



برآورد فشار سینه کار به روش حالت حدی سرویس، مطالعه مورد توسعه جنوبی خط ۶ متروی تهران

ارائه دهنده:

دکتر ابراهیم فرخ

مشاور عالی حفاری مکانیزه، مهندسین مشاور جامع بهرو

هیات علمی دانشگاه صنعتی امیرکبیر

رئوس مطالب

- اصول برآورد فشار سینه کار
- معیارهای حالت حدی در محاسبه فشار سینه کار
- معرفی پروژه خط ۶ متروی تهران و بررسی حالت‌های حدی
- جمع بندی

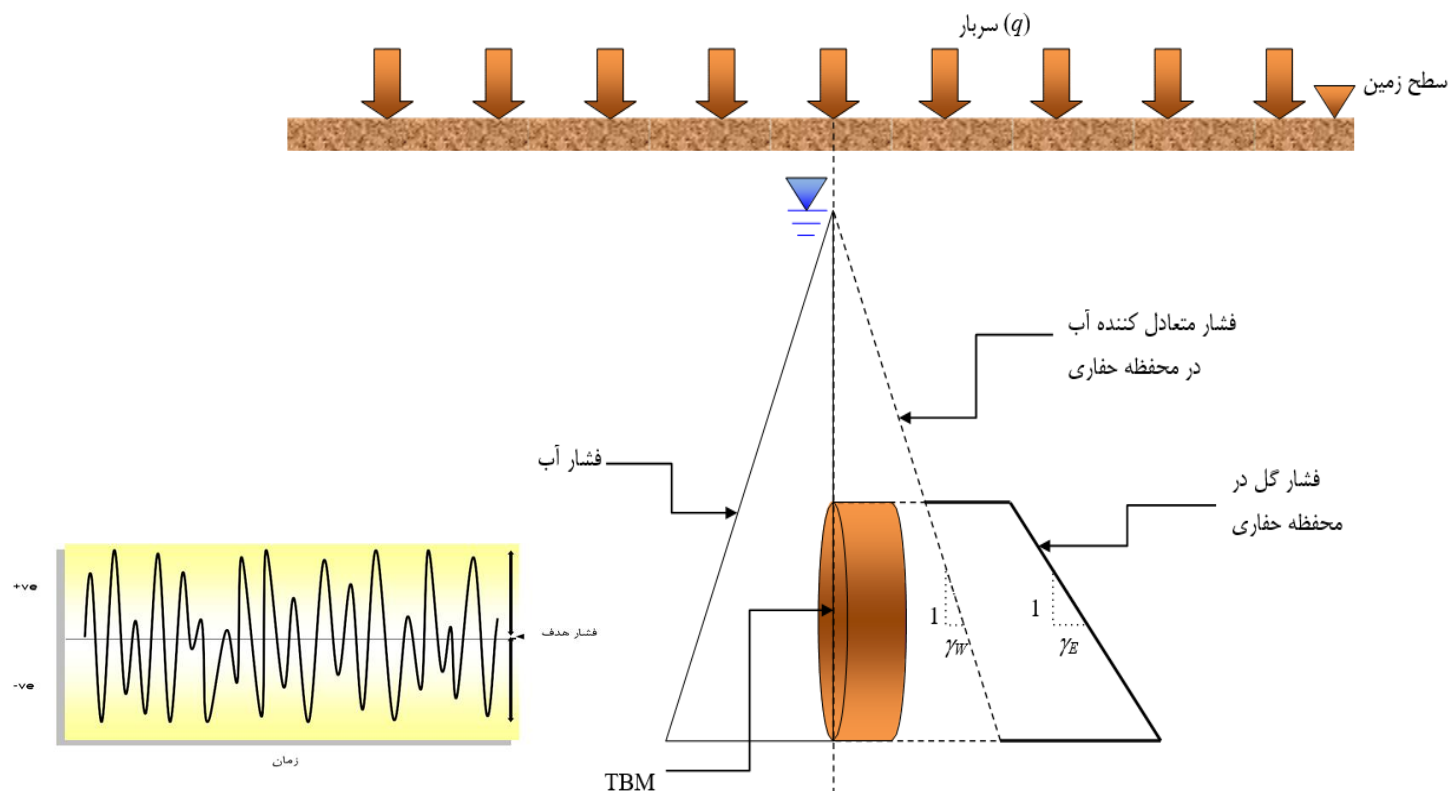
اصول برآورد فشار سینه کار

- نمونه هایی از پیامدهای کنترل نامناسب فشار سینه کار در تونل های حفر شده در زمین های شهری:



اصول بر آورد فشار سینه کار

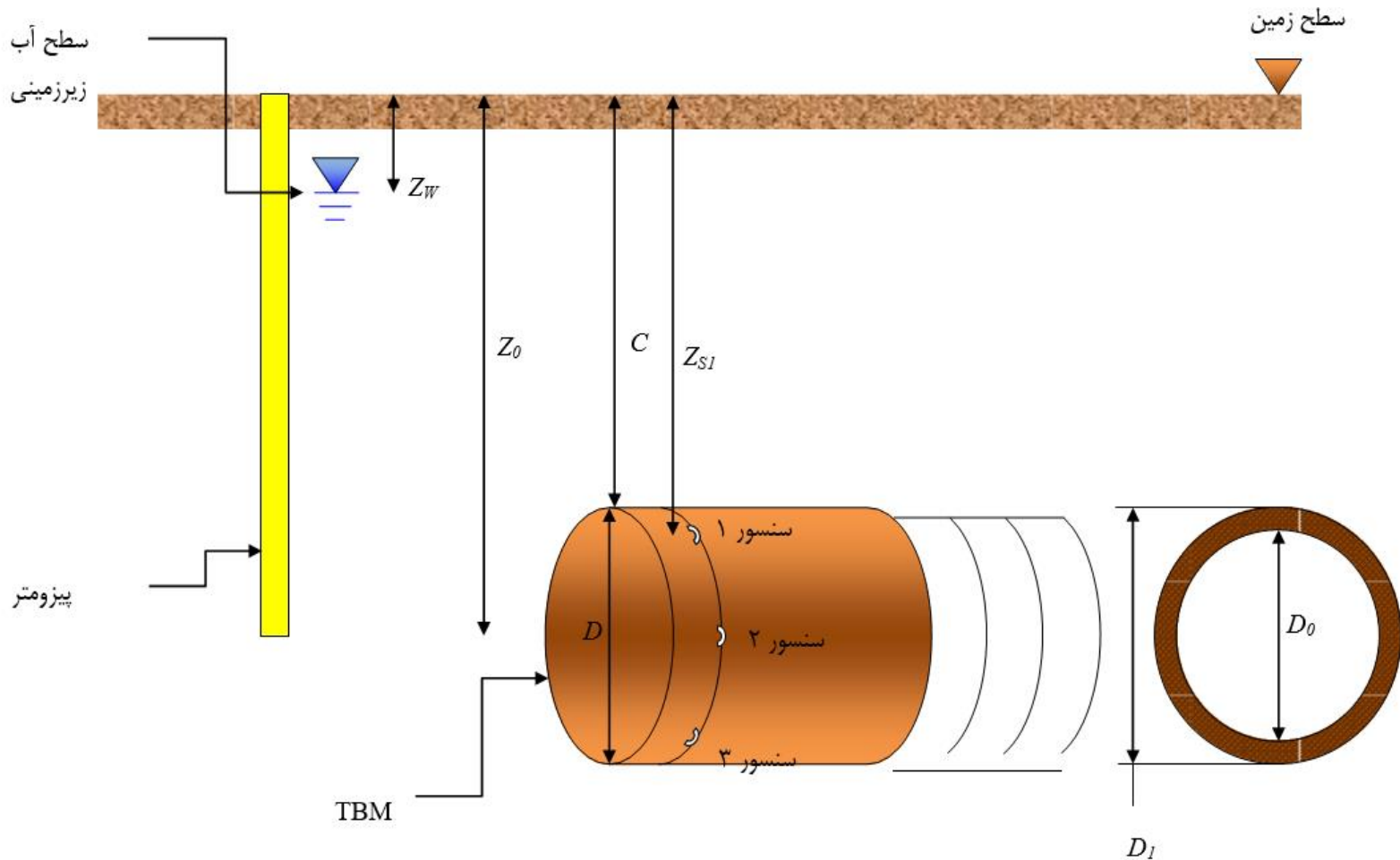
- نحوه تعادل فشار سینه کار با فشار آب و فشار زمین:



