

1 Kalawar

2 Terzaghi

3 Subathu

4 Chhibro

5 Multi-drift method

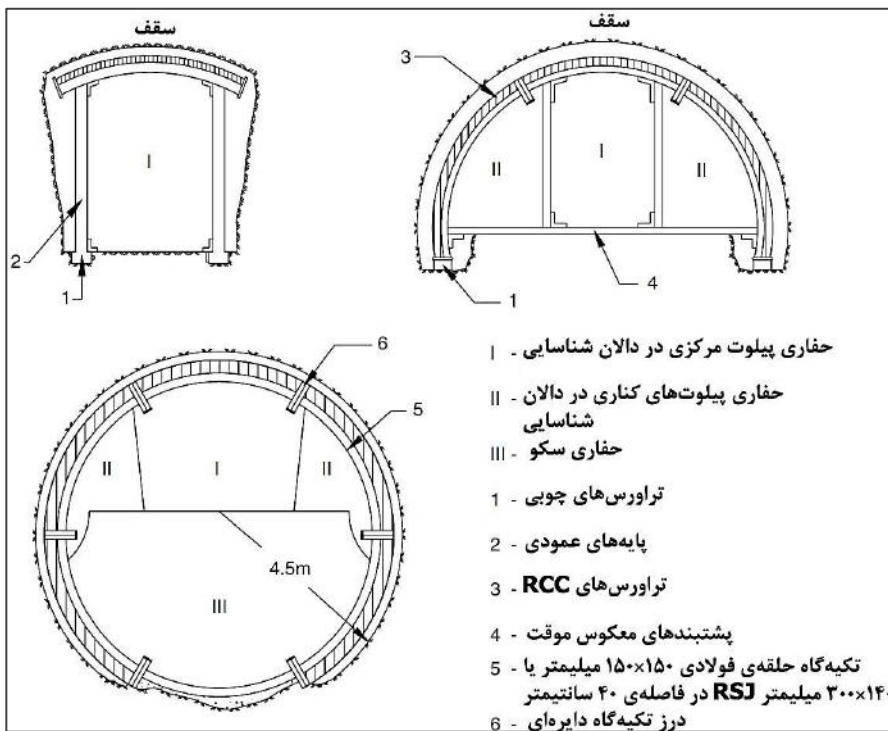
6 Nahan

7 Khodri

8 Krol

### ۲۰-۴-۳- تجهیز سازی

نیاز به تجهیزات تونل برای ایجاد یک سیستم تکیه‌گاهی معقول احساس شد که بتواند بر شرایط فشاری زمین موجود در ناحیه رانش داخلی فائق آید. برنامه تجهیز سازی شامل اندازه‌گیری: (الف) بار حلقوی در قوس‌های فولادی توسط سلول‌های بار هیدرولیک (ب) فشار تماسی در فصل مشترک تحمل شونده توسط سنگ با سلول‌های بار تماسی (ج) «بستار تونل» تعریف شده به صورت کاهش اندازه دهانه، توسط یک نوار فولادی معمولی تا دقت  $\pm 1$  میلی‌متر و (د) «توسعه چاه آزمایشی» (تعریف شده به صورت حرکت نسبی بین محیط تونل و داخل توده سنگ) توسط کشش سنج چاه آزمایشی میله‌ای تک نقطه (ارتفاع برابر با قطر دهانه) تا دقت  $\pm 0/02$  میلی‌متر.



شکل ۲۰-۷- دنباله حفاری و تکیه‌گاه برای تونل اصلی از طریق ناحیه رانش داخلی در کالاوار



