فصلنامه دانش پیشگیری و مدیریت بحران/ دورهٔ یازدهم، شمارهٔ سوم، پاییز ۱۴۰۰
Disaster Prevention and Management Knowledge (DPMK)
Quarterly, Vol. 11, No.3, Serial 41 (Autumn 2021)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۱۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۱۴

Urban Geology effects of Sarpol-e-Zahab on the sensitivities of the implementation of two civil structures

Vahid Joudaki1*, Akbar Ghazifard2, Ebrahim Haghshenas3

1. MSc, Department of Engineering Services in Sarpol-e-Zahab and Bazideraz Project, Sahel Omid Iranian Consultant Engineers Co., Tehran, Iran.
2. Professor, Department of Engineering Geology, University of Isfahan, Isfahan, Iran.
3. Associate Professor, Department of Geotechnical engineering, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran

Abstract

Background and objective: Urban geology uses geological studies to manage risk of natural hazards and sustainable development in urban areas. In the circumstances that the geological hazards caused by the earthquake of November 12, 2017, had been sweeping the Sarpol-e-Zahab region, two underground tunnels were being excavated in the vicinity of the city. The negative effects of drilling operations of these two underground structures could intensify the crisis in the region.

Method: With the results of field visits and specialized texts review (articles, documents and reports), the geological hazards caused by the earthquake in Sarpol-e-Zahab region have been studied from the perspective of urban geological knowledge. Using the authors' executive experiences in the water transfer tunnels of Sarpol-e Zahab and Bazideraz, how to manage negative effects caused by drilling these underground structures (preventing the escalation of the crisis in the area) has been discussed.

Finding: The occurrence of earthquake has led to the occurrence of other geological hazards such as: "landslides, Rock Fall" and the region has experienced a pervasive crisis. In such circumstances, the tunneling operations intersected in places with surface water flows as well as with the city's transportation roads. The destructive effects of drilling operations of these tunnels could cause many problems (reduction of water resources, land subsidence and the problem of vehicle traffic on roads) and naturally the volume of problems of earthquake-stricken people increase.

Conclusion: The crises that occurred after the earthquake were directly and indirectly related to the geological characteristics of the city, so during the construction of tunnels, operational solutions tailored to the geological conditions were considered so that drilling machines safely cross high-risk areas and from the escalation of the social crises in the earthquake-stricken area be prevented.

Keywords: Urban Geology, Earthquake, Landslide, Rock Fall, Tunnel.

▶**Citation (APA 6th ed.):** Joudaki V, Ghazifard A, Haghshenas E. (2021, Autumn). Urban Geology effects of Sarpol-e-Zahab on the sensitivities of the implementation of two civil structures. *Disaster Prevention and Management Knowledge Quarterly (DPMK), 11*(3),238-254.

تأثیر زمین‌شناسیِ شهری سرپل‌ذهاب بر حساسیت‌های اجرای دو سازه عمرانی

وحید جودکی[1*]، اکبر قاضی‌فرد[2] و ابراهیم حق‌شناس[3]

۱.کارشناسی ارشد، واحد خدمات مهندسی تونل‌های انتقال آب سرپل‌ذهاب و بازی‌دراز، شرکت مهندسین مشاور ساحل امید ایرانیان، تهران Joudaki_vahid@yahoo.com

۲. استاد، گروه زمین‌شناسی مهندسی، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان، اصفهان a.ghazifard@sci.ui.ac.ir

۳. دانشیار، گروه مهندسی ژئوتکنیک، پژوهشکده بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران haghshen@iiees.ac.ir

چکیده

زمینه و هدف: زمین‌شناسیِ شهری به کاربرد مطالعات زمین‌شناسی جهت مدیریت مخاطرات طبیعی و توسعه پایدار در مناطق شهری می‌پردازد. در شرایطی که مخاطرات زمین‌شناسی ناشی از زلزلهٔ ۲۱ آبان ۱۳۹۶، منطقه سرپل‌ذهاب را فرا گرفته بود، در مجاورت شهر دو تونل زیرزمینی در حال اجرا بود. تأثیرات منفی سازه‌ها، می‌توانست موجب تشدید بحران در منطقهٔ زلزله‌زده گردد.

روش: با نتایج بازدیدهای میدانی و مرور متون تخصصی و ادبیات فنی (مقالات، اسناد و گزارشات)، مخاطرات زمین‌شناسی ناشی از زلزله در منطقه سرپل‌ذهاب، از دیدگاه دانش زمین‌شناسیِ شهری مورد بررسی قرار گرفته است و با استفاده از تجربیات کاری مؤلفین در تونل‌های سرپل‌ذهاب و بازی‌دراز، به چگونگی مدیریت تأثیرات منفی ناشی از حفاری این سازه‌ها (جلوگیری از تشدید بحران در منطقهٔ زلزله‌زده) پرداخته شده است.

یافته‌ها: رخداد زمین‌لرزه، زمینه‌ساز وقوع مخاطرات دیگر زمین‌شناسی نظیر:»زمین‌لغزش، بهمن سنگی" گردیده و منطقه دچار بحرانی فراگیر شده است. در چنین شرایطی عملیات حفاری تونل‌ها نیز در نقاطی با جریان آب‌های زیرزمینی-سطحی و نیز با جاده‌های مواصلاتی شهرستان تلاقی پیدا می‌کرد. تأثیرات مخرب عملیات حفاری می‌تواند موجب بُروز مشکلات فراوان (کاهش منابع آب، نشست زمین و مشکل تردد وسایل نقلیه در جاده‌ها) گردد و طبیعتاً بر حجم مشکلات مردم زلزله‌زده بیفزاید.

نتیجه‌گیری: بحران‌های ناشی ازَ زلزله، به‌طور مستقیم و غیر مستقیم با خصوصیات زمین‌شناسی شهری مرتبط بوده‌اند، لذا در زمان اجرای تونل‌ها نیز، راه‌کارهایی عملیاتی متناسب با شرایط زمین‌شناسی، لحاظ گردید تا ماشین‌های حفار به شکل َایمن از محدوده‌های پُرخطر عبور نمایند و از تشدید بحران‌های اجتماعی موجود در منطقهٔ زلزله‌زده، جلوگیری به عمل آید.

واژگان کلیدی: زمین‌شناسیِ شهری، زمین لرزه، زمین‌لغزش، بهمن سنگی، تونل.

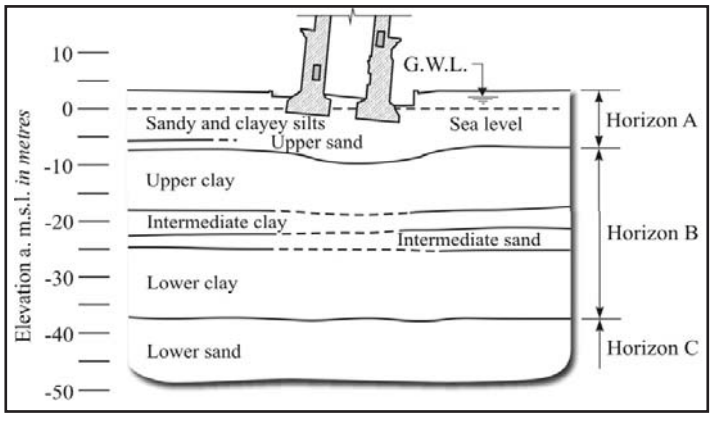
◀ **استناد فارسی (شیوه APA، ویرایش ششم ۲۰۱۰)**: جودکی، وحید؛ قاضی‌فرد، اکبر؛ حق‌شناس، ابراهیم. (پاییز، ۱۴۰۰). تأثیر زمین‌شناسیِ شهری سرپل‌ذهاب بر حساسیت‌های اجرای دو سازه عمرانی. *فصلنامه دانش پیشگیری و مدیریت بحران، ۱۱* (۳)،۲۳۸-۲۵۴.

مقدمه

زمین‌شناسیِ شهری یکی از شاخه‌های کاربردی در حوزه علوم زمین می‌باشد که البته در ایران گرایشی جدید و تقریباً ناشناخته محسوب می‌گردد. واژه زمین‌شناسیِ شهری برای نخستین بار توسط سازمان زمین‌شناسی آمریکا مطرح گردیده است (مک‌گیل[1]، ۱۹۶۲). زمین‌شناسیِ شهری اطلاعاتی در مورد محیط‌های زمین‌شناسی به عنوان اساس علمی برای برنامه‌ریزان و مهندسین جهت مدیریت کاربری زمین و توسعه شهری فراهم می‌کند (ال‌می[2] و همکاران، ۲۰۱۰). هدف این علم، مطالعه اثرات حاصل از برهم‌کنش انسان و طبیعت در محیط زمین‌شناسیِ مناطق شهری و تهیه اطلاعات زمین‌شناسی به منظور محافظت و توسعهٔ پایدار در مناطق شهری می‌باشد (کالشاو و پرایس[3]، ۲۰۱۰). عامل شکل‌گیری شهرهای باستانی متأثر از شرایط ژئومورفولوژی، ذخایر آب زیرزمینی، رودخانه‌ها، حاصلخیزی خاک، منابع معدنی (برای ساخت ساختمان‌ها و یا تولید انرژی) و ... بوده است که همگی این موارد به ساختارها و تشکیلات زمین‌شناسی مناطق بستگی دارند (لگت[4]، ۱۹۶۹؛ باترلوس[5]، ۲۰۰۷؛ مارکر[6]، ۲۰۱۶). شناخت پدیده‌های زمین‌شناسی (نوع و توزیع سنگ‌ها و خاک‌ها، تحولات ژئومورفولوژیکی گذشته و ...)، نه تنها برای شهرهای قدیمی، بلکه برای توسعه مناطق شهری امروزی نیز یک نیاز اساسی می‌باشد (مللی[7] و همکاران، ۲۰۲۱).

گزارشات متعددی از همجواری سازه‌های انسانی با مخاطرات زمین‌شناختی و طبیعی، نظیر زمین‌لرزه (ژنگ[8] و همکاران، ۲۰۲۰)، آتشفشان (پتروسینو[9] و همکاران، ۲۰۲۱)، زمین‌لغزش (چپارو[10]، ۲۰۲۰)، فرونشست (بورلند[11] و همکاران، ۲۰۰۹)، سیل (لیو[12] و همکاران، ۲۰۲۰)، تغییرات اقلیمی (بلاشل[13] و همکاران، ۲۰۱۹) و... در مناطق شهری منتشر شده است.

در مواجهه با این مخاطرات؛ تأمین ایمنی سکونتگاه شهروندان و نیز حفظ پایداری سازه‌های تاریخی (شکل ۱)، تنها به واسطه توسعه مطالعات زمین‌شناسیِ شهری امکان‌پذیر خواهد بود.



شکل ۱: بالا: برج کج پیزا در ایتالیا. پایین: تهیه پروفیل خاک و شناسایی خصوصیات زمین‌شناسی تشکیلات زیر پی برج به منظور مقاوم‌سازی سازه (بورلند و همکاران، ۲۰۰۹).