$$P_{Et} = \text{فشار آب} + \text{فشار مؤثر ناشی از اثر تنش مؤثر و سربار} + \text{جزء مرتبط با تغییرات فشار سینه کار}$$

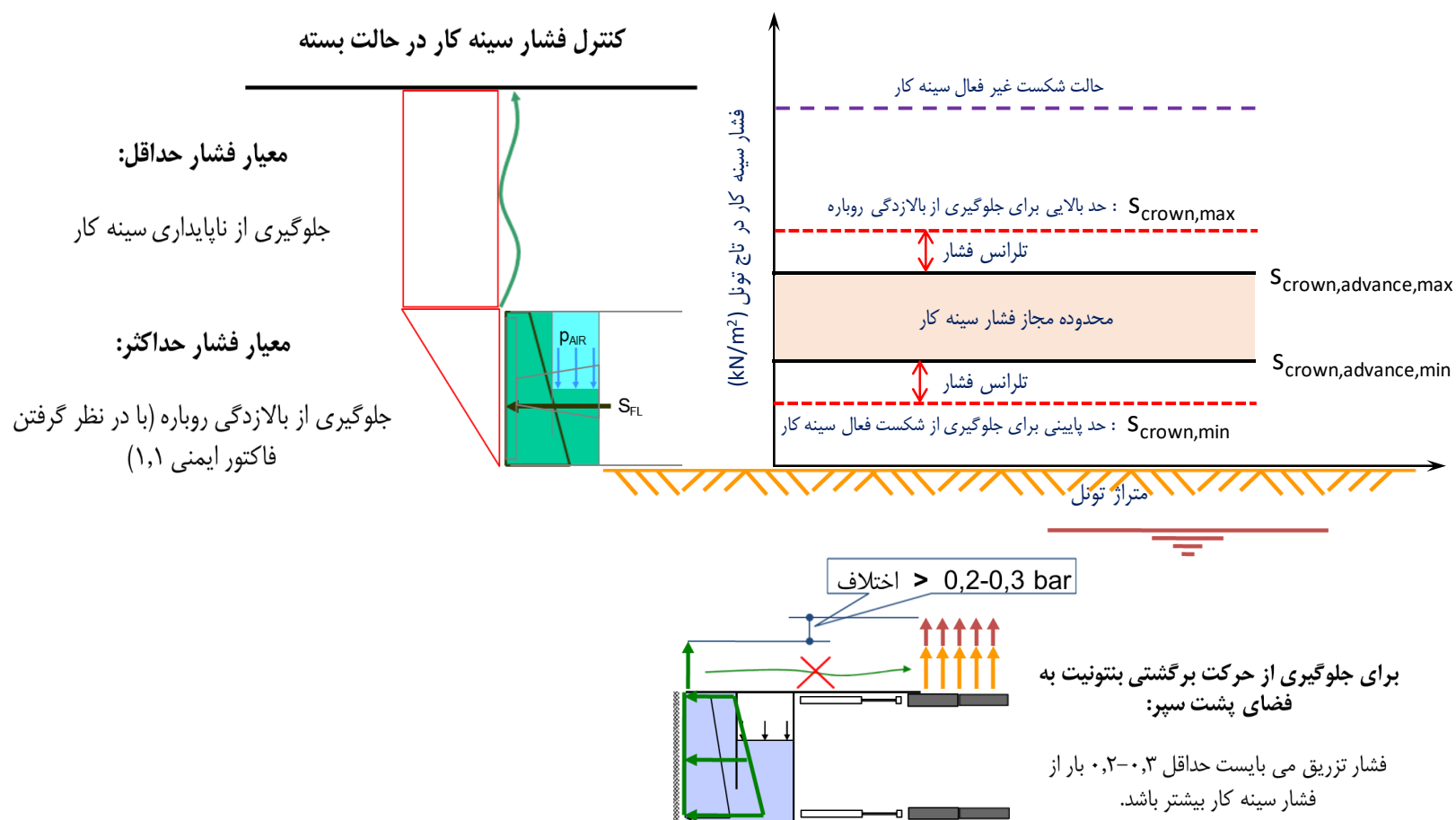
اصول برآورد فشار سینه کار

- نقشه موقعیت سنسورهای محفظه حفاری و ابعاد مرتبط با محاسبه با فشار سینه کار:



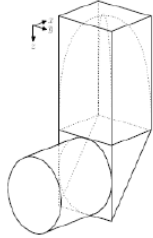
اصول بر آورد فشار سینه کار

- از معیارهای به کار گرفته شده در تعیین فشارهای حداقلی و حداکثری بر اساس آیین نامه آلمانی :

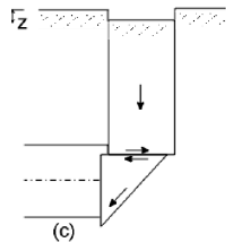


روش‌های محاسبه فشار سینه کار

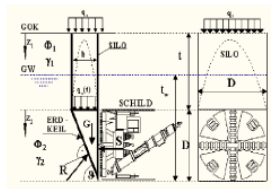
- روش‌های تحلیلی



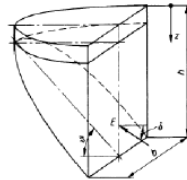
Wedge with silo [Horn]



Wedge with silo and joint [Kirsch]



Wedge with silo and arching effect [Jancsecz]

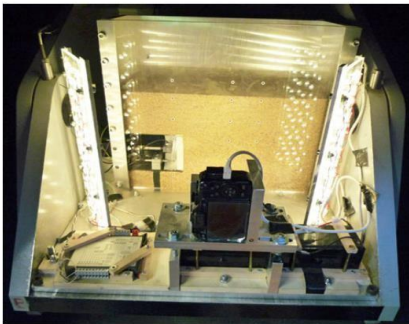


Wedge DIN 4085 [Piaskowski/Kowalewski]