جدول ۲۰-۳- جزئیات تکیه‌گاه در دالان بازرسی کالاوار

رفتار تغییر شکلی تکیه‌گاه‌ها (چشمی)	فاصله (mm)	جزئیات تکیه‌گاه		فشار تکیه‌گاهی معادل (kg/cm <sup>2</sup> )		ضریب بار سنگ فرض شده (ترزاقی، ۱۹۴۶)		نوع سنگ	قطعه رودخانه (m)
		سطح مقطع (mm)	شکل و اندازه	عمودی	افقی	افقی	عمودی (H <sub>p</sub> )		
تغییر شکل شدید تیرک، خم شدن معکوس و باد کردن ساق‌های عمودی در دهانه	۵۰۰	۱۰۰ × ۷۵	تیرک‌های D شکل با معکوس، H <sub>t</sub> =2.5 m B=2.0 m	۴/۴۸	۱/۳۰	0.3 (H <sub>p</sub> +H <sub>t</sub> )	1.1 (B+H <sub>t</sub> )	رس سیاه	۱۶۰ تا ۲۷۳
مانند بالا	۲۵۰	مانند بالا	مانند بالا	۰/۸۳	۲/۵۷	0.3 (H <sub>p</sub> +H <sub>t</sub> )	2.1 (B+H <sub>t</sub> )	رس سیاه	۲۷۳ تا ۲۹۵
تغییر شکل متوسط تیرک	۲۵۰	مانند بالا	تیرک‌های دایره‌ای H <sub>t</sub> =B=3.0 m	۱/۲۸	۳/۴۴	مانند بالا	مانند بالا	رس سیاه	۲۹۵ تا ۳۷۸
تغییر شکل ناچیز تیرک	۴۰۰ تا ۶۰۰	۱۵۰ × ۱۵۰	مانند بالا	۵/۷۳	۵/۷۳	3.5 (B+H <sub>t</sub> )	3.5 (B+H <sub>t</sub> )	سنگ رسی سرخ	۳۷۸ تا ۴۴۰

نماد: B=عرض دهانه؛ H<sub>t</sub>=ارتفاع دهانه

این تجهیزات در «سازمان مرکزی تحقیقات معدن، هانباد (هند)» طراحی و ساخته شدند. مقاطع آزمایش با «خاکریز سست» و «خاکریز محکم» در سنگ رس‌های قرمز و رس‌های سیاه قرار داده شدند. خاکریز سست شامل یک لایه ضخیم ۳۰ سانتیمتری از گل تونل بود که به صورت دستی در چاله‌های اطراف قوس‌های فولادی ریخته شده بود. خاکریز محکم شامل بلوک‌های بتن سیمانی پیش‌ساخته متراکم شده به طور نظام‌مند<sup>۲</sup> بود.

### ۲۰-۴-۴- مقاطع آزمایش

تجهیزات پس از حفاری سریعاً در سطح تونل نصب شدند. تراکم تکیه‌گاه، نوع خاکریز و روش تونل‌زنی در هر دو طرف مقاطع آزمایش در یک طول برابر با قطر تونل، بدون تغییر نگهداشته شدند. جدول (۲۰-۴) موقعیت‌های مقاطع آزمایش، اندازه و شکل دهانه، جزئیات قوس‌های فولادی، نوع خاکریز و نتایج تجهیزسازی را توصیف می‌کند. هنگامیکه تونل راهنمای با قطر ۳/۰ متر تا قطر ۹/۰ متر عریض شد مقطع آزمایش ۵ در رس‌های سیاه (نزدیکی رانش ناهان) قرار داده شدند. شکل ۲۰-۸ نشان دهنده محل‌های مورد آزمایش و شکل ۲۰-۹ نشان دهنده تراکم تکیه‌گاه‌های ایجاد شده در این ناحیه است. مشاهدات نوعی فشار تکیه‌گاه و بستار تونل شعاعی و توسعه چاه آزمایشی در شکل (۲۰-۱۰) نشان داده شده‌اند.

1 Central Mining Research Institute, Dhanbad (India)

2 Systematically Packed PCC (precast cement concrete)



شکل ۲۰-۸- موقعیت‌های مقاطع آزمایش و جزئیات آن برای تجهیزسازی ناحیه رانش داخلی در کالاوار

جدول ۲۰-۳- محل مقاطع تست، نوع خاکریز و نتایج تجهیزسازی در ناحیه رانش داخلی در کالاوار