از مهم‌ترین اقدامات در زمینه مطالعات زمین‌شناسیِ شهری، گردآوری اطلاعات مهندسی و تهیه نقشه‌های زمین‌شناسی است که می‌تواند در تأمین امنیت سکونتگاه‌های شهری و پیشگیری از بحران‌ها نقش حائز اهمیتی داشته باشند. تدوین نقشه‌های پهنه‌بندی و تعیین محدوده‌های وقوع پدیده‌های مخاطره‌آمیز با میزان احتمالات مختلف مانند نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله و خطر روانگرایی و ... از ضرورت‌های اساسی برای توسعه مناطق شهری می‌باشد، اما به دلیل جدید بودن موضوع زمین‌شناسیِ شهری در ایران، همانند اغلب شهرهای کوچک کشور، در شهرستان سرپل‌ذهاب نیز، گردآوری چنین نقشه‌هایی جهت پیش‌بینی

1. McGill
2. El May
3. Culshaw & Price
4. Legget
5. Bathrellos
6. Marker
7. Melelli
8. Zheng
9. Petrosino
10. Chaparro
11. Burland
12. Liu
13. Blöschl

مخاطرات زمین‌شناختی و مدیریت ریسک‌ها صورت نگرفته است. رخداد زمین‌لرزه ۲۱ آبان ۱۳۹۶ خسارات سنگینی را در این شهر به دنبال داشته است. وقوع زمین‌لرزه موجب گردید که مخاطرات زمین‌شناسی دیگری (زمین‌لغزش، بهمن سنگی، جریان واریزه‌ای، روانگرایی) نیز در گسترهٔ شهرستان و روستاهای اطراف رخ دهد. به طور کلی مخاطرات زمین‌شناختی در منطقه مطالعاتی (مربوط به آبان ۱۳۹۶) شامل این موارد بوده است: - زمین‌لرزه - روانگرایی (ناشی از زمین‌لرزه) - زمین‌لغزش (ناشی از زمین‌لرزه) - ریزش و بهمن سنگی (ناشی از زمین‌لرزه) - جریان واریزه‌ای (ناشی از زمین‌لرزه)

در این مقاله به اثرات بحران‌ها و مخاطرات زمین‌شناختی ناشی از زمین‌لرزه بر حساسیت‌های اجرایِ دو سازه زیرزمینی در شهرستان سرپل‌ذهاب پرداخته می‌شود.

روش

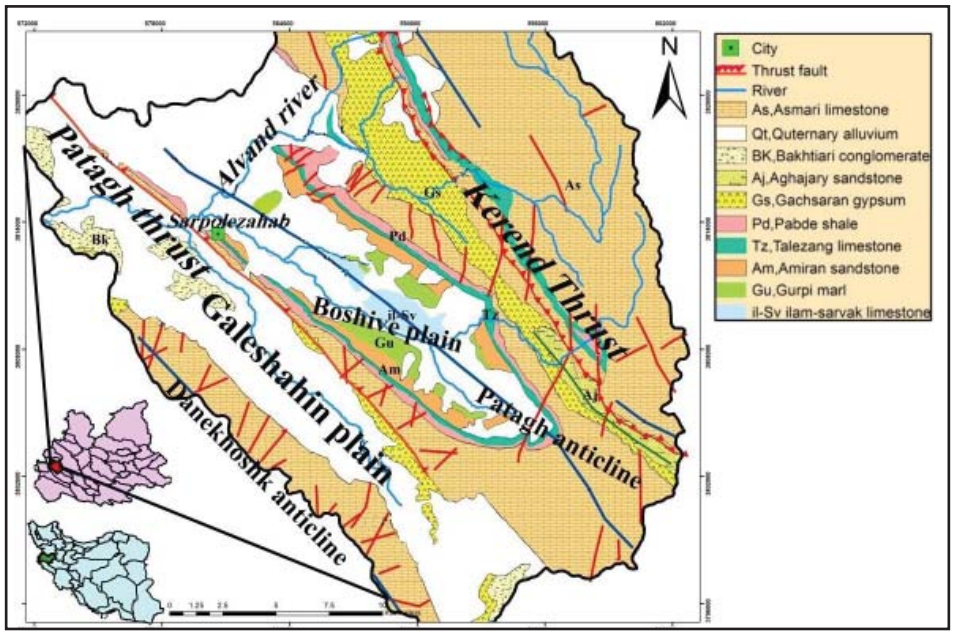
در این مقاله با نتایج بازدیدهای میدانی و مرور متون تخصصی و ادبیات فنی (مطالعهٔ مقالات، اسناد و گزارشات)، مخاطرات زمین‌شناسی ناشی از زلزله ۲۱ آبان ۱۳۹۶ در منطقه سرپل‌ذهاب، از دیدگاه دانش زمین‌شناسیِ شهری مورد بررسی قرار گرفته است و با استفاده از تجربیات اجرایی مؤلفین در تونل‌های انتقال آب سرپل‌ذهاب و بازی‌دراز، به چگونگی پیشگیری و مدیریت ریسک‌های محتمل ناشی از حفاری این سازه‌های زیرزمینی (به منظور جلوگیری از تشدید بحران‌های منطقهٔ زلزله‌زده) پرداخته شده است. بازدیدهای میدانی در منطقهٔ مطالعاتی و ساختگاه سازه‌های عمرانی مجاور شهر (تونل‌های سرپل‌ذهاب و بازی‌دراز) طی چند مرحله در بازه‌های زمانی بعد از زلزله (آبان تا اسفند سال ۱۳۹۶) انجام گرفته است و اطلاعات بر اساس مشاهدات عینی و ثبت روزانه گزارشات فعالیت‌های اجرایی، گردآوری شده است.

یافته‌ها

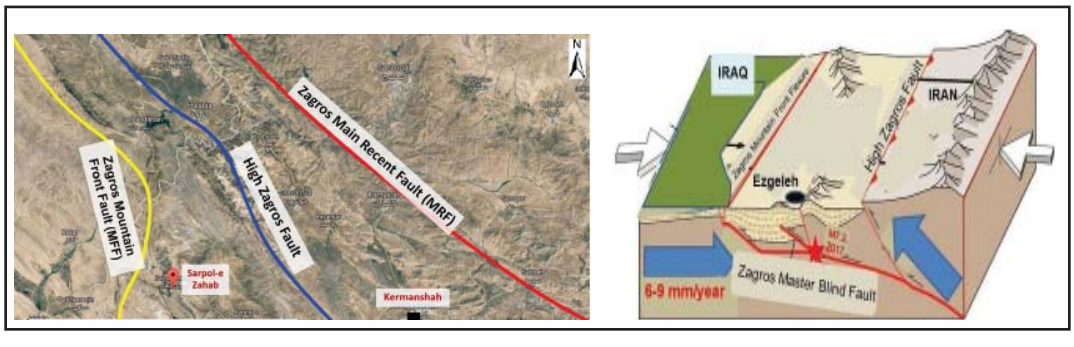
ساختگاه شهرستان سرپل‌ذهاب بر اساس تقسیم‌بندی کلی زمین‌شناسی ایران (آقانباتی، ۱۳۸۳)، در محدوده زاگرس چین‌خورده و بر روی کمربند لرزه‌خیز قرار دارد. ساختارهای زمین‌شناسی در منطقه سرپل‌ذهاب شامل تاقدیس‌ها[1] و ناودیس‌های[2] متوالی می‌باشد که تاقدیس‌ها بر ارتفاعات و ناودیس‌ها بر نواحی پَست و دشت‌ها منطبق گشته‌اند. امتداد سطح محوری این چین‌ها در جهت شمال غرب-جنوب شرق می‌باشد و از ساختار کلی چین‌های زاگرس تبعیت می‌کند. به دلیل قرارگیری در چنین شرایطی در حد فاصل بین تاقدیس‌ها، دشت‌های باریک و طویلی ایجاد شده است. از مهمترین ساختمان‌های تاقدیسی منطقه می‌توان به تاقدیس‌های پاتاق، دانه خشک و ریجاب اشاره نمود. به دلیل ازدیاد نیروهای فشارشی که از برخورد ورقه عربستان به صفحه ایران مرکزی ناشی میگردد، در بخش جنوب غربی اکثر چین‌های منطقه، گسل‌های معکوس ایجاد شده اند که نتیجهٔ عملکرد آن‌ها رانده شدن طبقات قدیمی بر روی طبقات جوان‌تر می‌باشد (کریمی و همکاران، ۲۰۰۴).

از مهمترین این گسل‌ها، گسل کرند-ریجاب در یال جنوب غربی تاقدیس ریجاب و گسل معکوس تیله یا پاتاق در یال جنوب غربی تاقدیس پاتاق را می‌توان نام برد، که سبب رانده شدن سازند آهکی آسماری بر روی طبقات گچی سازند گچساران شده است. محدوده مطالعاتی سرپل‌ذهاب، به دلیل قرارگیری در بین تاقدیس‌های آهکی واقع در شمال غربی زاگرس از منابع آبی کارستی مهمی برخوردار می‌باشد. وجود ساختمان‌های تاقدیسی و ناودیسی این محدوده را به دو دشت مجزا تفکیک می‌کند. این دشت‌ها شامل دشت بُشیوه در شرق محدوده و دشت قلعه‌شاهین در سمت غربی محدوده در حد فاصل تاقدیس‌های پاتاق و دانه خشک می‌باشد(شکل ۲).. در هر یک از این دشت‌ها آبخوان آبرفتی در بالا و آبخوان کارستی در زیر، تشکیل سفره‌های آب زیرزمینی مهمی داده‌اند. سازند آسماری آبخوان کارستی، دشت قلعه‌شاهین و سازند آهکی ایلام، آبخوان کارستی دشت بُشیوه را تشکیل می‌دهند. سازند کربناته آسماری پوشش ساختمان تاقدیس‌های منطقه را تشکیل داده است. این سازند از سنگ آهک توده‌ای تقریباً خالص و به شدت تکتونیزه تشکیل گردیده و به سبب داشتن درزه و شکستگی فراوان، پدیده کارست در آن توسعه یافته است. تخلیه آب این سازند از طریق چشمه‌های متعددی صورت می‌گیرد که در یال‌های مختلف تاقدیس‌ها واقع شده‌اند (محمدزاده و امیری، ۱۳۹۸).

1. Anticline
2. Syncline



شکل ۲: نقشه زمین‌شناسی در محدوده مطالعاتی شهرستان سرپل‌ذهاب (اقتباس از نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ قصر شیرین شرکت ملی نفت).



شکل ۳: راست: تصویر شماتیک از عملکرد گسل‌ها و کانون زلزله. چپ: موقعیت گسل‌های زاگرس در نزدیکی منطقهٔ آسیب دیده (زارع و همکاران، ۲۰۱۷).

از دیدگاه زمین‌شناسی، شهرستان سرپل‌ذهاب بر گستره‌ای از واحدهای سنگی سازندهای زیر:

"بختیاری، آغاجاری، گچساران، آسماری، پابده، تله زنگ، امیران، گورپی، ایلام، سروک» و نیز، آبرفت‌های کواترنری (شکل ۲)، قرار گرفته است.

از نظر رخنمون تشکیلات زمین‌شناسی سازند آهکی آسماری و رسوبات آبرفتی کواترنری بیشترین رخنمون را در محدوده مورد مطالعه دارند. هر دوی این تشکیلات در رخداد مخاطرات زمین‌شناسی ناشی از زلزله تأثیرگذار بوده‌اند و حساسیت‌های اجرایی تونل‌های مجاور شهر نیز به طور مستقیم تحت تأثیر خصوصیات سازند آسماری و آبرفت‌های کواترنری بوده است.