- روش‌های تجربی

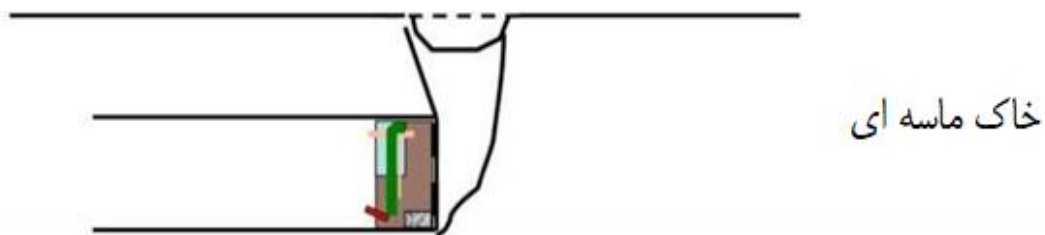
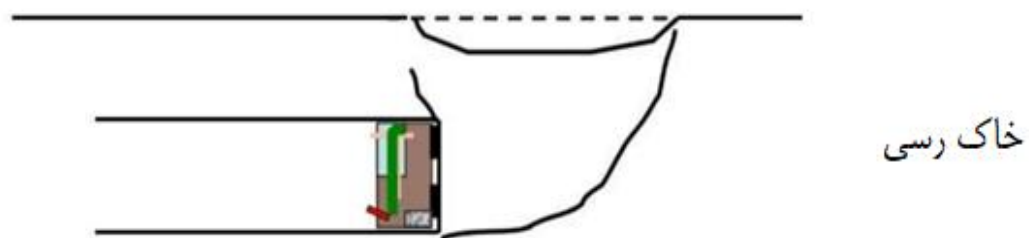
- روش‌های آزمایشگاهی

- روش‌های عددی



مکانیسم های شکست سینه کار

- مکانیسم های شکست سینه کار در خاکهای رسی و ماسه ای بر اساس آزمایشهای سانتریفیوژ :



روش‌های تجربی

- معیارهای کلی تعیین کننده حد بالایی و پایینی فشار سینه کار:

حد بالایی و پایینی فشار سینه کار	معیار فشار سینه کار
یک حد پایین از فشار سینه کار را نشان می‌دهد. فشار سینه کار را در حالتی که عدد پایداری کمتر از ۴ است، می‌توان صفر فرض کرد.	فشار سینه کار برای تامین پایداری خاکهای چسبنده
یک حد پایین از فشار سینه کار را نشان می‌دهد. متعادل کردن فشار فعال زمین از ناپایداری سینه کار و لغزش گوه جلوی آن، جلوگیری می‌کند.	فشار جانبی فعال زمین
یک حد پایین از فشار سینه کار را نشان می‌دهد. تعادل فشار هیدرواستاتیک آب از اعمال نیروی ناپایدار کننده نشت آب جلوگیری می‌کند.	فشار هیدرواستاتیک آب
یک حد پایین از فشار سینه کار را نشان می‌دهد. متعادل کردن فشار جانبی در حالت سکون زمین از افت حجمی بیش از حد محدوده جلوی سینه کار جلوگیری می‌کند.	فشار جانبی در حالت سکون زمین
یک حد بالا از فشار سینه کار را نشان می‌دهد. فشار بیشتر از فشار قائم زمین در زمینهای با دانه بندی درشت ممکن است منجر به بالازدگی روباره شود.	فشار قائم زمین (تنش کل)
یک حد بالا از فشار سینه کار را نشان می‌دهد. فشار نزدیک به فشار جانبی غیر فعال زمین ممکن است منجر به ایجاد تغییر شکلهای پلاستیک محدوده جلوی سینه کار و بالای سینه کار شود که خود ممکن است منجر به برآمدگی سطح زمین شود.	فشار جانبی غیر فعال زمین

روش‌های تجربی

- معیارهای کلی تعیین کننده حد بالایی و پایینی فشار سینه کار:

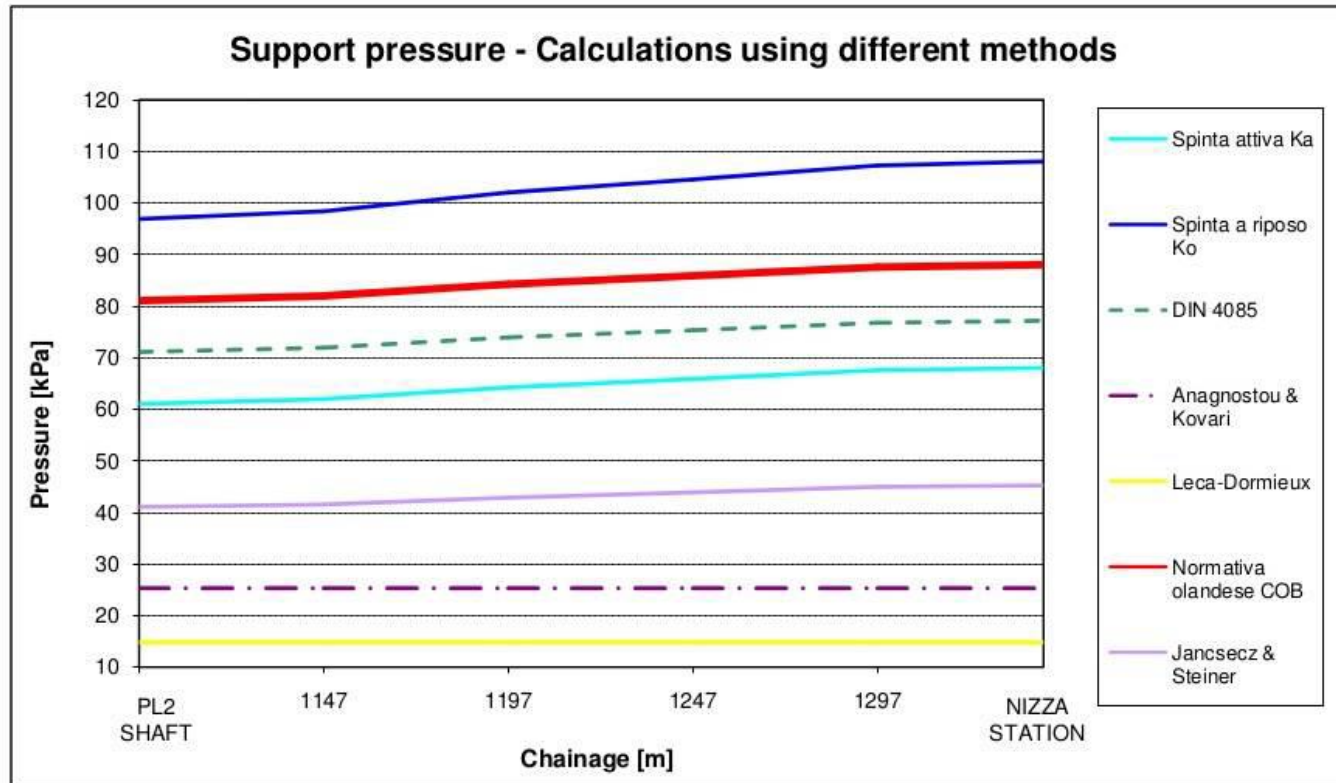
									m	9.2	قطر ماشین	
									bar	0.3	تیرانس فشار	
									kN/m ³	19.5	وزن مخصوص کل خاک	
									kN/m ³	9.5	وزن مخصوص غوطه ور خاک	
		$s_{min} = (k_a \sigma'_v + p_w) + v$										
باید مثبت باشد	هدف	حد پایینی	حد پایینی			حد بالایی						
اختلاف فشار هدف و تنش کل	فشار هدف در محور تونل	تنش موثر افقی + فشار آب در محور تونل	فشار آب در محور تونل	ضریب تنش افقی فعال	تنش موثر قائم در محور تونل	تنش کل در محور تونل	زاویه اصطکاک خاک	عمق سطح آب	عمق محور تونل	عمق کف تونل	عمق تاج تونل	متراژ
bar	bar	bar	bar	-	bar	bar	°	m	m	m	m	-
0.6	2.4	2.1	1.0	0.49	2.3	3.3	20	7.0	17.0	21.6	12.4	2000
0.6	2.5	2.2	1.0	0.49	2.3	3.3	20	7.0	17.2	21.8	12.6	2200
0.9	3.6	3.3	1.9	0.49	2.9	4.8	20	5.5	24.6	29.2	20.0	2600
0.8	3.4	3.1	1.8	0.49	2.8	4.6	20	5.5	23.4	28.0	18.8	3000