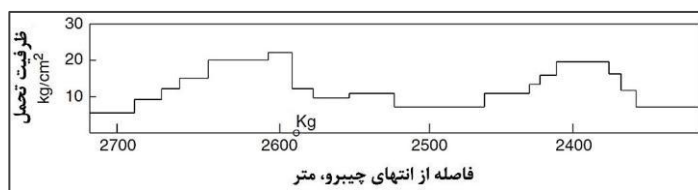
نتایج تجهیز کردن	دورهی مشاهدات روز	خاکریز	جزئیات تکیه‌گاه			روش معدنکاری	نوع سنگ	اندازه و شکل دهانه	فاصله از چپبرو (m)	تعداد مقاطع تست						
			ظرفیت (kg/cm <sup>2</sup> )	فاصله (mm)	اندازه (mm)											
											فشار (kg/cm <sup>2</sup> )					
$U_{bL}$ $U_{bR}$ $U_{bV}$ $U_{tL}$ $U_{tV}$ $P_H$ $P_V$																
۲۲-۵۲	۱۷۲-۰۶	۲۲-۵۸	۲۲۲۵	۴۲۶۵	۱۷۲۲	۳۲-۰۷	۱۵۵	محکم	۶	۵۰۰	۱۵۰×۱۵۰	سنگ رس سرخ	قطر ۳۲۰ متر تونل رانستما	۲۵۷۵	۱	
۲۲-۰۶	۱۷۱-۴	۰-۴-۲	-	-	-	-	۸۲۸	سست	۱۰	۴۱۵	۱۵۰×۱۵۰ یا ۱۶۰ میلیمتر ورق بر روی بال دوی هر دو بال خارجی	مانند بال	مانند تونل اساسی	۲۵۲۵	۲	
۰-۳۲۲	۱۷۵-۰	۳۲۷-۲	-	-	۰-۴	۰-۸	۸۲۴	مانند بال	مانند بال	مانند بال	مانند بال	مانند بال	مانند بال	۲۵۲۰	۳	
-	-	-	۱۴۳-۰	۱۳۴-۰	۲۲۲-۰	۳۲۲-۰	۷۵۸	مانند بال	۱۲	۲۵۰	مانند بال	تمام رخ افتخار متوسط	رس‌ها و سیله	قطر ۳۲۰ متر تونل رانستما	۲۶۲۱	۴
۲۲-۰۸	۱۶۲-۰	۵۵۱-۲	-	-	۱۲۲-۰	۱۱۵-۰	۲۱۹	محکم	۲۰	۳۲۵	۳۰۰×۱۴۰ یا ۲۰۰ میلیمتر ورق بر روی هر دو بال	مانند بال	مانند تونل اساسی	۲۶۳۱	۵	

توجه:  $P_V$  = فشار تکیه‌گاه در سقف؛  $P_H$  = فشار تکیه‌گاه در کناره‌ها؛  $U_{tV}$  = بستار تونل شعاعی در جهت عمودی؛  $U_{tL}$  = بستار تونل شعاعی در جهت افقی؛  $U_{bV}$  = توسعه‌ی چاه آزمایشی در سقف؛  $U_{bR}$  = توسعه‌ی چاه آزمایشی در دیوار راست؛  $U_{bL}$  = توسعه‌ی چاه آزمایشی در دیوار چپ؛  $P_H$  و  $P_V$  = فشار تماسی بین سنگ و تیرک؛  $C$  = بستار تونل؛  $L$  = بار حلقوی در تیرک‌ها؛  $B$  = توسعه‌ی چاه آزمایشی؛  $①$  تا  $⑤$  = مقطع تست.