خطر زمین‌لرزه: زمین‌لرزه شامگاه ۲۱ آبان ماه ۱۳۹۶ در سرپل‌ذهاب با بزرگای گشتاوری ۷/۳ یکی از بزرگ‌ترین و مخرب‌ترین زمین‌لرزه‌های دو دهه اخیر ایران می‌باشد. دقیق‌ترین مکان‌یابی صورت گرفته (شبکه لرزه‌نگاری کشوری) بر قرار گرفتن کانون زمین‌لرزه، نزدیک به گسل جبهه کوهستان زاگرس در ۱۰ کیلومتری جنوب منطقه ازگله و حدود ۳۷ کیلومتری شمال غرب شهرستان سرپل‌ذهاب، در عمق حدود ۱۸ کیلومتری زمین دلالت دارد (شکل ۳).

تحلیل اولیه پس‌لرزه‌های ثبت شده در شبکه لرزه‌نگاری موقت، نشانگر وقوع آن‌ها در عمق‌های ۵ تا ۲۰ کیلومتری و فعالیت چند قطعه گسلی در منطقه می‌باشد. نتایج اولیه بر وجود حداقل سه روند گسلش مختلف دلالت دارد.

روند تقریباً شمالی-جنوبی مشابه با روند گسل اصلی مسبب زمین‌لرزه سرپل‌ذهاب، روند شمال غرب -جنوب شرق به موازات گسل پیشانی کوهستان و روند شرقی-غربی که احتمالاً متأثر از فعال شدن ساختارهای قدیمی در اثر تنش زیاد آزاد شده در حین زلزله اصلی می‌باشند. بررسی وسعت و شدت تخریب‌های شدید ساختمانی حاصل از زمین‌لرزه سرپل‌ذهاب، نشانگر این حقیقت می‌باشد که خسارات در مناطق و جهات خاصی در اطراف گسل مسبب تجمع یافته و از مقدار آن در دیگر مناطق به شدت کاسته شده است (تاتار و همکاران، ۱۳۹۶). بر اساس گزارشات محققان متعدد (شرفی و همکاران، ۱۳۹۸؛ کوشک‌زری، ۱۳۹۷؛ منیعی و همکاران، ۱۳۹۸)، عمده تخریب سازه‌ها در گستره شهر متأثر از عدم رعایت اصول مهندسی در مرحله احداث ساختمان‌ها بوده است (شکل ۴). به عنوان نمونه، در اثر این زمین‌لرزه، ساختمان‌های بیمارستان جدید شهر (افتتاح: شش ماه قبل از زلزله) دچار آسیب‌های شدید گردید (شکل ۵)، در صورتی‌که بررسی گزارش مطالعات ساختگاهی این بیمارستان در بانک اطلاعات ژئوتکنیک کشور (مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ۱۳۹۶) حاکی از آن می‌باشد که خاک ساختگاه از تراکم متوسط برخوردار بوده است. همچنین موارد زیر، قابل تأمل می‌باشند:

- تعداد ۶ گمانه اکتشافی با روش حفاری ماشینی به صورت خشک تا عمق ۷/۵ الی ۱۰ متر حفر شده است.
- بر اساس اطلاعات موجود در لوگ گمانه‌ها، جنس خاک از نوع ریزدانه رسی می‌باشد.
- به جز یک گمانه که در عمق ۸ متری به سطح آب برخورد گردیده است، بقیه گمانه‌ها فاقد سطح ایستابی می‌باشند.
- عدد حاصل از آزمایش صحرایی نفوذ استاندارد، در تمامی گمانه‌ها حدود ۳۰ متر می‌باشد.
- نتایج وزن مخصوص خشک خاک به طور تقریبی ۱/۶۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد که نشان از تراکم متوسط خاک دارد.

شواهد حاکی از آن می‌باشد که مشکلی از بابت پی ساختمان‌های بیمارستان وجود نداشته است (سلامت، ۱۳۹۶)، لذا می‌توان گفت که دلیل تخریب ساختمان‌ها ناشی از عدم رعایت اصول مهندسی توسط پیمانکار و قصور در عملکرد مهندسین ناظر بوده است. با این حال با توجه به شرایط ساختگاهی شهر در نقاطی که ساختمان‌ها بر روی بستر سنگی (سازندهای زمین‌شناسی در شکل ۲) قرار داشته‌اند، حجم تخریب‌ها نسبت به نواحی آبرفتی (تشکیلات کواترنری) کمتر بوده است. به عنوان نمونه در نواحی جنوب و غرب شهر که عمده ساختمان‌ها بر روی رسوبات کواترنری قرار دارند، شدت تخریب‌ها بیشتر از سایر نقاط شهر بوده است (شکل ۶).

رخداد زلزله، موجب وقوع مخاطرات زمین‌شناسی دیگری نیز در گستره شهر و روستاهای اطراف آن گردید که هر یک از این پدیده‌ها می‌تواند سلامت و ایمنی سکونتگاه اهالی را به مخاطره بیندازد.

شکل ۴: فروریزش کامل یک ساختمان بتن آرمه در محله فولادی (قسمت غربی شهر سرپل ذهاب) ناشی از کمبود آرماتور عرضی (خبرگزاری ایسنا، ۱۳۹۶).

شکل ۵: تصویر ماهواره‌ای بخش غربی شهر سرپل‌ذهاب پس از وقوع زلزله- ساختمان‌های کاملاً ویران شده به رنگ قرمز و کمپ‌های اسکان موقت زلزله‌زدگان به رنگ سبز (سازمان فضایی ایران، ۱۳۹۶).

شکل ۶: آسیب شدید زمین‌لرزه به بیمارستان تازه تأسیس سرپل‌ذهاب، شش ماه پس از افتتاح (خبرگزاری مشرق، ۱۳۹۶)

خطر روانگرایی: با رخداد زلزله، در مناطق مجاور رودخانه الوند (در شکل ۲) وقوع پدیده روانگرایی و جوشش ماسه در بستر رودخانه به‌ویژه در نواحی مجاور مسکن مهر شهید شیرودی و محله فولادی رخ داده است. آثار این پدیده در بستر رودخانه بخوبی دیده می‌شود. با توجه به شکاف‌های مشاهده شده متعدد در بستر کوچه‌های مجموعه مسکن مهر (شکل ۷)، به نظر می‌رسد وقوع این پدیده در عمق رسوبات زیر بستر مسکن مهر، سبب حرکت‌هایی از نوع گسترش جانبی و ایجاد شکاف‌های متعدد در این بخش و همچنین در منطقه دپوی نخاله‌های ساختمانی در مجاورت محله فولادی شده است. لذا یکی دیگر از دلایل تشدید خسارات ناشی از زلزله در این بخش از شهر، می‌توان وقوع پدیده روانگرایی باشد (حق‌شناس و همکاران، ۱۳۹۶-الف).

پدیده روانگرایی علاوه بر محدوده شهر، در راه‌های مواصلاتی شهرستان نیز در برخی از نقاط موجب آسیب به بدنه جاده‌ها شده است (شکل ۸).

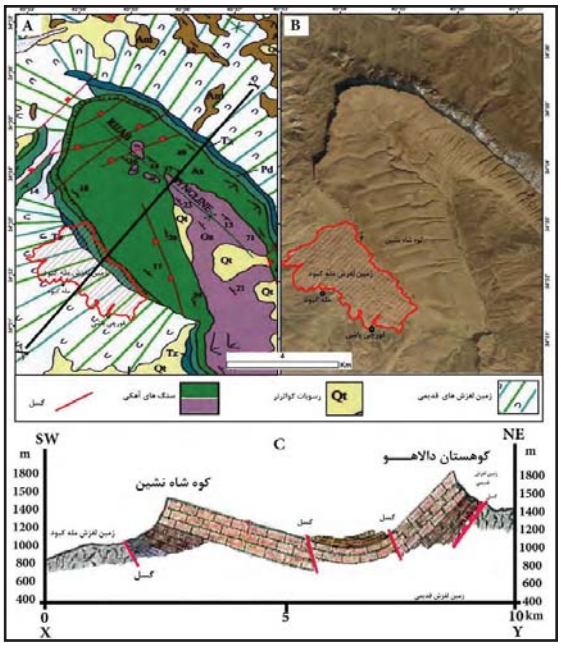
شکل ۷: تصاویری از شکاف‌های ایجاد شده در اثر پدیده گسترش جانبی ناشی از پدیده روانگرایی در محدوده مجتمع مسکن مهر شهید شیرودی (حق‌شناس و همکاران، ۱۳۹۶-الف).

شکل ۸: آسیب دیدن بدنه راه بر اثر روانگرایی و جوشش ماسه در محور تازه‌آباد- سرپل‌ذهاب (بسطامی و همکاران، ۱۳۹۶).

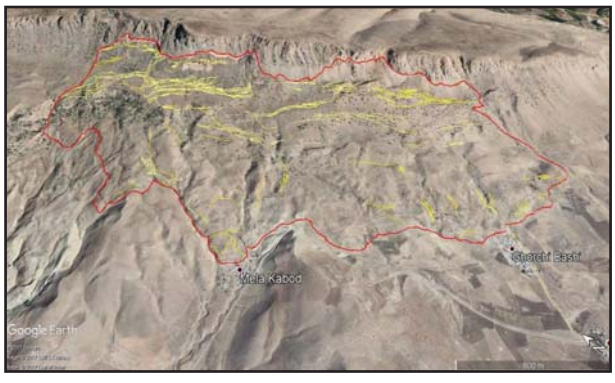
خطر زمین‌لغزش: زمین‌لغزش‌های متعددی ناشی از زمین‌لرزه ۲۱ آبان ۱۳۹۶ رخ داده است که در مواردی با تلفات انسانی و خسارات مالی قابل توجهی نیز همراه بوده‌اند؛ که معروف‌ترین آن‌ها زمین‌لغزش مله‌کبود- قورچی‌باشی با وسعت ۴/۶۱ کیلومتر مربع (۴۶۱ هکتار)، در دامنه جنوبی کوه شاهنشین و در مجاورت دو روستای مله‌کبود و قورچی‌باشی در فاصله ۸ کیلومتری شمال سرپل‌ذهاب می‌باشد. از نظر ساختاری، کوه شاهنشین تشکیل دهنده یال جنوبی یک ناودیس معلق (ساخته شده از لایه‌های آهکی سازند آسماری بر روی سازند شیلی و آهک رسی پابده) است. تفاوت مقاومت لایه‌های مقاوم سازند آسماری بر روی سازند ضعیف پابده به همراه ساختار تکتونیکی این سازند، تنوعی از پدیده‌های زمین‌شناسی را به وجود آورده است که در بروز مخاطرات زمین‌شناختی همراه با زمین‌لرزه اخیر مؤثر بوده‌اند. این پدیده‌ها شامل زمین‌لغزش‌های متعدد قدیمی به هم پیوسته در دامنه‌های پیرامونی این ناودیس و دره‌های عرضی با دیواره‌های قائم در بخش داخلی شده است (شکل ۹ و ۱۰). این زمین‌لغزش، بزرگترین زمین‌لغزش منفرد رویداده در این زمین‌لرزه و بزرگترین زمین‌لغزش رخ داده در چند دهه اخیر در کشور می‌باشد، به‌طوریکه از فواصل چند کیلومتری جنوب سرپل‌ذهاب نیز قابل رویت می‌باشد. تصویر ماهواره‌ای لغزش مذکور همراه با شکاف‌های عرضی و طولی پیاده شده بر روی آن در شکل ۱۱ ارائه شده است. همانگونه که مشاهده میگردد، شکاف‌های عرضی و طولی بسیاری بر روی این زمین‌لغزش شکل گرفته است که طول بعضی از آن‌ها بیش از یک کیلومتر می‌باشد. برخی از این شکاف‌ها دارای بازشدگی چند متری و عمق بیش از ۱۵ متری هستند. خسارات ناشی از این زمین‌لغزش سببِ «تخریب قبرستان قورچی‌باشی، منبع آب این

روستا و لوله انتقال آب آن، مسدود کردن جادهٔ دسترسی روستا به قبرستان، تخریب دیوار شمالی دو واحد مسکونی در این روستا، خشک شدن و از بین بردن چشمهٔ آب روستای مله‌کبود و تخریب گسترده زمین‌های کشاورزی و مراتع این دو روستا» شده است. شکاف‌های عرضی بسیار بزرگ و عمیق در تودهٔ لغزشی به نفوذ رواناب سطحی (ناشی از فصل بارندگی)، به داخل توده کمک خواهد کرد و این پدیده می‌توانست تهدیدی جدی برای اهالی دو روستای مله‌کبود و قورچی‌باشی در مجاورت پنجهٔ این زمین‌لغرش باشد. لذا موضوع جابجایی اهالی این دو روستا به مکان‌های ایمن‌تر ضروری به نظر می‌رسید (حق‌شناس و همکاران، ۱۳۹۶-ب).