مقایسه نتایج روش‌های محاسبه فشار سینه کار

- نتایج روش‌های مختلف برآورد فشار مورد نیاز سینه کار در تونل Torino:

LINE 1 EXTENSION METRO TORINO

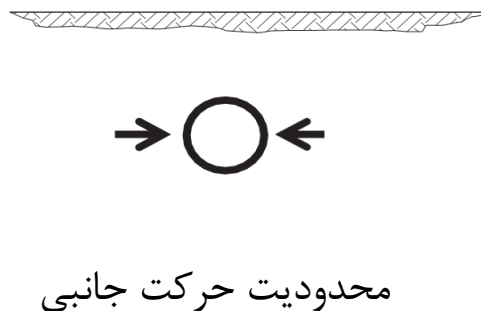
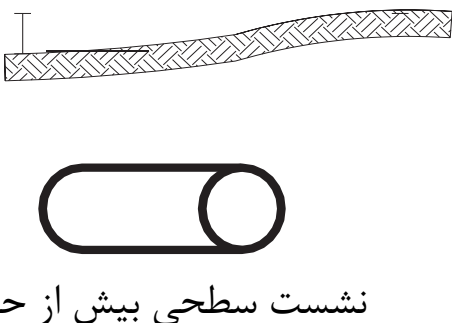
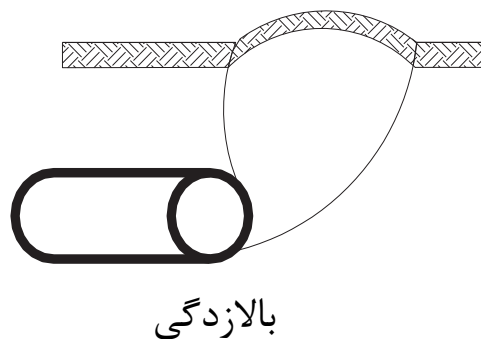
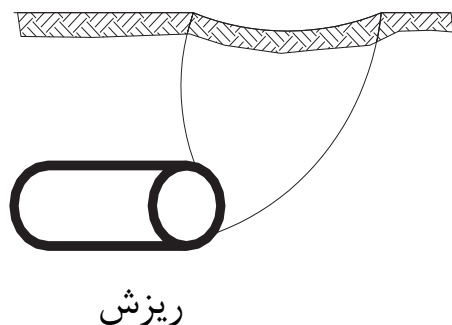
DESIGN PHASE - SUPPORT PRESSURE CALCULATION



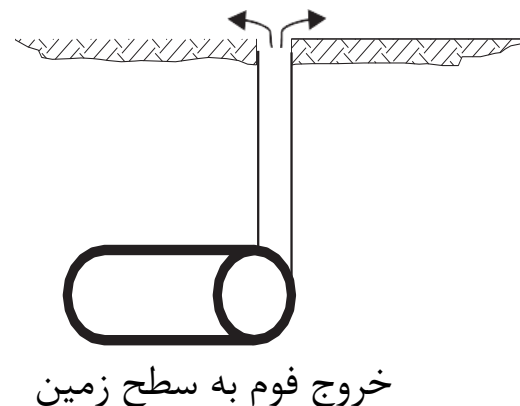
معیارهای حالت حدی در محاسبه فشار سینه کار

- دو دیدگاه اساسی برای طراحی نگهداری سینه کار تونل وجود دارد که بر اساس دو معیار حالت حدی در نظر گرفته می‌شود:

• حالت حدی نهایی (ULS)

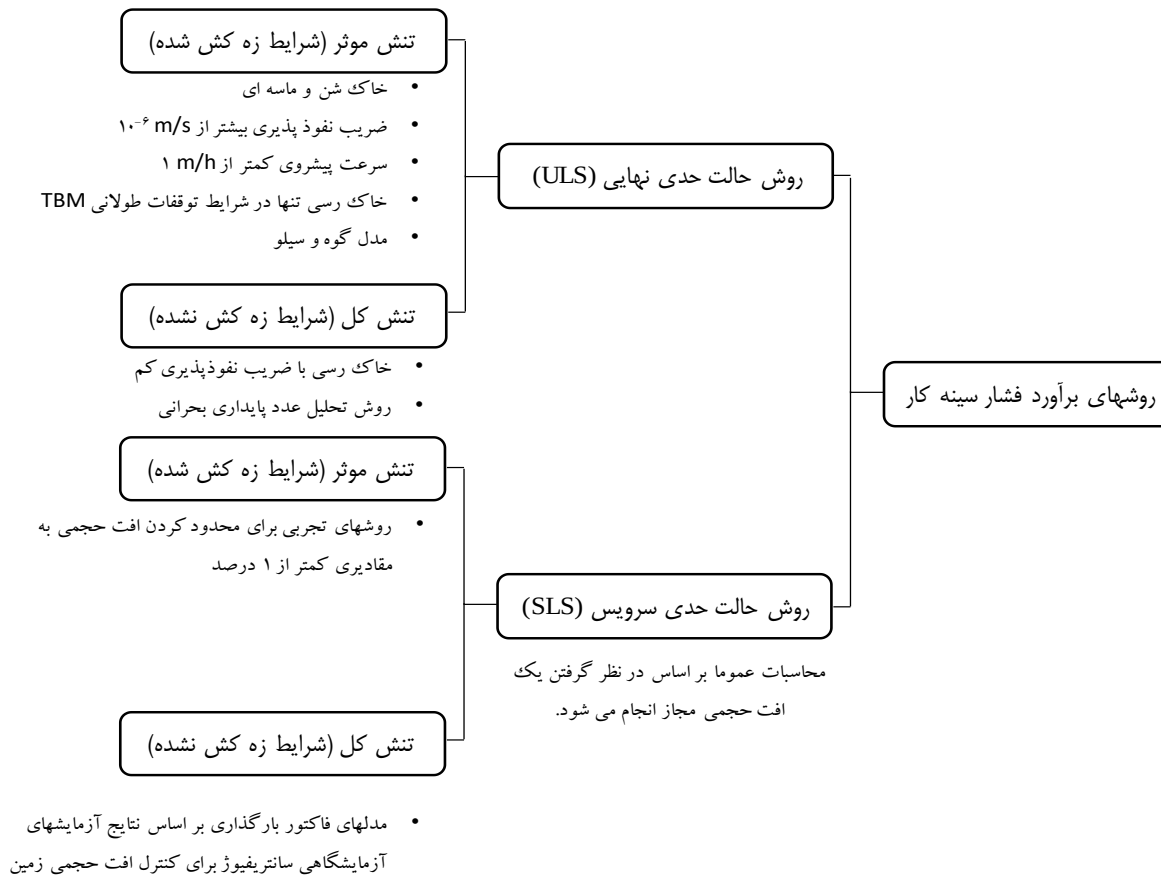


• حالت حدی سرویس (SLS)



معیارهای حالت حدی در محاسبه فشار سینه کار

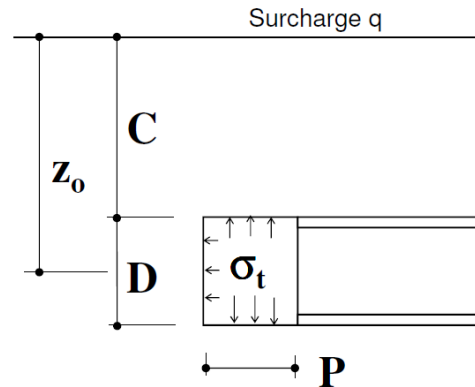
- روش‌های برآورد فشار سینه کار بر اساس دو روش تعادل حدی نهایی و سرویس:



تنش کل و حالت حدی نهایی

- عدد پایداری سینه کار:

$$N = (\gamma Z_0 + q - P_E) / c_u$$

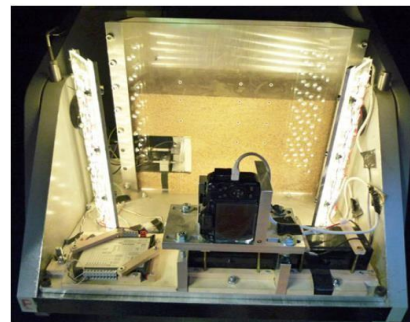
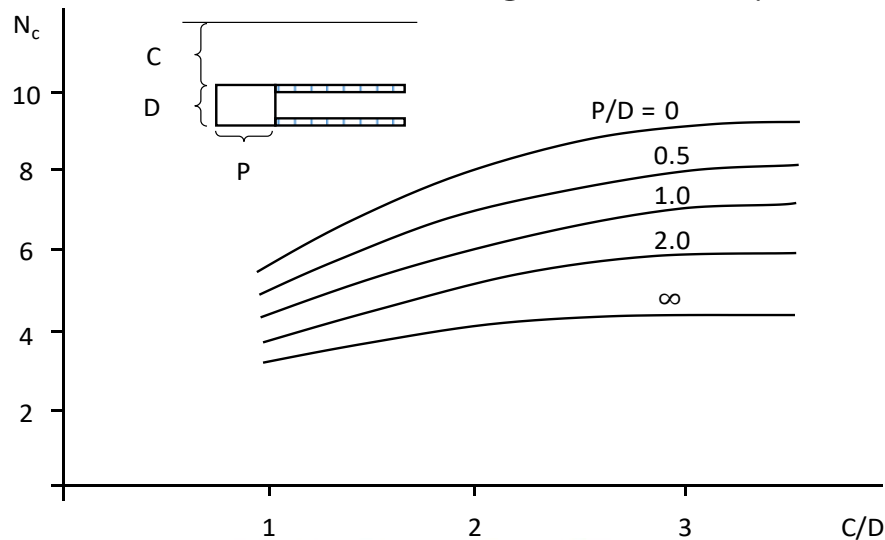
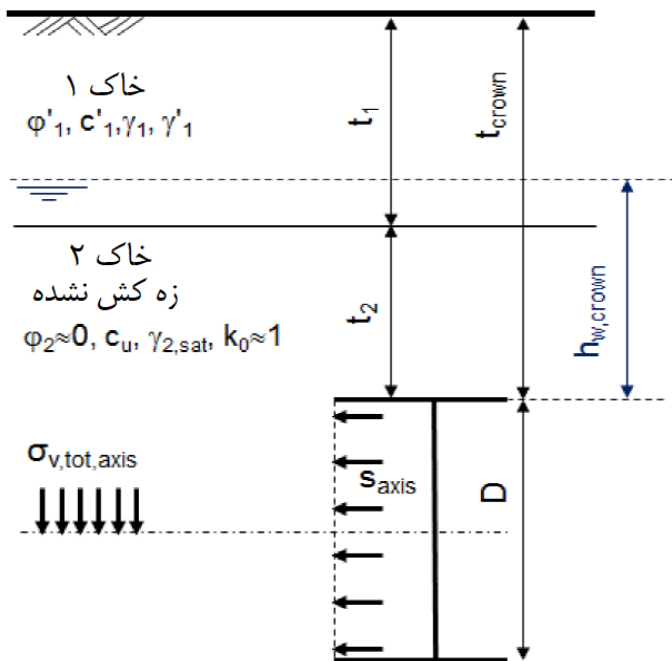


P_E : فشار اندازه گیری شده در مرکز تونل، γ : چگالی کل خاک، Z_0 : عمق محور تونل، q : سربار، c_u : مقاومت برشی زه کش نشده، N : اندیس پایداری سینه کار

نسبت پایداری	رفتار سینه کار تونل
$N < 3$	پایداری کلی سینه کار تونل معمولاً تضمین می شود.
$3 < N < 5$	در ارزیابی ها، باید توجه ویژه ای به ریسک نشست سطحی شود.
$5 < N < 6$	انتظار می رود، افت حجمی زیادی در سینه کار رخ دهد.
$N > 6$	تونل ناپایدار است و احتمال ریزش در تونل وجود دارد.

تنش کل و حالت حدی نهایی

• عدد پایداری بحرانی:



نتایج آزمایشات تونل (از طریق دستگاه گریز از مرکز) کیمورا و
میر (۱۹۸۱)

$$N_{cr} = 5.8613 \cdot \left(\frac{t_2}{D}\right)^{0.4156}$$

$$N = N_{cr} / \eta$$

تنش کل و حالت حدی نهایی

- فشار هدف در سنسور تاج محفظه حفاری:

$$P_E = (\gamma Z_0 + q) - (c_u N_{cr})$$

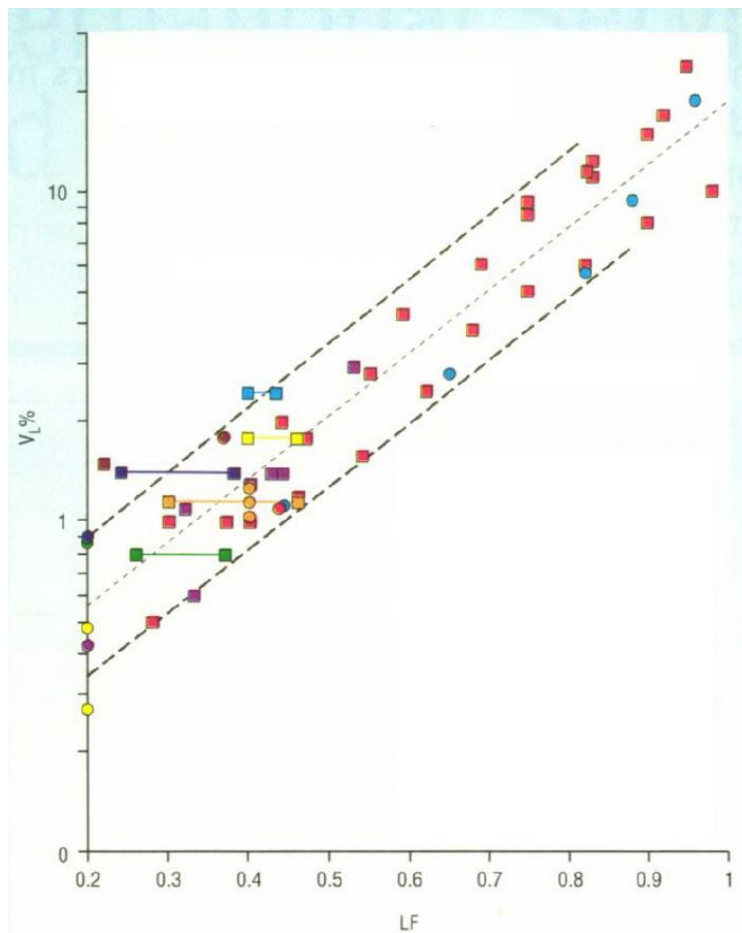
$$P_{Et} = P_E + v$$

$$P_{Et(S1)} = P_{Et} - (Z_0 - Z_{S1})\gamma_E$$

- فشار نگهداری تاج تونل حداقل می بایست ۱.۰۵ برابر بیشتر از فشار آب زیرزمینی باشد (در حالت حفاری نیمه بسته و برای دسترسی تحت فشار به محفظه حفاری، این بررسی باید برای پایین ترین نقطه تماس هوای فشرده با سینه کار، انجام شود).