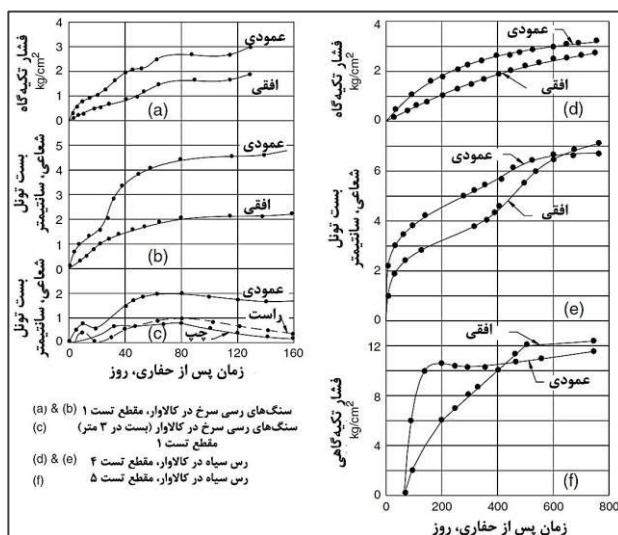


## ۲۰-۴-۵- طراحی تکیه‌گاه‌ها

خاکریزهای محکم به منظور به حداقل رساندن سستی توده سنگ در بالای دالان شناسایی تونل برای به حداقل رساندن خطر سیل استفاده شدند (هر چند که خاکریز سست بار سنگ را آزاد می‌کند). بنابراین فشارهای تکیه‌گاهی بیشتری فرض شد؛ برای مثال  $6/0 \text{ kg/cm}^2$  ( $0/6 \text{ MPa}$ ) در سنگ‌های رسی سرخ و  $20-22 \text{ kg/cm}^2$  ( $2/2 \text{ MPa}$  تا  $2/0 \text{ MPa}$ ) در رس‌های سیاه در برابر فشار تکیه‌گاه مشاهده شده به ترتیب  $3/07 \text{ kg/cm}^2$  و  $12/2$  ( $0/3 \text{ MPa}$  تا  $1/22$ ) (شکل ۲۰-۱۰، a و f). فشار تکیه‌گاه از  $6/0 \text{ kg/cm}^2$  ( $0/6 \text{ MPa}$ ) در قسمت وسط ناحیه رانش داخلی تا  $22 \text{ kg/cm}^2$  ( $2/2 \text{ MPa}$ ) در رس‌های سیاه در جهات رانش به آرامی افزایش یافت (شکل ۲۰-۹). تراکم تکیه‌گاهی در هر طرف ناحیه رانش داخلی به آرامی به  $6/0 \text{ kg/cm}^2$  ( $0/6 \text{ MPa}$ ) کاهش یافت. جایگذاری بعدی این تکیه‌گاه‌ها در بتن هیچ مشکلی نشان نداده است.



شکل ۲۰-۹- تراکم تکیه‌گاه در ناحیه رانش داخلی در کالوار



شکل ۲۰-۱۰- نمایش فشار تکیه‌گاه و بستر تونل شعاعی در سنگ‌های رسی و رس‌های سیاه در مقاطع

آزمایش تجهیز مختلف در کالوار

## ۲۰-۵- ساخت تونل و تجهیزات در ناحیه رانش-داخلی در چیپرو

### ۲۰-۵-۱- ساخت تونل

زمین‌شناسی محلی و جزئیات ساخت تونل در این ناحیه در شکل (۲۰-۱۱) نشان داده شده‌اند. در ابتدا مواجهه غیرمنتظره با سنگ‌های رسی سرخ در ۱۱۳۹ متری در هنگام تونل‌زنی در چیپرو به عنوان یک رخداد موضعی در نظر گرفته شد و تراکم تکیه‌گاهی بدون تغییر نگه‌حفظ شد. با ادامه برخورد با سنگ‌های رسی سرخ، اینگونه تشخیص داده شد که به محل تقاطع با یک ناحیه ثانویه رانش-داخلی برخورده‌ایم. فشار تکیه‌گاهی در زیر ۱۱۸۵ متر به  $6/0 \text{ kg/cm}^2$  ( $0/6 \text{ MPa}$ ) (در کالاوار) افزایش یافت. حفاری تمام رخ با روش دالان شناسایی و سکو جایگزین شد. دالان شناسایی توسط روش چند-رانشی حفاری شد تا از افت مکرر سستی در سطح جلوگیری شود. از آنجایی که پشت‌بندهای معکوس تهیه نشدند ساق‌های تکیه‌گاه‌های نیم‌دایره‌ای دالان شناسایی آزاد نگهداشته شدند تا تحت فشار جانبی حرکت کنند. کمانه کردن و خم شدن شدید تکیه‌گاه‌ها با وجود افزایش ظرفیت‌شان به  $17/0 \text{ kg/cm}^2$  ( $1/7 \text{ MPa}$ ) ادامه یافت. می‌توان گفت که تکیه‌گاه‌های نسبتاً سبک‌تر (ظرفیت  $6 \text{ kg/cm}^2$ ) تنها تغییر شکل‌های کمی در توده سنگ مشابه در کالاوار، که پشت‌بندهای معکوس موقت در دالان شناسایی ایجاد شدند، داشتند (شکل ۲۰-۷).