شکل ۹: شکاف‌های عرضی عمیق و توده‌های جابجا شده زمین‌لغزش مله‌کبود-قورچی‌باشی.

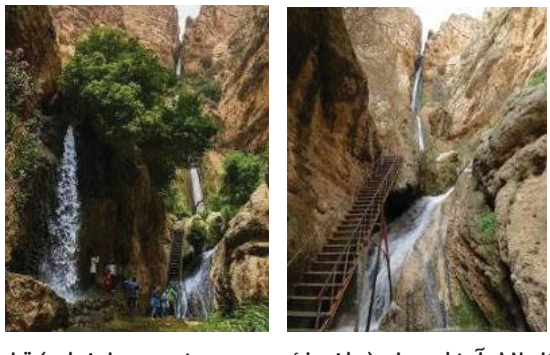


شکل ۱۰: A: موقعیت زمین‌ساختی-مورفوتکتونیکی. B: مورفولوژیکی. C: مقطع شماتیک زمین‌لغزش مله‌کبود-قورچی‌باشی (گورابی، ۱۴۰۰).



شکل ۱۱: تصویر ماهواره‌ای زمین‌لغزش مله‌کبود-قورچی‌باشی همراه با شکاف‌های عرضی و طولی پیاده شده بر روی آن با خطوط زرد رنگ (حق‌شناس و همکاران، ۱۳۹۶-ب).

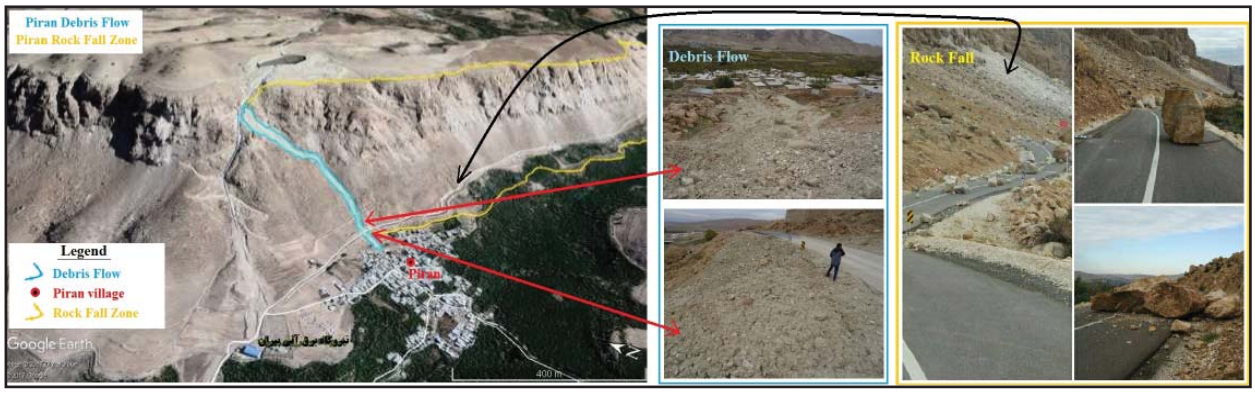
خطر ریزش و بهمن سنگی: به دنبال زلزله ۲۱ آبان ۱۳۹۶، بزرگترین بهمن سنگی در شمال روستای پیران (در ۱۰ کیلومتری شمال شرق شهرستان سرپل‌ذهاب)، واقع در طول جاده گردشگری دسترسی به آبشار پیران، روی داده است. این ناپایداری به طول حدود ۱/۸ کیلومتر، جاده دسترسی به آبشار و تمامی مسیر سنگچین جاده گردشگری را مسدود نموده و همچنین سبب ایجاد سد و دریاچه کوچک طبیعی در پای آبشار گردیده است (شکل ۱۲ و ۱۳). ابعاد بلوک‌های فروریخته تا ۸۰ متر مکعب و وزن بیش از ۱۵۵ تُن برآورد گردید. همچنین در شرق درهٔ پیران، ریزش‌های سنگی متعددی در قالب پهنه‌های ریزشی روی داده‌اند. دیواره‌های آهکی با شیب بسیار تند ناشی از بالاآمدگی ناودیس معلق ریجاب، همراه با شیب لایه‌بندی مخالف با شیب دامنه، از مهمترین عوامل ذاتی مستعدکننده دامنه‌های این منطقه بوده است که در ترکیب با عامل محرک زلزله، بهمن‌ها و ریزش‌های سنگی را به وجود آورده است. از دیگر ریزش‌های سنگی رخ داده در منطقه، ریزش در مسیر پاطاق به سرپل‌ذهاب، ارتفاعات مشرف به دشت دیره واقع در راه ارتباطی سرپل‌ذهاب به گیلان‌غرب بوده است (حق‌شناس و همکاران، ۱۳۹۶-ب).



شکل ۱۲. آبشار پیران (جاذبه ژئوتوریسمی شهر سرپل‌ذهاب) قبل از وقوع زمین‌لرزه.

شکل ۱۳: آبشار پیران بعد از زلزله، ریزش بهمن سنگی و تشکیل یک دریاچه کوچک طبیعی.

خطر جریان واریزه‌ای: به دنبال زلزله ۲۱ آبان ۱۳۹۶ حرکت‌های دامنه‌ای از نوع جریانی واریزه‌ای نیز در روستای پیران رخ داده است. شکل ۱۴، تصویر ماهواره‌ای و نمایی از این جریان واریزه‌ای در نزدیکی سکونتگاه اهالی روستای پیران را نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌گردد، این حرکت در مسیر یک آبراهه -که از ارتفاعات ناودیس ریجاب به سمت جنوب کشیده شده است و از میان روستای پیران می‌گذرد-، روی داده است و آثار آن تا داخل روستا نیز دیده می‌شود. با توجه به ساخت یک آبگیر مصنوعی در قله کوه به منظور تأمین آب مورد نیاز یک نیروگاه برق-آبی کوچک در پایین دست و در مجاورت روستا، به نظر می‌رسد که این جریان واریزه‌ای در اثر شکست لوله انتقال آب این نیروگاه یا سرریز آب آبگیر بالادست در هنگام زمین‌لرزه روی داده باشد. همچنین مصالح جریان یافته به دلیل حرکت بخشی از بستر آبراهه و بخشی از مصالح دپو شده در مرحله ساخت آبگیر؛ مصنوعی به نظر می‌رسد. خوشبختانه بخش اعظم واریزه‌های انتقالی در پشت خاکریز جادهٔ گردشگری آبشار پیران در بالادست روستا متوقف شده‌اند و آسیب به روستا از این ناحیه ناچیز بوده است. به منظور جلوگیری از حوادث بعدی احداث سازه سیل‌بندی در این بخش لازم می‌باشد (حق‌شناس و همکاران، ۱۳۹۶-ب).



شکل ۱۴: نمایی از دو پدیدهٔ جریان واریزه‌ای و ریزش بهمن سنگی در روستای پیران (حق‌شناس و همکاران، ۱۳۹۶-ب).

ملاحظات اجرایی پروژه عمرانی (پیشگیری از تشدید بحران در منطقهٔ زلزله‌زده): پس از رخداد زلزله و مخاطرات زمین‌شناسی ناشی از آن، اگرچه اقدامات اجرایی جهت مدیریت بحران، اسکان موقت زلزله‌زدگان و تأمین ضروریات (بیمارستان‌های صحرایی، سرویس‌های بهداشتی و حمام صحرایی و ...) در منطقه در حال انجام بود، اما عوامل دیگری از جمله فصل بارندگی و سیلابی شدن منطقه

(آب‌گرفتگی معابر در محل‌های اسکان موقت زلزله‌زدگان)، سبب گردید که زندگی در چادرها و کانکس‌ها با سختی و مشقت‌های فراوان همراه گردد. عدم وجود یک سایت بهداشتی دفن زباله در شهرستان نیز موجب تشدید انباشت زباله‌ها در معابر شهر پس از رخداد زلزله شده بود. این چالش‌ها در کنار مجموعه‌ای از عوامل دیگر و نیز آسیب‌های وارده به زیرساخت‌های بهداشتی و خدماتی منطقه، موجب گردید که گستره شهرستان و روستاهای همجوار با بحرانی فراگیر مواجه گردد.

علاوه بر بحران در منطقه شهری، در نواحی روستایی نیز با توجه به وقوع پس‌لرزه‌های متعدد پس از زلزله اصلی، مخاطرات زمین‌شناسی (زمین‌لغزش، بهمن سنگی و ...)، ایمنی سکونتگاه‌های اهالی را همچنان تهدید می‌کرد. در این شرایط بحرانی، دو تونل انتقال آب (سرپل‌ذهاب و بازی‌دراز) نیز در مجاورت شهر در حال حفاری بود که در صورت عدم مدیریت صحیح عملیات اجرایی در این سایت‌ها، بر حجم مشکلات و بحران‌های منطقهٔ زلزله‌زده، افزوده می‌شد. این دو سازه توسط دو دستگاه تی‌بی‌ام (از نوع متعادل کننده فشار زمین) اجرا می‌گردید (شکل ۱۵).

شکل ۱۵: ماشین حفار در پروژه تونل سرپل‌ذهاب.

تونل‌های سرپل‌ذهاب (به طول تقریبی ۴۳۰۰ متر) و بازی دراز (به طول تقریبی ۸۵۰۰ متر) سازه‌هایی می‌باشند که در انتهای بازه سوم از قطعه اول طرح ملی انتقال آب حوزه سیروان به مناطق گرمسیری (استان‌های کرمانشاه و ایلام) در نظر گرفته شده‌اند. در حقیقت، این تونل‌ها سازه‌های اصلی برای گذر سامانه گرمسیری از شهرستان سرپل‌ذهاب محسوب می‌گردند. قطر حفاری این تونل‌ها ۶/۸ متر بوده و حداکثر ظرفیت انتقال آب آن ۴۲ متر مکعب بر ثانیه خواهد بود. در شکل ۱۶، نمایی از موقعیت تونل‌ها در مجاورت شهر سرپل‌ذهاب ارائه شده است.