تنش کل و حالت حدی سرویس

• فاکتور بارگذاری: $LF = N/N_{cr}$



• مقدار افت حجمی متوسط زمین برای $LF > 0.2$ از طریق فرمول زیر به دست می آید:

$$VL = 0.23 e^{4.4 LF}$$

مثال: تنش کل و حالت حدی سرویس

- عمق محور تونل: ۲۳.۴ متر
- قطر تونل: ۹.۱۵ متر
- مقاومت برشی زه کش نشده: ۹۰ کیلوپاسکال

P_E (kPa)	$N = (\gamma Z_0 + q - P_E) / c_u$	LF	VL (%)
0	4.6	0.6	2
50	4	0.5	1.3
80	3.75	0.44	1
175	2.7	0.32	0.5
205	2.4	0.28	0.44
250	1.9	0.22	0.34

معرفی پروژه

- محدوده مورد بررسی :

A6

- از متر ۲۲۵۰ تا ۳۱۰۰ به طول ۸۵۰ متر نیاز

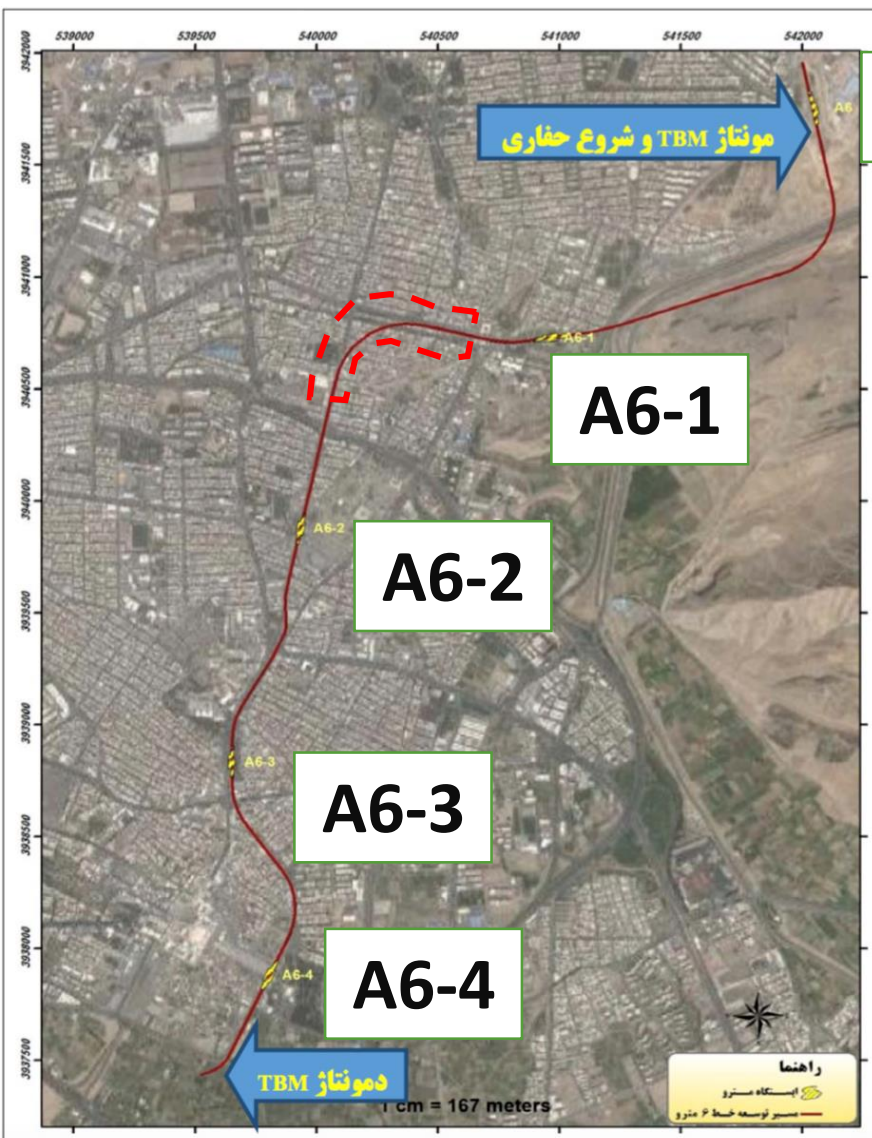
به پایش دقیق نشست و کنترل پارامترهای
اپراتوری بود