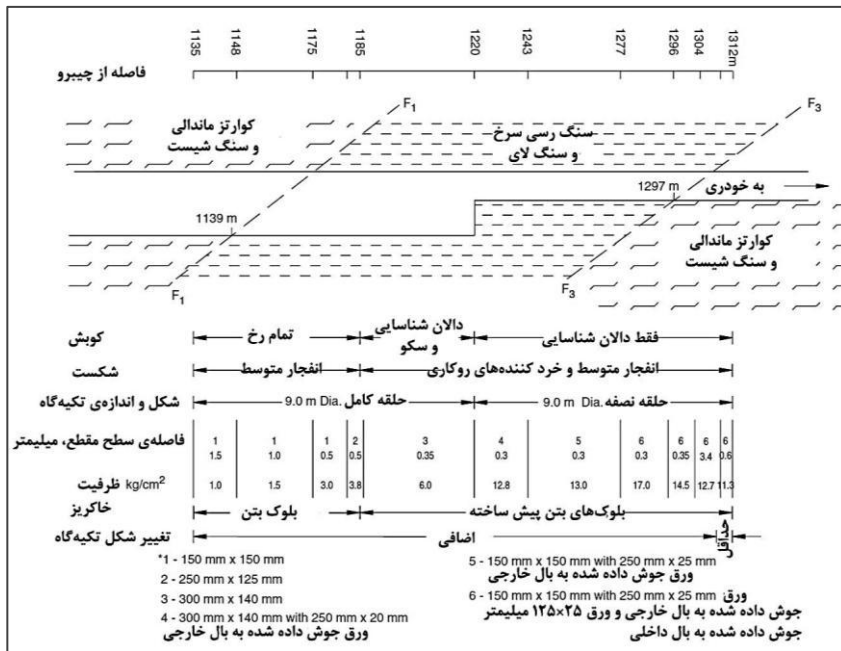
### ۲۰-۵-۲- تجهیزسازی

پس از مشاهده تغییر شکل شدید مقاطع قوس فولادی سنگین که در توده سنگ مشابه در کالاوار کافی بود، لازم شد که در این ناحیه تجهیزات‌سازی تونل انجام شود. تجهیزات به اندازه-گیری این موارد کمک می‌کردند: (الف) تحمل فشار توسط سلول فشار و (ب) بستار تونل توسط یک نوار فولادی معمولی.

**فشار تکیه‌گاهی**، چهار سلول فشار تماسی، دو تا در  $30^\circ$  و دو تا در  $60^\circ$  عمود بر روی یک نوار فولادی نیم‌دایره‌ای با قطر  $9/0$  متر در ۱۱۹۹ متری دالان شناسایی نصب شدند (شکل ۲۰-۱۲). سکو حفاری شد و نصفه پایینی تیرک ۱۱۵ روز پس از حفاری دالان شناسایی برپا شد. خاکریز حاوی بلوک‌های بتن پیش ساخته کاملاً متراکم بود. فشار تکیه‌گاهی مشاهده شده از  $6/5$  تا  $13/0 \text{ kg/cm}^2$  ( $0/65 \text{ MPa}$ ) تا  $1/3$  مگاپاسکال تغییر کرد که فشار تکیه‌گاهی میانگین  $\text{kg/cm}^2$



۱۰/۷۵ (۱/۰۷۵ MPa) در جهت عمودی را می‌داد. از دست رفتن مقاومت تکیه‌گاه در اثر حفاری سکو، فشارهای تکیه‌گاهی مشاهده شده را به طور موقت کاهش داد.



شکل ۲۰-۱۱- طرح زمین‌شناسی و جزئیات ساخت تونل هدایت آب به توربین از طریق ناحیه رانش داخلی در چمبرو