شکل ۱۶: نمایی از موقعیت تونل‌های انتقال آب سرپل‌ذهاب (T۴) و بازی‌دراز (T۵) در مجاورت شهر سرپل‌ذهاب.

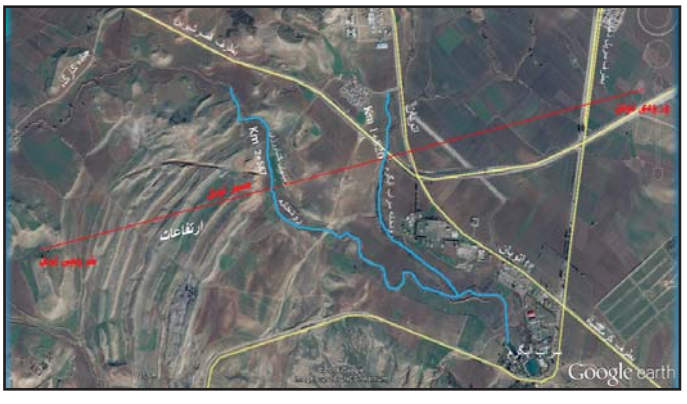
از طرفی چشمه سراب گرم و رودخانه‌های منشعب از آن (که منبع آب شرب و کشاورزی شهر سرپل‌ذهاب می‌باشند) نیز در محدوده حفاری این تونل‌ها قرار داشت. لذا به دلیل احتمال تأثیرگذاری عملیات حفاری تونل‌ها بر منابع آب و تشدید حساسیت این موضوع (به دلیل بحران اجتماعی پس از زلزله) می‌بایست در جهت جلوگیری از تغییر رژیم هیدروژئولوژی منطقه نیز تمهیدات ویژه‌ای اندیشیده می‌شد.

از طرف دیگر، تونل سرپل‌ذهاب از زیر اتوبان سرپل‌ذهاب-قصر شیرین عبور می‌کرد. در این شرایط نشست زمین در زمان حفاری می‌توانست تردد وسایل نقلیه در اتوبان را نیز با مشکل مواجه نماید که در شرایط بحرانی پس از زلزله، وقوع چنین چالش‌هایی، می‌توانست بحران اجتماعی و نارضایتی عمومی در منطقهٔ زلزله‌زده را تشدید کند. در این راستا، مدیران فنی و پرسنل اجرایی تونل‌ها می‌بایست در شرایط پس از زلزله، تمهیدات و اقدامات پیشگیرانه در حین عملیات حفاری را افزایش می‌دادند.

عبور تونل سرپل‌ذهاب از زیر رودخانه‌ها: در دوره زمانی پس از زلزله، در شرایطی که گستره شهر و به‌ویژه مناطق روستایی توسط مخاطرات زمین‌شناسی (زمین‌لغزش و بهمن سنگی و ...) تهدید

می‌گردید و بحران در منطقه فراگیر شده بود، کمبود ناگهانی منابع آب جهت تأمین مصارف شرب و کشاورزی می‌توانست منطقهٔ زلزله‌زده را وارد بحران‌هایی غیر قابل پیش‌بینی و حتی مناقشات اجتماعی کند. از آنجایی که عملیات حفاری تونل سرپل‌ذهاب در دو نقطه از زیر جریان‌های بزرگ آب سطحی در منطقه عبور می‌کرد، لذا احتمال وقوع چنین چالش‌هایی وجود داشت. در این بخش به شرح اقدامات پیشگیرانه جهت عبور ایمن تونل از یکی از این رودخانه‌ها –که به دلیل روباره کم تونل در محل رودخانه و نزدیکی به اتوبان، عملیات حفاری با حساسیت بیشتری مواجه بود–، پرداخته می‌شود. بر اساس مطالعات زمین‌شناسی، مسیر تونل سرپل‌ذهاب از دو بخش آبرفتی و سنگی تشکیل شده است. حدود ۲۲۵۰ متر ابتدایی مسیر تونل (از سمت پرتال خروجی) دربرگیرنده واحدهای سنگی شامل سازندهای گچساران، آغاجاری و میشان می‌باشد. از کیلومتر تقریبی ۲+۲۵۰ تونل تا انتهای مسیر (پرتال ورودی) نیز حفاری تونل در بخش آبرفتی انجام می‌پذیرفت. رسوبات آبرفتی شامل سیلت و رس همراه با ماسه و شن می‌باشد. مصالح آبرفتی در مسیر تونل عمدتاً دانه ریز و با نفوذپذیری پایین است و گاهی درشت دانه و با نفوذپذیری نسبتاً بالا می‌باشد.

تونل سرپل‌ذهاب در کیلومتر ۲+۴۸۰ از سمت پرتال خروجی (۱+۸۲۰ از سمت پرتال ورودی) از زیر رودخانه سرآب گرم عبور می‌کند (شکل ۱۷). جهت عمومی رودخانه سرآب گرم جنوب غربی–شمال شرقی می‌باشد. ارتفاع روباره تونل در محل تلاقی با رودخانه حدود ۴/۵ متر است. عرض رودخانه حدود ۷ متر بوده و دبی آن نیز حدود ۱ متر مکعب بر ثانیه می‌باشد (شکل ۱۸).



شکل ۱۷: نمایی از موقعیت رودخانه‌ها (خطوط آبی رنگ) و جاده‌های موجود (خطوط زرد رنگ) در محل تلاقی با تونل سرپل‌ذهاب (T۴)

شکل ۱۸: نمایی از رودخانه سراب گرم در محل تلاقی با محور تونل.

به دلیل روباره کم تونل در این موقعیت (حدود ۴/۵ متر) به منظور جلوگیری از هرگونه تغییر دائمی در جریان آب رودخانه و ریزش زمین حین حفاری (و به دنبال آن انتقال جریان آب رودخانه به تراز حفاری تونل)، می‌بایست راهکاری مناسب جهت عبور ایمن از رودخانه به کار گرفته می‌شد.

با توجه به شرایط بحرانی منطقه متأثر از مخاطرات زمین‌شناسی (ناشی از زمین‌لرزه) و نظر به اهمیت جلوگیری از هرگونه تأخیر در برنامه زمان‌بندی حفاری تونل سرپل‌ذهاب، مناسب‌ترین گزینه جهت عبور ایمن دستگاه حفار از زیر رودخانه، بدین صورت انتخاب گردید که از طریق حفر کانال و لوله‌گذاری، جریان آب رودخانه به سمت کانال منحرف گردد و جریان آب از طریق لوله از روی مقطع تونل عبور نماید.

در این راستا و به منظور آغاز عملیات انحراف آب رودخانه (احداث دایک[1] خاکی در بالا دست، حفر کانال به طول تقریبی ۱۳۶ متر، گذاشتن ۱۱ شاخه لوله ۱۲ متری به قطر ۱ متر در داخل کانال، انتقال آب رودخانه از طریق لوله به پایین دست و در نهایت، خشک نمودن بستر رودخانه در محل تلاقی با عملیات حفاری تونل) برنامه‌ریزی‌های لازم صورت گرفت؛ لذا کلیه ملزومات از جمله لوله‌های فلزی به قطر ۱ متر، ماشین‌آلات و تجهیزات مورد نیاز تأمین شد و نسبت به انجام عملیات مذکور اقدام گردید (شکل‌های ۱۹ و ۲۰).

1. Dyke

شکل ۱۹. حفر کانال و قرار دادن لوله در آن جهت عبور آب از داخل آن.

شکل ۲۰: گذاشتن لوله در کانال، احداث دایک در بالادست رودخانه و انحراف آب رودخانه به داخل لوله.

پس از انحراف جریان رودخانه به مسیر لوله‌گذاری شده، می‌بایست برای جلوگیری از نشست زمین (ریزش روباره تونل) در زمان عبور ماشین حفار از ناحیه مذکور نیز تمهیدات گسترده‌تری اندیشیده می‌شد. از جمله موارد زیر:

- بازدید از کله‌حفار دستگاه و تعویض ابزارهای برشی معیوب؛ پیش از نزدیک شدن به موقعیت رودخانه.
- بازدید براش‌های سپر انتهایی دستگاه و تعویض براش‌های معیوب (به منظور اطمینان از آب‌بندی انتهای شیلد دستگاه درزمان عبور از زیر رودخانه).
- تأمین حجم مازاد تمام مواد مصرفی نظیر فوم عمل‌آوری و انواع گریس‌های دستگاه حفار در زمان عبور از ناحیه اشباع در زیر رودخانه.
- نصب ابزار نشست‌سنجی در محدوده رودخانه و قرائت مستمر آن‌ها پیش از رسیدن دستگاه حفار به محدوده رودخانه و در حین گذر دستگاه از زیر رودخانه.
- تزریق کامل و در صورت نیاز تزریق مازادِ ملات پشت سگمنت‌ها[1] (قطعات پیش‌ساخته بتنی که بر دیواره تونل نصب می‌گردند).
- کنترل پارامترهای عملیاتی دستگاه حفار (به ویژه پارامتر فشار سینه‌کار) در زمان عبور از ناحیه مذکور.

بدین منظور نقاط نشست‌سنجی در محدوده کیلومتراژ ۲+۴۵۰ الی ۲+۵۵۰ (از سمت پرتال خروجی) در نظر گرفته شد. تعداد پنج ردیف ایستگاه نشست‌سنجی شامل سه الی پنج نقطه در هر ایستگاه در نظر گرفته شد، ابزاربندی انجام گرفت و با استفاده از یک دستگاه دوربین ترازیاب به‌طور روزانه (پیش از رسیدن دستگاه) دو تا سه مرتبه در شبانه روز (در حین عبور دستگاه و پس از عبور آن از رودخانه) نسبت به قرائت و تعیین میزان جابجایی قائم نقاط اقدام گردید؛ که با توجه به تمهیدات اندیشیده شده (تنظیم فشار سینه‌کار دستگاه و...) خوشبختانه تغییر مکان و نشستی خارج از حد مجاز در محدوده بستر رودخانه ملاحظه نگردید. سرانجام تیم اجرایی پروژه، با استفاده از قابلیت‌های دستگاه حفار و رفتارنگاری دقیق، توانستند عملیات حفاری در محدوده رودخانه را با موفقیت به انجام رسانند.

1. segment

عبور تونل سرپل‌ذهاب از زیر اتوبان‌ها: با عنایت به وقوع زلزله و پس‌لرزه‌های متعدد، مناطق و روستاهای متعددی در مجاورت شهر، همچنان با احتمال وقوع مخاطرات زمین‌شناسی زمین‌لغزش و بهمن سنگی و ... -که در بخش‌های قبلی مقاله اشاره گردید-، مواجه بودند؛ در گستره وسیعی، سکونتگاه‌های روستایی تخریب شدند و یا در معرض خطرات مذکور (زمین‌لغزش و ...) قرار داشتند. بالطبع انتقال امکانات و کمک‌های امدادی و نیز عبور و مرور وسایل نقلیه به روستاها از طریق جاده‌های مواصلاتی (در محل تلاقی با تونل سرپل‌ذهاب) صورت می‌گرفت؛ لذا تأمین پایداری و ایمنی جاده‌های مذکور در زمان حفاری تونل‌ها، اهمیت مضاعفی یافته بود، چرا که وقوع زلزله و سایر مخاطرات (زمین‌لغزش، بهمن سنگی و ...) در مناطق روستایی موجب شده بود که به دلیل حجم بالای عملیات امداد و بازسازی، جاده‌های مواصلاتی مذکور، بسیار پُر تردد و حائز اهمیت ویژه گردند.