A6-1

A6-2

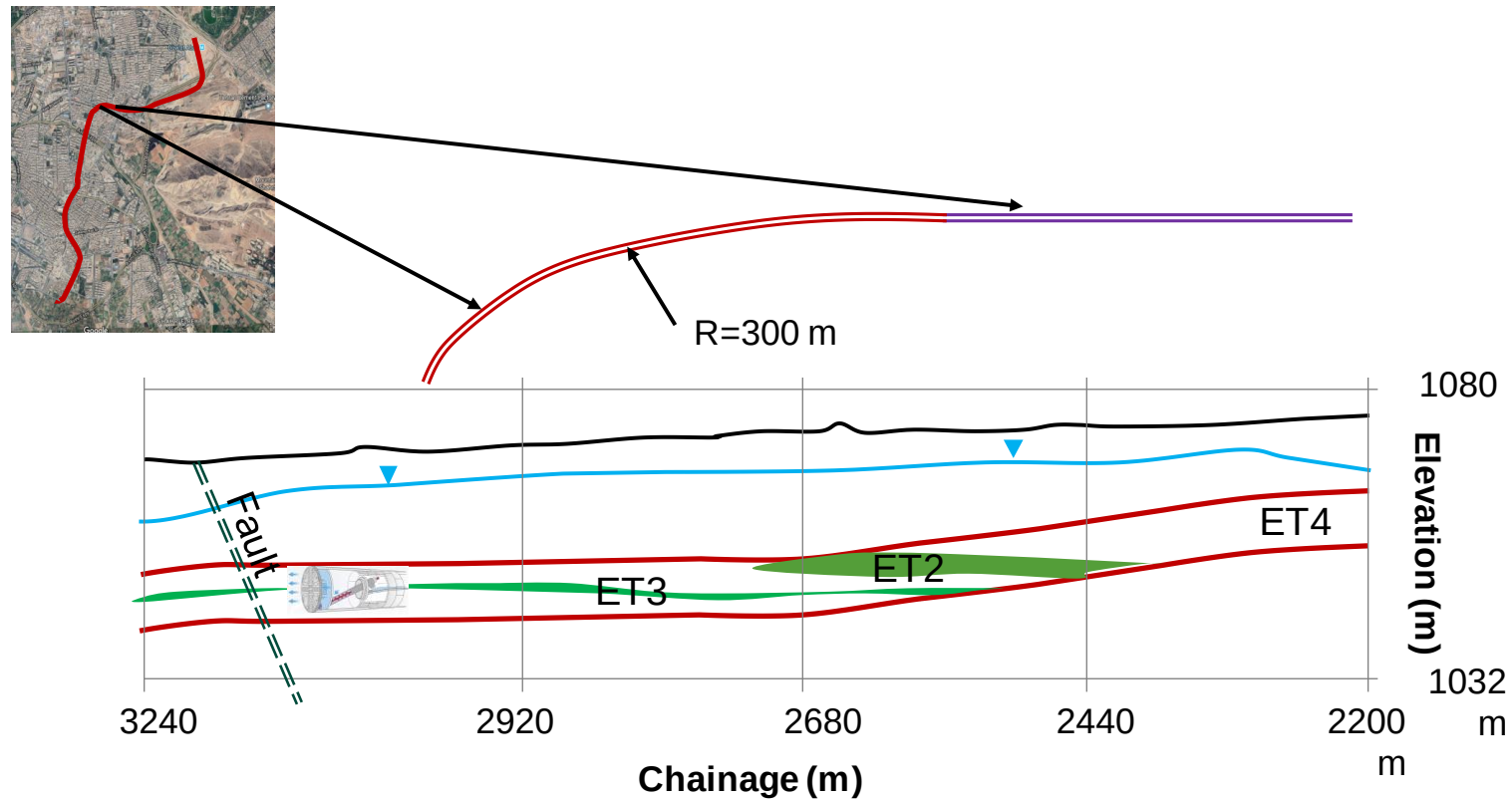
A6-3

A6-4



معرفی پروژه

- مقطع زمین شناسی :

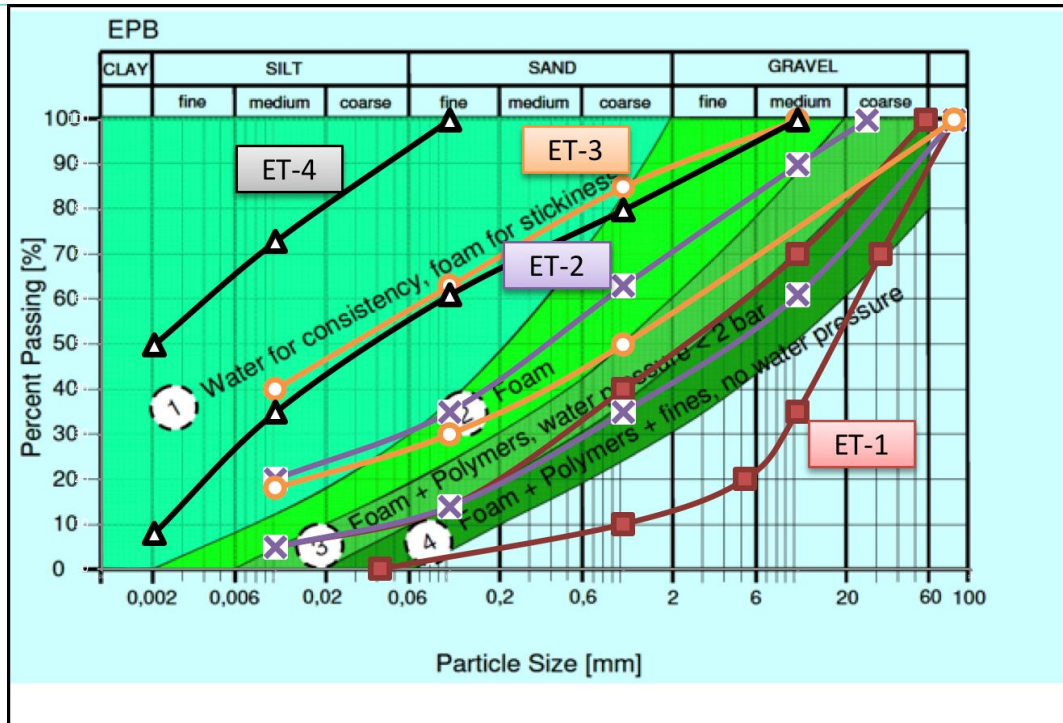


Cover (m)	18	19	20	21	19	16	13
GWD (m)	8	5.5	5.5	6	5.5	7	7
Water Head	10	13.5	14.5	15	13.5	9	6

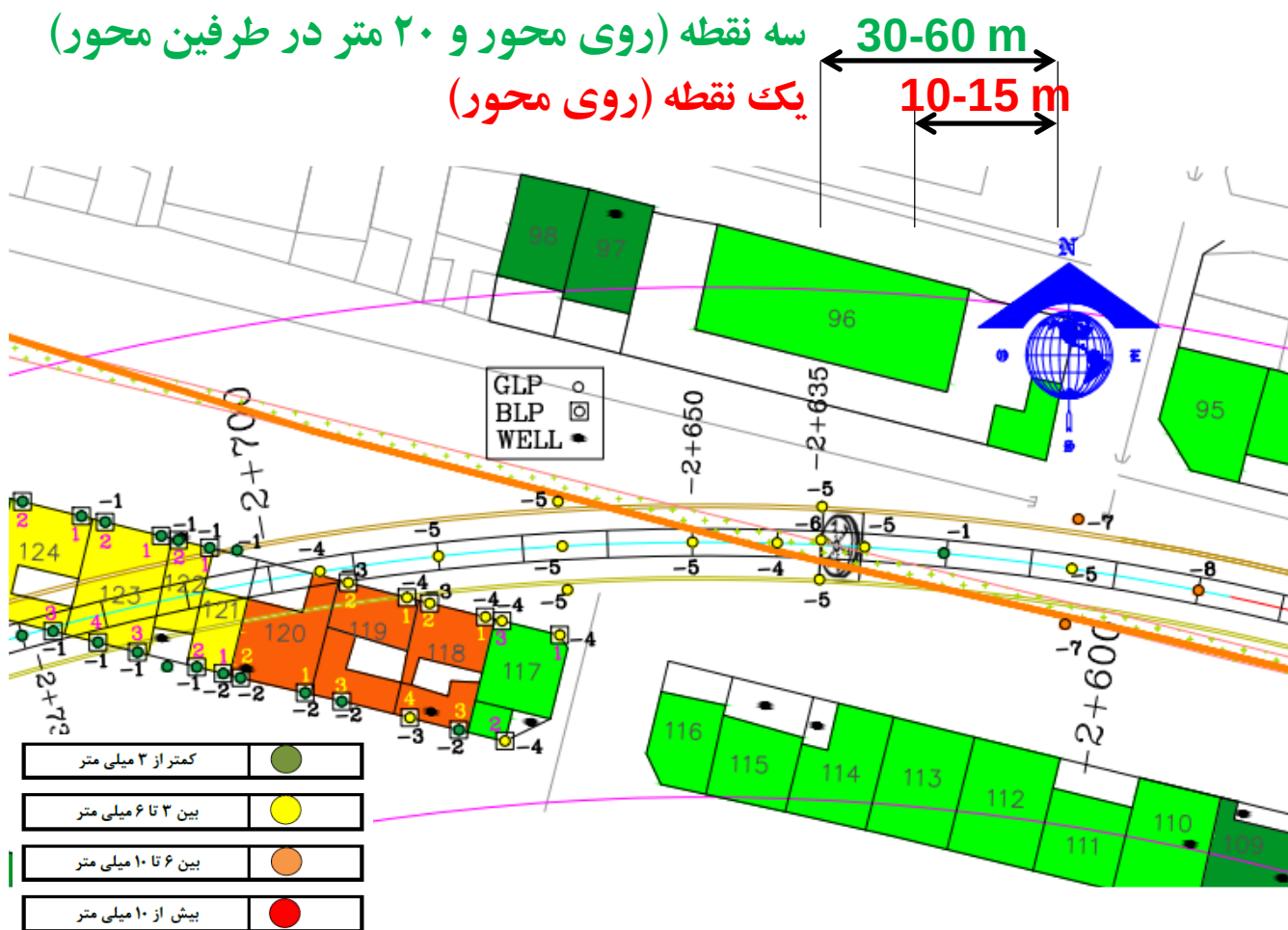
معرفی پروژه

- واحدهای زمین شناسی :