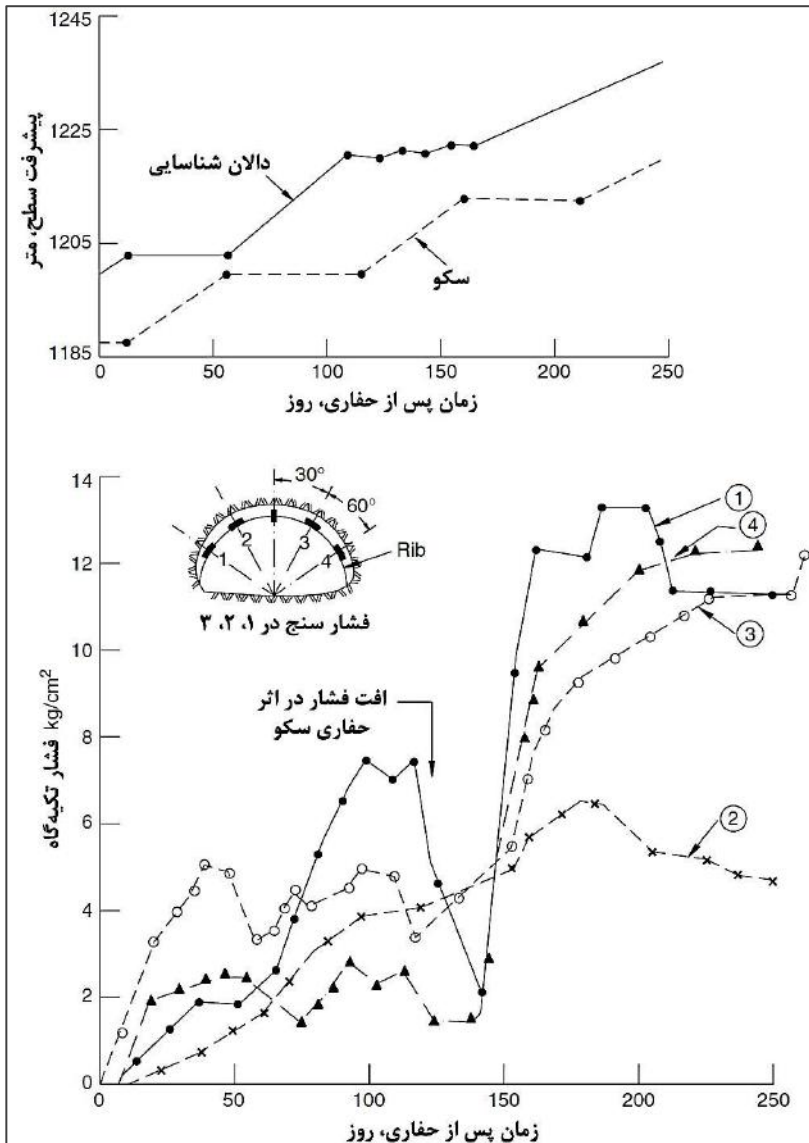
بستار تونل، بستارهای تونل در جهت‌های افقی و عمودی در بیست و سه محل در این ناحیه اندازه‌گیری شد. یک نمودار نوعی از بستار شعاعی نسبت به زمان (شکل ۲۰-۱۳) نشان می‌دهد که کناره‌های دهانه نیم‌دایره‌ای به اندازه ۲۰ سانتیمتر فشرده شده است در حالی که سقف حدود ۸ سانتیمتر به طرف بالا رانده شده است. یک طرح تغییر شکل مشابه در این ناحیه از ۱۲۲۰ تا ۱۲۹۵ متر مشاهده شد (جایی که حفاری سکو یک سال به تأخیر افتاد و تکیه‌گاه دالان شناسایی مشکل نبود پشت‌بندهای معکوس را داشت). جزئیات بیشتر در قسمت ۱۴-۸ داده شده‌اند.

## ۲۰-۶- نظریه کشسان-خمیری

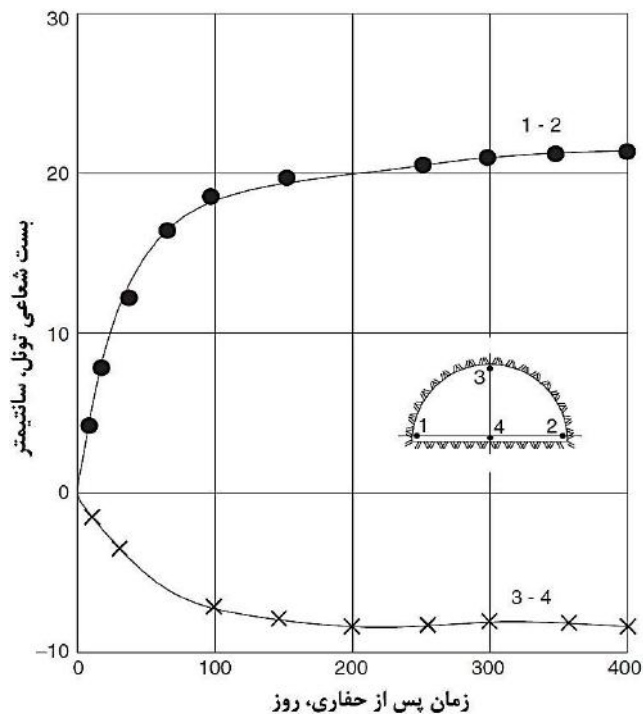
تجهیز کردن تونل تحت شرایط کوبش زمین که در دو ناحیه رانش داخلی وجود داشت کمک کرد که به سوالات زیر پاسخ داده شود:

(الف) اثر عمق تونل بر روی فشار تکیه‌گاهی چیست؟

- (ب) کدام روش برای بررسی فشار تکیه‌گاهی مناسب است؟  
 (ج) کاربرد سیستم تکیه‌گاهی انعطاف‌پذیر شامل خاکریز سست پشت قوس‌های فولادی چیست؟  
 (د) چطور باید از پایداری دهانه تونل مطمئن شد؟



شکل ۲۰-۱۲- فشار تکیه‌گاه نسبت به زمان در سنگ‌های رسی سرخ در چمبرو



شکل ۲۰-۱۳- بستار تونل شعاعی نسبت به زمان در سنگ‌های رسی سرخ در چیبرو

## ۲۰-۶-۱- اثر عمق تونل بر روی فشار تکیه‌گاهی

طبق نظریه کشسان-خمیری، شکست توده سنگ اطراف دهانه تحت اثر فشار عمقی، تشکیل یک ناحیه خرد شده می‌دهد که به آن «پوشش تابوت<sup>۱</sup>» گفته می‌شود. فرآیند شکست مربوط به انبساط حجمی توده سنگ شکسته است و به صورت فشردن در دهانه خود را نشان می‌دهد (لاباسه<sup>۲</sup>، ۱۹۴۹؛ رابویز<sup>۳</sup>، ۱۹۶۴، ۱۹۶۵، ۱۹۶۹؛ دامن<sup>۴</sup>، ۱۹۷۵). مفهوم «خط مشخصه<sup>۵</sup>» یا «منحنی واکنش زمین<sup>۶</sup>» توضیح دهنده این است که فشار تکیه‌گاه با عمق افزایش می‌یابد و این امکان را فراهم می‌آورد که بستارهای تونل ثابت نگهداشته شوند. علاوه بر آن بستارهای

1 Coffin cover

2 Labasse

3 Rabcewicz

4 Daemen

5 Characteristic line

6 Ground reaction curve



تونل بزرگ مربوط به انبساط ناحیه شکسته هستند که منجر به فشارهای تکیه‌گاهی کاهش یافته می‌گردد (فصل ۱۹ را ببینید).

بستارهای تونل بالا و فشارهای تکیه‌گاهی مشاهده شده در سنگ‌های رسی سوپاثو-داگشای<sup>۱</sup> در عمق ۶۰۰ متری در چمبرو، همانطور که با بستارهای مشاهده شده در عمق ۲۸۰ متری در کالوار (جدول ۲۰-۵) مقایسه شدند، توسط جثوا<sup>۲</sup> و همکاران (۱۹۷۷) با کمک نظریه کشسان-خمیری توضیح داده شدند. این محققان از یک رابطه تجربی ارائه شده توسط کومورنیک<sup>۳</sup> و دیوید<sup>۴</sup> (۱۹۶۹) استفاده کردند تا فشار تورم را برآورد کنند و ملاحظه کردند که فشار تکیه‌گاه برابر با مجموع حاصل جمع حسابی کشسان-خمیری (فشرده شدن بعلاوه سست شدن) و فشارهای تورم بود. بعدها جی.جی.کا. دامن (ارتباطات شخصی، ۱۹۷۸)<sup>۵</sup> شبهاتی در مورد این روش ایجاد نمود، ولی سینق<sup>۶</sup> (۱۹۷۸) بر اندرکنش بین تورم و فشار کوبش تأکید کرد و پیشنهاد کرد که تنها بزرگ‌ترین این دو باید لحاظ شود. فشارهای میانگین کشسان-خمیری تخمین زده شده طبق برآوردهای سینق (۱۹۷۸) نزدیک به مقادیر مشاهده شده هستند (جدول ۲۰-۵). همینطور روش‌های تجربی ارائه شده برای تخمین فشار سنگ برای طراحی تکیه‌گاه تونل باید اصلاح شوند تا اثر عمق تونل را نیز در بر بگیرند تا نتایج قابل اعتمادی تحت شرایط فشردن سنگ بدست بدهند. ضریب تصحیح برای روبرار  $f$  در سیستم-Q (معادله ۵-۷) هم اکنون قبول شده است.