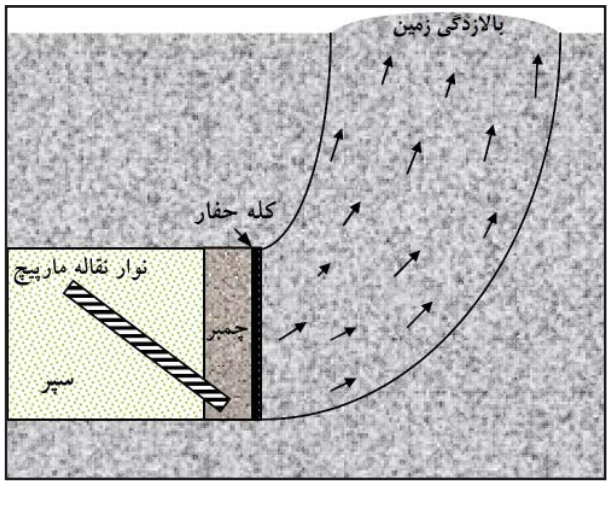
عملیات حفاری تونل سرپل‌ذهاب، در سه مقطع از زیر جاده‌های منطقه عبور می‌کرد (شکل ۱۷). اولین برخورد در کیلومتر حدودی ۲+۵۶۰ (از سمت پرتال خروجی)، رخ می‌داد. عبور از زیر جاده دوم و سوم به ترتیب در کیلومترهای حدودی ۲+۶۶۰ و ۳+۹۲۰ اتفاق می‌افتاد. اولین برخورد با توجه به اهمیت جاده و کمتر بودن سرباره (و نیز نزدیکی به جریان رودخانه سراب گرم) از حساسیت بیشتری برخوردار بوده است. در محل تلاقی با جاده، تونل تنها حدود ۱۴ متر روباره دارد.

بستر جاده روی سازند غیر سنگی واقع شده است. سازند غیر سنگی یک پادگانه جدید با دانه بندی ریز تا متوسط می‌باشد که از رس و سیلت تشکیل شده است. همچنین در محدوده زیر جاده، مقطع تونل نیز از محدوده همین تشکیلات غیر سنگی کواترنری عبور می‌کند.

لایه خاکی در این مقطع در حدود ۳۹ متر عمق دارد و بافت غالب آن ریزدانه می‌باشد و از نفوذپذیری پایینی برخوردار است. متوسط عدد نفوذ استاندارد در این لایه بیش از ۳۰ متر بوده است و لذا در دسته رس خیلی سفت قرار می‌گیرد. در زیر لایه خاکی نیز تشکیلات مارن آهکی سازند میشان (سنگ بستر) قرار دارد.

در محدوده مورد بررسی، زمین‌های بایر یا کشاورزی وجود دارد و تنها عارضه حساس به نشست (متأثر از عملیات حفاری تونل)، جاده مورد بحث می‌باشد. در شرایط بحرانی منطقه پس از رخداد مخاطرات زمین‌شناسی (ناشی از زلزله)، با توجه به نوع و اهمیت جاده که در واقع دسترسی دو شهر سرپل‌ذهاب-قصر شیرین (و نیز راه ارتباطی روستاهای همجوار با شهر سرپل ذهاب) می‌باشد، میزان نشست‌های زمین، در زمان حفاری تونل باید به گونه‌ای می‌بود که به هیچ‌وجه، اختلال و قطع عبور و مرور در این شریان رخ ندهد. بدین ترتیب مقدار نشست مجاز با حفظ پایداری برابر حداکثر ۲/۵ سانتیمتر در نظر گرفته شد.

به منظور بررسی میزان فشار مورد نیاز سینه‌کار دستگاه حفار و همچنین محاسبه نشست و تغییر شکل‌های ناشی از حفاری در زیر جاده، می‌بایست پارامترهای ژئومکانیکی و ژئوتکنیکی خاک موجود در محل، تعیین گردد، که موضوعات پیرامون روش‌های محاسبه تغییر شکل‌ها (با استفاده از مدل‌سازی‌های عددی و سایر روش‌ها)، کار پژوهشی مستقل دیگری را می‌طلبد و از موضوع کلی این مقاله و از حوصله نوشتار خارج است. با این حال به‌طور مختصر باید اشاره کرد که با توجه به نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی و همچنین روابط تحلیلی برای فشار سینه‌کار، مقادیر حداقل و حداکثر باید به نحوی انتخاب شود که اولاً سینه‌کارِ حفاری پایدار بوده و نشست رخ ندهد؛ ثانیاً با توجه به روبارهٔ کمِ تونل در موقعیت مذکور، بالازدگی زمین رخ ندهد (شکل ۲۱).



شکل ۲۱: طرحی شماتیک از بالازدگی زمین به واسطهٔ اِعمال فشار زیاد سینه‌کار توسط ماشین حفاری.

برای مهار تغییر شکل‌های قائم و افقی ناشی از اجرای تونل در زیر جاده، لازم است که فشارهای برداشته شده از روی جبهه‌کارِ حفاری، از طریق دستگاه به نحوی به جبهه‌کار برگردانده شود، به‌طوریکه تا پیش از پایان زمان خودپایداری جبهه‌کار، تعادل نیروها دوباره برقرار گردد و از تغییر تراز سطح زمین (در موقعیت جاده) جلوگیری به عمل آید.

برآورد فشار سینه‌کار، کار ساده‌ای نمی‌باشد و باید شرایط تعادلی برای پیشروی سپر دستگاه، ملاحظات مربوط به فشار پایداری و ملاحظات اجرایی در نظر گرفته شود. با تمام این اوصاف، فشار طراحی شده باید با توجه به شرایط زمین در زمان اجرا اصلاح گردد. در نهایت به منظور حفاری ایمن در محدوده زیر جاده، می‌بایستی ملاحظات زیر در نظر گرفته شود:

- کنترل فشار سینه‌کار و نرخ تخلیه مصالح به منظور کنترل نشست پیش روی سینه‌کار تونل.
- کنترل فشار و احجام تزریق ملات پشت سگمنت‌ها به منظور پیشگیری از جابجایی‌های زمین در موقعیت سگمنت.
- کنترل نرخ پیشروی دستگاه حفاری با فشار و نرخ تزریق گروت
- همواره باید عبور ماشین همراه با اعمال فشار سینه‌کار، کنترل احجام خاک خروجی و تزریق گروت با فشار ۰/۵ تا ۱ بار بیشتر از فشار سینه‌کار باشد.
- تأمین سگمنت‌های تیپ ۲ برای محدوده زیر جاده (با شبکه آرماتور قوی‌تر برای نصب در داخل تونل).
- نشست‌سنجی مستمر تغییر شکل‌های سطح زمین در موقعیت جاده (قبل، حین و بعد از عبور ماشین حفار).

بدیهی است که در بهترین حالت، روند حفاری باید به‌گونه‌ای می‌بود که حداقل تغییرات در سطح زمین، ایجاد گردد. تیم اجرایی با استفاده از نتایج ابزارهای نشست‌سنجی می‌توانست در صورتی‌که تغییرات ایجاد شده در سطح زمین (به لحاظ مقادیر نشست و بالازدگی زمین در موقعیت جاده) از حد بحرانی فراتر رود، با کاهش یا افزایش پارامتر فشار سینه‌کارِ دستگاه حفار و تنظیم فشار تزریق (ملاتِ پُرکننده پشت سگمنت‌ها)، مقادیر اندازه گرفته شده توسط ابزار را تثبیت نماید.

بدین منظور در محدوده جاده، تعداد دوازده مقطع مختلف هر یک شامل حداکثر پنج نقطه ایستگاه نشست‌سنجی در نظر گرفته شد و ابزار بندی انجام گرفت (شکل ۲۲).

شکل ۲۲. ابزار بندی جهت کنترل نشست در محدوده جاده ارتباطی شهر سرپل‌ذهاب و قصر شیرین.

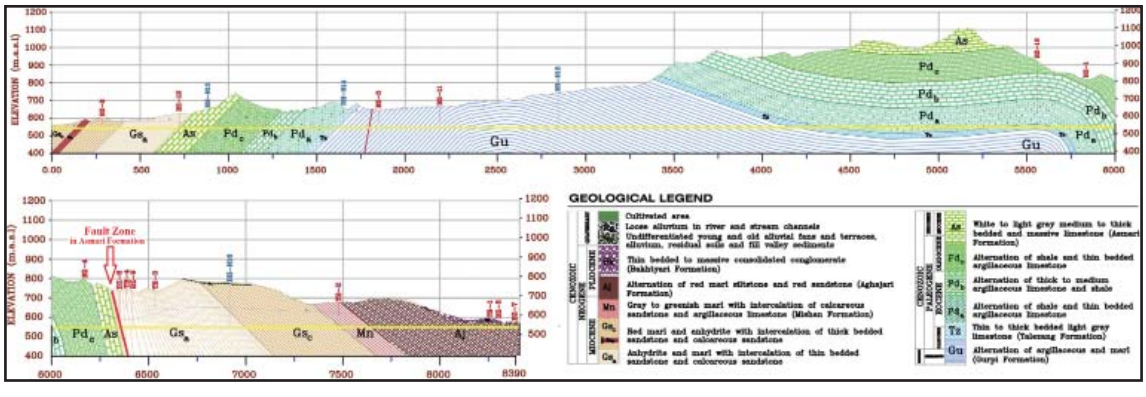
در ابتدای نزدیک شدن دستگاه به محل تلاقی مسیر تونل با جاده، قرائت ابزارها سه مرحله در هر روز صورت می‌گرفت. پس از عبور دستگاه از محدوده جاده، قرائت‌ها به هر سه روز یکبار تقلیل داده شد و در نهایت پس از اطمینان از عدم رخداد تغییر شکل و فاصله گرفتن کافی دستگاه حفار از محدوده جاده، قرائت‌ها متوقف گردید.

در زمان عبور دستگاه از زیر جاده، نتایج قرائت‌ها در هر نوبت مورد بررسی قرار می‌گرفت و از عدم وجود تغییر شکل‌های نگران‌کننده اطمینان حاصل می‌گردید و نسبت به اتخاذ تصمیمات اجرایی لازم در خصوص ادامه پیشروی و کنترل پارامترهای عملیاتی دستگاه حفار (به ویژه تنظیم فشار سینه‌کار) اقدام می‌شد.

نتایج قرائت‌ها نشان می‌داد به جز یک نقطه (با نشست ۳ سانتی‌متر) در سایر نواحی، مقادیر نشست کمتر از حد مجاز (۲/۵ سانتی‌متر) بوده است و دستگاه به واسطه تمهیداتِ در نظر گرفته

شده، به شکل ایمن از زیر جاده عبور کرد.

عبور تونل بازی‌دراز از سازند آسماری: اثرات منفی حفاری تونل‌های زیرزمینی می‌تواند ضمن تغییر رژیم هیدروژلوژی مناطق، موجب بروز تبعات اجتماعی نیز گردد (جودکی و همکاران، ۱۳۹۸). در تونل بازی‌دراز نیز به دلیل احتمال تأثیرگذاری عملیات حفاری تونل بر دبی چشمهٔ کارستی سراب‌گرم (منبع اصلی آب شرب و کشاورزی اهالی شهرستان سرپل‌ذهاب) و تشدید حساسیت این موضوع (به دلیل بحران اجتماعی و مخاطرات زمین‌شناسی ناشی از زلزله آبان‌ماه ۱۳۹۶) می‌بایست در راستای جلوگیری از تغییر رژیم هیدروژئولوژی منطقه نیز تمهیدات ویژه‌ای اندیشیده می‌شد. (مسیر حفاری تونل از هفت گونه زمین‌شناسی (مربوط به هر یک از سازندهای گچساران، آسماری، گورپی، پابده، تله‌زنگ، میشان و آغاجاری) عبور می‌کند. در شکل ۲۳، مقطع زمین‌شناسی تونل ارائه شده است.) پیش‌بینی‌ها حاکی از این مسئله بود که در زمان عبور دستگاه حفار از کیلومتر ۶ تونل و در ناحیه گسلی سازند آسماری (شکل ۲۳)، احتمال هجوم آب زیرزمینی با دبی بیش از ۱۳۰ لیتر بر ثانیه محتمل می‌باشد و از آنجایی که جریان هیدرولیکی چشمه سراب گرم (شکل ۲۴) از آبخوان‌های سازند آسماری منشأ می‌گرفت، لذا احتمال تأثیرگذاری عملیات حفاری تونل بر دبی خروجی چشمه وجود داشت.



شکل ۲۳: ناحیه گسلی در سازند آسماری- مقطع زمین شناسی تونل بازی دراز (اقتباس از مهندسین مشاور ساحل، ۱۳۹۵).

شکل ۲۴: مظهر چشمهٔ کارستی سراب‌گرم (منبع اصلی آب شرب و کشاورزی شهرستان سرپل‌ذهاب).

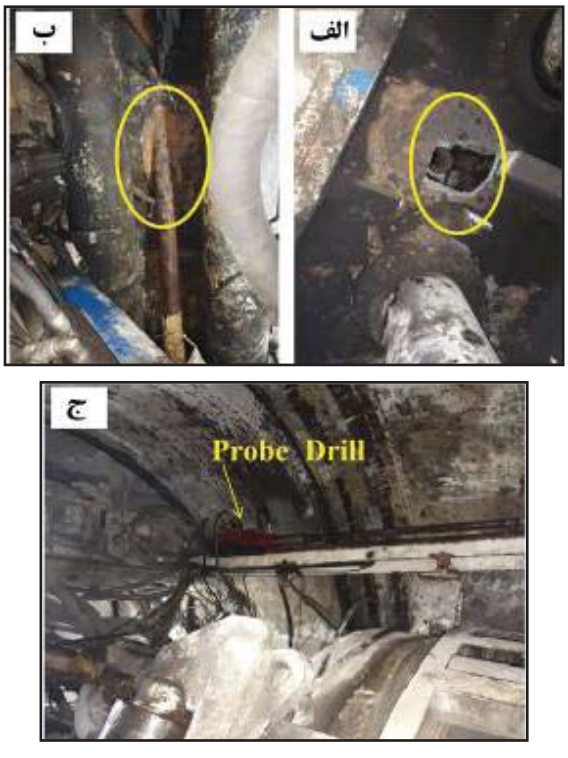
مسیر حفاری تونل از هفت گونه زمین‌شناسی (مربوط به هر یک از سازندهای گچساران، آسماری، گورپی، پابده، تله‌زنگ، میشان و آغاجاری) عبور می‌کند. در شکل ۲۲، مقطع زمین‌شناسی تونل ارائه شده است.

اگرچه در این پروژه جهت پیش‌بینی جریانات آب زیرزمینی حین حفاری، در چند مقطع از روش پیش‌بینی لرزه‌ای تونل استفاده شده است (جودکی و همکاران، ۱۳۹۷-الف)، اما انتخاب این روش نیز با محدودیت‌هایی (هزینه‌های هر مرحله اجرای تست، خطرات احتمالی انفجار مواد ناریه در زمین‌های دارای گاز متان) همراه بوده است و امکان اجرای متوالی این آزمایش جهت شناسایی زون‌های آبدار در تمام نواحی محتمل، میسر نگردید. لذا مقرر شد به منظور پیش‌بینی موقعیت جریانات آب زیرزمینی و البته تقویت ظرفیت

انجام تزریقات در سینه‌کار حفاری (با هدف بهسازی و آب‌بند کردن زمین)، تغییراتی در زمینه سیستم گمانه‌های پیشاهنگ، در ساختار دستگاه حفار اعمال گردد. در طراحی اولیه دستگاه، نقاط تعبیه شده برای حفاری گمانه‌های پیشاهنگ (به تعداد ۷ حفره) تنها در نیمکره بالایی سپر (موقعیت ساعت ۱۰ تا ۲ در جهت حرکت عقربه‌های ساعت) ایجاد شده بود، لذا امکان حفاری گمانه پیشاهنگ در نیمکره پایین سپر (ساعت ۲ تا ۱۰ در جهت حرکت عقربه‌های ساعت) وجود نداشت (جودکی و همکاران، ۱۳۹۷-ب). از این‌رو با تصمیم اعضاء تیم فنی، جهت پیش‌بینی و مقابله با جریان‌های شدید آب زیرزمینی، در نیمکره پایینیِ سپرِ میانی تعداد ۹ حفره تعبیه شد (شکل ۲۵. بخش الف) و با نصب لولهٔ هادی بر روی این حفرات (شکل ۲۵. بخش ب)، همانند موقعیت‌های نیمکره بالایی سپر، برای حفاری گمانه‌های اکتشافی (با هدف انجام تزریق ثانویه و بهسازی زمین) آماده شدند.

از طرفی تجهیزات مربوط به حفاری گمانه پیشاهنگ دستگاه از مدل‌های قدیمی بود، لذا تصمیم گرفته شد که این دستگاه نیز تعویض گردد و یک دستگاه جدید بر روی شاسی ارکتور دستگاه نصب شود که هم قدرت مانور بیشتری (به‌ویژه در موقعیت‌های نیمکره پایین سپر) نسبت به دستگاه قبلی داشته باشد و هم در مدت زمان کمتری امکان حفاری گمانه‌های با طول بیشتر را مهیا سازد (شکل ۲۵. بخش ج). به این شیوه، قابلیت دستگاه جهت تزریق و بهسازی زمین در زون گسلی (با هدف حفاظت از آبخوان چشمه سراب گرم) افزایش داده شد. (جودکی و همکاران، ۱۳۹۹).

پیش از وقوع زلزله، چنین برنامه و اقداماتِ محتاطانه‌ای در دستور کار تیم فنی و اجرایی پروژه تونل بازی‌دراز وجود نداشت. در حقیقت بحران‌های اجتماعی ناشی از مخاطرات زمین‌شناسی (زلزله، زمین‌لغزش و ...)، فضایی را ایجاد کرده بود که منطقه، پتانسیل و ظرفیت تحمل یک بحران جدید (کاهش ناگهانی منابع آب شرب) را نداشت و این مسئله می‌توانست با بروز مناقشات شدید اجتماعی در منطقه محروم و زلزله زده سرپل‌ذهاب همراه گردد. از این‌رو تغییر در ساختار دستگاه به منظور کنترل آب هجومی در حین حفاری یک اقدام به شدت محافظه‌کارانه بود که در شرایط عادی (اگر زلزله و مخاطرات زمین‌شناسی ناشی از آن رخ نمی‌داد) هیچگاه در دستور کار قرار نمی‌گرفت. لذا کلیه ملاحظات اجرایی در تونل‌های بازی‌دراز و سرپل ذهاب به‌طور مستقیم و غیر مسقیم متأثر از مخاطرات زمین‌شناسی در منطقه (زمین‌لرزه، زمین‌لغزش، بهمن سنگی و ...) بوده است.



شکل ۲۵: الف: تعبیه حفره در نیمکره پایین سپر. ب: نصب لوله‌های هادی بر روی حفره‌ها. ج: دستگاه حفاری گمانه پیشرو.

نتیجه‌گیری

هدف از دانش زمین‌شناسی شهری، شناخت مخاطرات زمین‌شناسی و کاهش آسیب‌های ناشی از آن‌ها در جهت توسعه پایدار مناطق شهری می‌باشد. این دانش، اطلاعات مورد نیاز جهت برنامه‌ریزی و مدیریت کاربری زمین در مناطق شهری را تأمین می‌کند. در محدوده شهری سرپل‌ذهاب، سازه‌های مسکونی بر گستره‌ای از واحدهای سنگی سازندهای «بختیاری، آغاجاری، گچساران، آسماری، پابده، تله زنگ، امیران، گورپی، ایلام، سروک» و نیز آبرفت‌های کواترنری قرار گرفته است. بر اساس نتایج این تحقیق، رخداد زمین‌لرزه به دلیل خصوصیات ویژه سازندهای زمین‌شناسی منطقه، زمینه‌ساز وقوع مخاطرات دیگر زمین‌شناسی (زمین‌لغزش، بهمن سنگی، جریان واریزه‌ای، روانگرایی) در محدوده مطالعاتی گردیده بود و حساسیت‌های اجرایی تونل‌های مجاور شهر نیز به طور مستقیم

تحت تأثیر خصوصیات زمین‌شناسی این سازندها بوده است. در شرایطی که گسترهٔ شهرستان دچار بحرانی فراگیر شده بود و سکونتگاه اهالی در مناطق روستایی منطقه نیز به واسطه مخاطرات زمین‌شناسی (زمین‌لغزش و ...) تهدید می‌گردید، عملیات حفاری تونل‌ها بدون در نظر گرفتن تمهیدات لازم (اثرات منفی بر منابع آب و جاده‌های مواصلاتی شهر)، می‌توانست موجب تشدید بحران‌های اجتماعی در منطقهٔ زلزله‌زده گردد. در چنین شرایطی عملیات اجرایی سازه‌ها می‌بایست متناسب با ویژگی‌های زمین‌شناسی ساختگاه و نیز با ملاحظهٔ شرایط بحرانی منطقهٔ زلزله‌زده انجام می‌گرفت. لذا در هر دو پروژه با استفاده از قابلیت‌های دستگاه‌های حفار (تنظیم فشار سینه‌کار و تقویت سیستم گمانه‌های پیشاهنگ دستگاه) و نیز با اتخاذ راه‌کارهای اجرایی دیگر (حفر کانال و لوله‌گذاری در موقعیت رودخانه‌ها، نصب ابزارهای نشست‌سنجی در موقعیت جاده‌ها و...) محور تونل از محل تلاقی با جریان‌های آب زیرزمینی- سطحی و نیز از محل تلاقی با جاده‌ها به شکلی ایمن عبور کرد تا از تشدید بحران در منطقهٔ زلزله‌زده پیشگیری شود.

تقدیر و تشکر

از آنجایی که بخشی از مقاله به واسطهٔ تجارب اجرایی در تونل‌های انتقال آب سرپل‌ذهاب و بازی‌دراز، شکل گرفته است؛ لذا مؤلفین بر خود لازم می‌دانند از همکاران صنعتی خود در واحدهای خدمات مهندسی، نظارت و تیم اجرایی این تونل‌ها، تشکر نمایند. همچنین از دوستان و همکاران گرامی در پژوهشکده بین‌المللی زلزله‌شناسی نیز به‌طور ویژه قدردانی می‌گردد.

منابع

آقانباتی، علی، (۱۳۸۳). زمین‌شناسی ایران، انتشارات سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، چاپ اول.