## ۲۰-۶-۲- تخمین فشار تکیه‌گاه و الزامات تکیه‌گاه

محدودیات روش ترزاقی (۱۹۴۶) برای تخمین الزامات تکیه‌گاه در دالان بازرسی کالوار قبلاً مورد بحث قرار گرفته است. فشار مشاهده شده به طور چشمگیری کمتر از مقادیر تخمین زده شده در عمق بیشتر بود (جدول ۲۰-۵). علاوه بر آن نسبت فشار تکیه‌گاه مشاهده شده در چمبرو (برای تونل با قطر ۹/۰ متر) نسبت به کالوار (برای تونل ۳/۰ متر) در سنگ‌های رسی سرخ حدود ۳/۶ است؛ این نسبت برای مقادیر تخمین زده شده به ۵/۰ افزایش می‌یابد (چون

1 Subathu-Dagshai

2 Jethwa

3 Komornik

4 David

5 J.J.K. Daemen (personal communication, 1978)

6 Singh



فشار تکیه‌گاه با اندازه دهانه در روش ترزاقی افزایش می‌یابد) یعنی این فشارها برای یک دهانه بزرگ بیش از مقدار واقعی تخمین زده می‌شوند.

جدول ۲۰-۵- مقایسه فشارهای تکیه‌گاه تخمین زده شده و مشاهده شده

مقدار میانگین فشار تکیه‌گاه مشاهده شده (kg/cm <sup>2</sup> ) و دوره مشاهده	فشار تکیه‌گاه تخمین زده شده (kg/cm <sup>2</sup> )												موقعیت و عمق	نوع توده سنگ	شماره دهانه کروی		
	مطابق با تحقیق بارتون و همکاران (۱۹۷۴)																
	مطابق با نظریه کشسان-خمیری		فشار تکیه‌گاه میانگین		کیفیت توده سنگ Q	دسته‌بندی پارامترها						مطابق با تحقیق ترزاقی (۱۹۴۶)					
	دیوار	سقف	دیوار	سقف		SRF	J <sub>w</sub>	J <sub>a</sub>	J <sub>r</sub>	J <sub>s</sub>	RQD	دیوار				سقف	
۱/۲۲	۳/۰۷	۵/۱۱	۵/۱۱	۳/۷	۳/۷	۰/۰۲۵ تا ۰/۱	۵ تا ۱۰	۱/۰	۴/۰	۱/۵	۱۵	۱۰ تا ۲۰	۳/۴	۳/۴	۱/۵	سنگ‌های رسی	کالاور
۱۵۵ روز																$\gamma = 2.73 \text{ gm/cc}$	
۱۲/۲۰	۱۱/۵۰	۱۱/۲۰	۱۱/۲۰	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۹/۹۸	۹/۹۸	۴/۵ متر	سنگ‌های رسی	۲۸۰ متر
۷۱۹ روز																$\gamma = 2.64 \text{ gm/cc}$	
-	۱۰/۷۵	۱۱/۵۱	۱۱/۵۱	۴/۸	۴/۸	۰/۰۱۲۵ تا ۰/۰۵	۱۰ تا ۲۰	۱/۰	۴/۰	۱/۵	۱۵	۱۰ تا ۲۰	۱۷/۲۰	۱۷/۲۰	۴/۲ متر	سنگ‌های رسی	۳۰۰ متر
۲۵۷ روز																$\gamma = 2.73 \text{ gm/cc}$	

همچنین جدول ۲۰-۵ شامل پارامترهای دسته‌بندی توده سنگ طبق روش بارتون<sup>۱</sup> و همکاران (۱۹۷۴) می‌باشد. یک تخمین معقول از فشار تکیه‌گاه برای شرایط فشاری در عمق متوسط توسط این روش بدست می‌آید. با این حال در شرایط فشاری سنگین این روش بررسی نامطمئن‌تری در عمق‌های بالاتر نتیجه می‌دهد. علاوه بر این، این روش تمایل دارد که فشار تکیه‌گاه را برای دهانه‌های با اندازه کوچک بیش از حد تخمین زده و برای دهانه‌های بزرگ کمتر از حد تخمین بزند احتمالاً به دلیل اینکه در آن هیچ توجهی به اندازه دهانه و مقدار فشار نشده است.

از بحث‌های بالا واضح است که نظریه کشسان-خمیری (دامن، ۱۹۷۵) ممکن است قابلیت اطمینان بیشتری نسبت به روش‌های تجربی ترزاقی (۱۹۴۶) و بارتون و همکاران (۱۹۷۴) برای تخمین فشارهای تکیه‌گاهی در شرایط فشاری سنگین در رس‌های نواحی رانش-داخلی داشته باشد.