بسطامی، مرتضی؛ بهرامی، جمیل؛ بنفشی، منصور (۱۳۹۶). عملکرد سامانه‌های شریان‌های حیاتی (جلد سوم، سازه و شریان‌های حیاتی)، گزارش زمین‌لرزه ۲۱ آبانماه ۱۳۹۶ سرپل‌ذهاب استان کرمانشاه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، صص ۲۸۵-۲۵۶.
http://www.iiees.ac.ir/fa/

تاتار، محمد، قایمقامیان، محمدرضا، یمینی فرد، فرزام، حسامی آذر، خالد، انصاری، انوشیروان، فیروزی، عرفان، (۱۳۹۶). لرزه زمین‌ساخت، لرزه‌خیزی و مدل‌سازی حرکت قوی زمین (جلد اول، جنبه‌های زلزله‌شناسی)، گزارش زمین‌لرزه ۲۱ آبانماه ۱۳۹۶ سرپل‌ذهاب استان کرمانشاه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.
http://www.iiees.ac.ir/fa/

جودکی، وحید.، اجل‌لوئیان، رسول.، مبرقعی‌دینان، نغمه.، سهرابی‌بیدار، عبدالله. و عالی‌انوری، ع.، (۱۳۹۸). جایگاه مبانی نظریهٔ اخلاق زمین در پایش اثرات اکوهیدرولوژیکی پروژه‌های عمرانی"، فصلنامهٔ علمی پژوهشی انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران. سال دوازدهم، شماره ۴، صص ۱۴۳-۱۲۳.
http://www.jiraeg.ir/article_101381.html

جودکی، وحید.، سهرابی‌بیدار، عبدالله.، اجل‌لوئیان، رسول.، امینی، نوید. و دیکمن، توماس.، (۱۳۹۷-الف). ارزیابی نتایج آزمایش پیش‌بینی لرزه‌ای تونل (TSP) بر اساس شواهد زمین‌شناسی و تحلیل پارامترهای عملیاتی دستگاهِ EPB Hard Rock، مجله علمی پژوهشی انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران، جلد یازدهم، شماره ۲، صص ۳۱-۱۵.
http://www.jiraeg.ir/article_83487.html

جودکی، وحید.، حسن‌پور، جعفر.، اجل‌لوئیان، رسول.، (۱۳۹۷-ب). ارتباط علوم زمین‌شناسی و مهندسی مکانیک در افزایش بهره‌وری ماشین‌های حفار تمام مقطع، مجله علمی پژوهشی انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران، جلد یازدهم، شماره ۴، صص ۲۴-۱.
http://www.jiraeg.ir/article_87474.html

جودکی، وحید.، حسن‌پور، جعفر.، اجل‌لوئیان، رسول.، مسیح‌طهرانی، مسعود.، (۱۳۹۹). لزوم بومی‌سازی دانش بهسازی ماشین‌های حفار تی‌بی‌ام در شرایط متنوع زمین‌شناسی ایران، مجله علمی ترویجی مهندسی مکانیک (انجمن مهندسان مکانیک ایران)، سال ۲۹، شماره ۱۳۰، صص ۲۴-۱۱.
http://mmep.isme.ir/article_39212.html

خبرگزاری ایسنا، (۱۳۹۶)، اخبار و تصاویر زلزله ۲۱ آبان ۱۳۹۶ شهرستان سرپل ذهاب. کد خبر: ۹۴۵۲۴.
https://www.isna.ir/news/9609030118

خبرگزاری مشرق نیور، (۱۳۹۶)، اخبار و تصاویر زلزله ۲۱ آبان ۱۳۹۶ شهرستان سرپل ذهاب. کد خبر: ۷۹۸۵۳۴.
https://www.mashreghnews.ir

حق‌شناس، ابراهیم؛ عشایری، ایمان؛ موسوی، سید مجتبی؛ بیگلری، مهنوش؛ معماری، محمدامین؛ صدر، آرمان؛ هوشیار، یادگار؛ شکربگی، موسی؛ کمریزاده، احسان؛ دستمزد، یزدان؛ سلطانی، سعید؛ جوادی نژاد، مهرداد (۱۳۹۶-الف). اثرات ساختگاهی (جلد دوم، پدیده‌های ژئوتکنیکی)، گزارش زمین‌لرزه ۲۱ آبانماه ۱۳۹۶ سرپل‌ذهاب استان کرمانشاه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، صص ۵۰-۳۷.
http://www.iiees.ac.ir/fa/

حق‌شناس، ابراهیم؛ عشایری، ایمان؛ موسوی، سید مجتبی؛ بیگلری، مهنوش؛ رخشنده، معصومه؛ تاجیک، وحید؛ معماریان، پرهام؛ زارع، محمدعلی؛ مبین، پریسا (۱۳۹۶-ب). ناپایداری‌های زمین‌شناختی و ژئوتکنیکی ناشی از زمین‌لرزه (جلد دوم، پدیده‌های ژئوتکنیکی)، گزارش زمین‌لرزه ۲۱ آبانماه ۱۳۹۶ سرپل‌ذهاب استان کرمانشاه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، صص ۱۲۱- ۵۱.
http://www.iiees.ac.ir/fa/

سازمان فضایی ایران، (۱۳۹۶). نقشه بخش غربی شهر سرپل‌ذهاب پس از وقوع زلزله- گزارش پردازش تصاویر ماهواره‌ای زلزله.
https://www.isa.ir/

سلامت، امیر سعید.، (۱۳۹۶). سمینار یافته‌های ژئوتکنیکی زلزله کرمانشاه

سرپل‌ذهاب. مرکز تحقیقات راه مسکن و شهرسازی (وزارت راه و شهرسازی).

شرفی، حسن.، حسن‌زاده، سیده فائزه و رئیسی، نیلوفر، (۱۳۹۸). بررسی آسیب‌های وارده به ساختمان‌های فلزی شهرستان سرپل‌ذهاب بر اثر زلزله مطالعه موردی منطقه فولادی، یازدهمین کنگره ملی مهندسی عمران، شیراز. https://civilica.com/doc/917776

شرفی، حسن.، حسن زاده، سیده فائزه و رئیسی، نیلوفر، (۱۳۹۸). بررسی آسیب‌های وارده به ساختمان‌های بتن آرمه و بنایی شهرستان سرپل‌ذهاب بر اثر زلزله مطالعه موردی منطقه فولادی، یازدهمین کنگره ملی مهندسی عمران، شیراز.https://civilica.com/doc/917765

کوشک‌زری، مبین.، اسدی، ابراهیم (۱۳۹۷). نقد و تحلیل نقاط ضعف ساختمان‌ها در اثر زمین‌لرزه ۷/۳ ریشتری سرپل‌ذهاب، کنفرانس عمران- معماری و شهرسازی کشورهای جهان اسلام، تبریز. https://civilica.com/doc/775804/

گورابی، ابوالقاسم (۱۴۰۰). کمّی سازی زمین‌لغزش بزرگ مله‌کبود ناشی از زمین‌لرزه ۷/۳ سال ۱۳۹۶ کرمانشاه با استفاده از اینترفرومتری، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، سال بیست و یکم، شماره ۶۰، صص ۶۳-۴۷.https://jgs.khu.ac.ir/article-1-3003-fa.html

محمدزاده، حسین؛ و امیری، حمیده، (۱۳۹۸). بررسی زمان ماندگاری آب‌های زیرزمینی (آبرفتی و کارستی) محدوده پل‌ذهاب با توجه به تغییرات زمانی و مکانی ترکیب ایزوتوپی، تحقیقات منابع آب ایران، سال پانزدهم، شماره ۱، صص ۳۴۰-۳۲۷. http://iwrr.sinaweb.net/article_81238.html

مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن- وزارت راه و شهرسازی (۱۳۹۶). بانک اطلاعات ژئوتکنیک کشور.https://geotech.bhrc.ac.ir

منیعی، سالار.، باسامی، راشد.، احمدی، سیروان.، امانی، میلاد، (۱۳۹۸). مطالعه آماری خرابی زلزله ۲۱ آبان ماه ۱۳۹۶ سرپل‌ذهاب، یازدهمین کنگره ملی مهندسی عمران،شیراز./https://civilica.com/doc/917789

مهندسین مشاور ساحل، (۱۳۹۵). مطالعات مرحله اول، گزارش زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک پروژه تونل انتقال آب بازی‌دراز (T۵) طرح گرمسیری.

Bathrellos GD (2007). An overview in urban geology and urban geomorphology. Bull Geol Soc Greece 40(3):1354–1364.

Blöschl G, Hall J, Viglione A, Perdigão RA, Parajka J, Merz B et al (2019). Changing climate both increases and decreases European river floods. Nature 573(7772):108–111.

Chaparro JCM (2020). Identifying and mapping the risk of rockfall and landslide on roads and urban areas. In: Chaparro M, Carlos J (eds) Mapping the risk of flood, mass movement and local subsidence. Springer, Cham, pp 23–39

Culshaw, M.G., Price, S.J. 2010. The contribution of urban geology to the development, regeneration and conservation of cities. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 70, 333-376.

El May, M., Dlala, M., Chenini, I., (2010). Urban geological mapping: Geotechnical data analysis for rational development planning. Engineering Geology, Volume 116, Issues 1–2, 27 October 2010, Pages 129-138.

Karimi H, Raeisi E, Bakalowicz M (2004). Characterising the main karst aquifers of the Alvand basin, Northwest of Zagros, Iran, by a hydrogeochemical approach. Journal of Hydrogeology 13:787-799.

Legget RF (1969). Urban geology. Canadian Building Digest, 113; National Research Council: Ottawa, ON, Canada, pp. 4.

Liu Z, Cai Y, Wang S, Lan F, Wu X (2020). Small and medium-scale river flood controls in highly urbanized areas: a whole region perspective. Water 12(1):182.

Marker BR (2016). Urban planning: the geoscience input. Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications 27(1): 35–43.

McGill, J.T. (1964). Growing importance of urban geology, United States Geological Survey Circular 487.

Melelli, L,. Silvani, F,. Ercoli, M,. Pauselli, C,. Tosi, G,. Radicioni, F,. (2021). Urban Geology for the Enhancement of the Hypogean Geosites: the Perugia Underground (Central Italy), Geoheritage. pp 1-20. https://doi.org/10.1007/s12371-021-00545-z.

Petrosino, P, Claudia Angrisani, A,. Barra, D,. Donadio, C,. Aiello, G,. Allocca, V,. Coda, S,.De Vita,P,. Jicha, BR,. Calcaterra, D,. (2021). Multiproxy approach to urban geology of the historical center of Naples, Italy. Quaternary International Available online 5 January 2021.

Zare, M; Kamranzad, F; Parcharidis, I; Tsironi, V. (2017). Preliminary report of Mw7.3 Sarpol-e Zahab, Iran earthquake on November 12, 2017. https://www.researchgate.net/publication/323457221

Zheng H, Guo L, Liu J, Zheng T, Deng Z (2020). Evaluating seismic risk in small and medium-sized cities with the modified vulnerability index method, a case study in Jiangyou City, China. Bull Earthq Eng 18(4):1303–1319.

Burland J.B., Jamiolkowski M.B., Viggiani C., (2009). Leaning Tower of Pisa: Behaviour after Stabilization Operations. International Journal of Geoengineering Case histories, Vol.1, Issue 3, p.156-169.