ET-4	ET-3	ET-2	ET-1	واحد زمین شناسی مهندسی
clayey SILT & silty CLAY with sand, very sandy CLAY (or SILT)	very silty clayey SAND with gravel, very sandy CLAY (or SILT) with gravel	very gravely SAND with silt & clay	sandy GRAVEL & gravely SAND	توصیف خاک
>50 %	<60 & >25 %	<30 & >10 %	<15 %	درصد رد شده از الک ۲۰۰

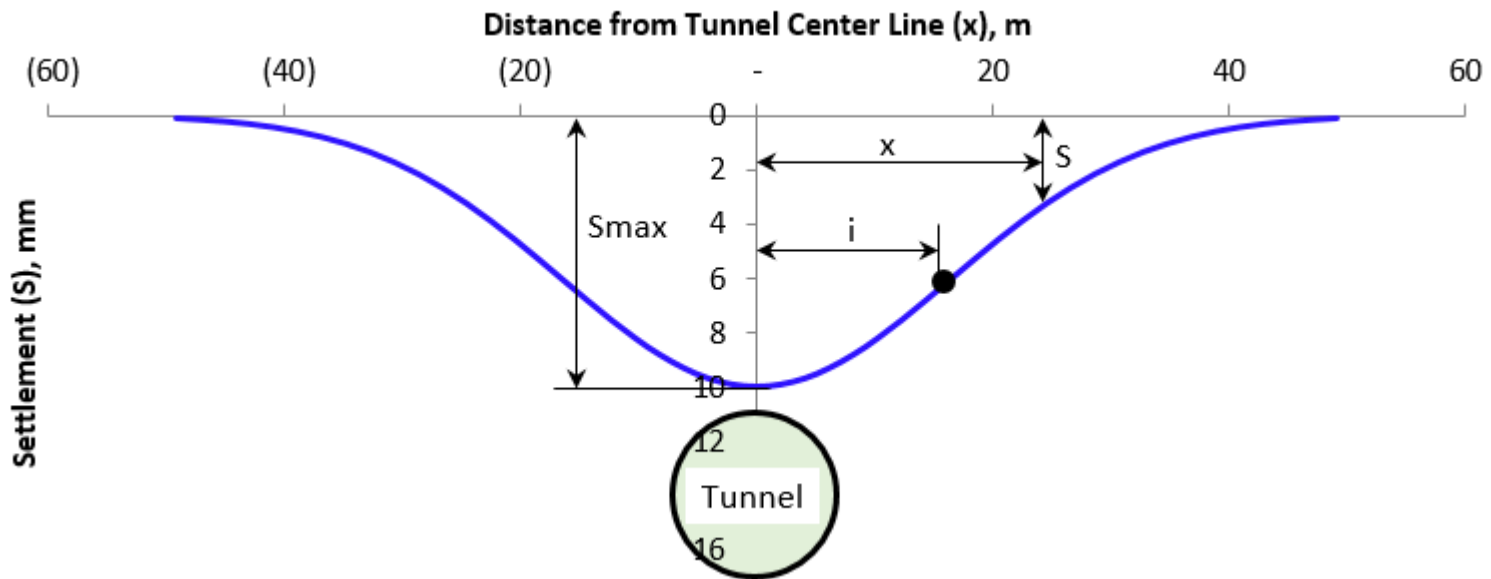


نشست سطحی



نشست سطحی

- مولفه های نمودار عرضی نشست سطحی

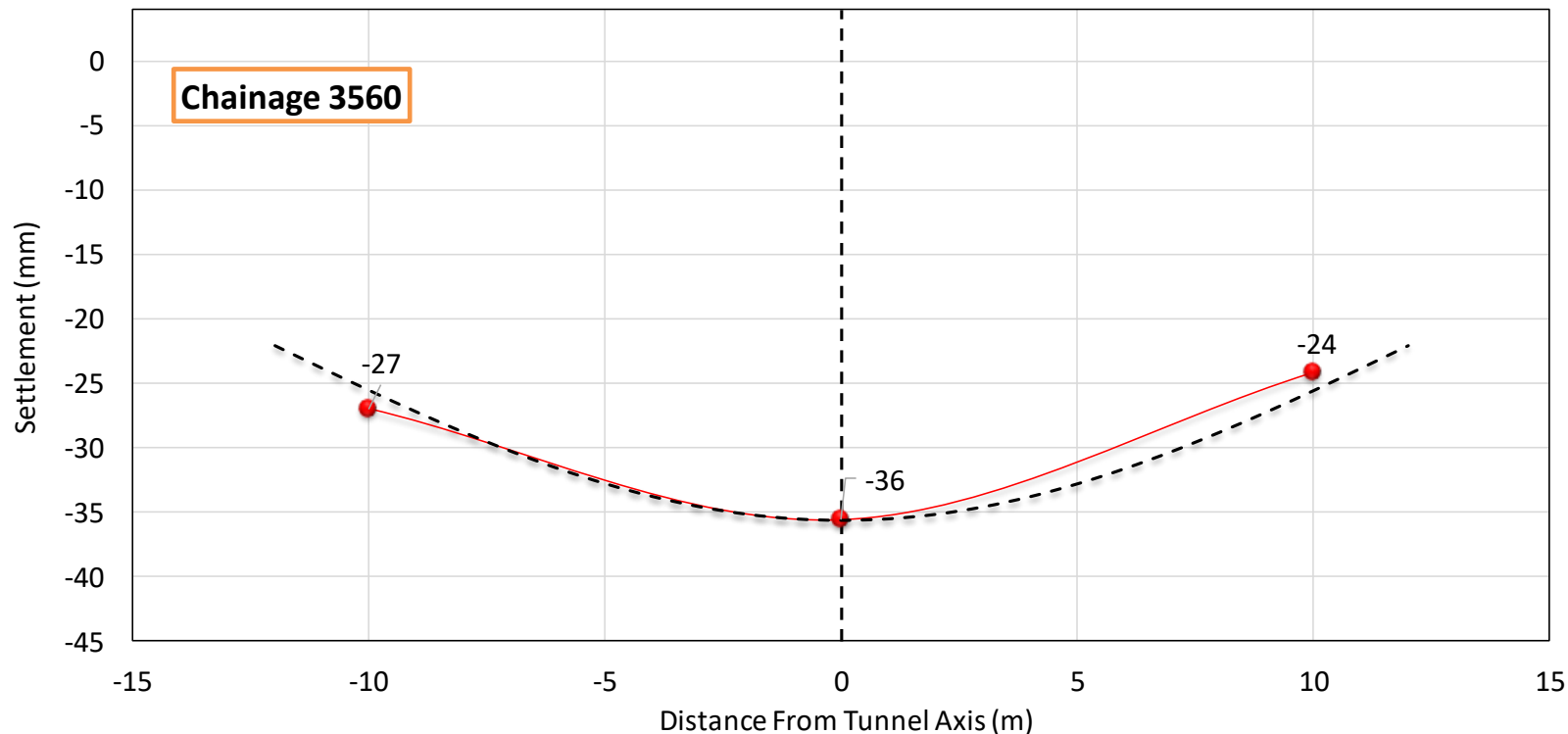


$$S = S_{max} \exp\left(\frac{-x^2}{2i^2}\right)$$

$$i = K Z_0$$

نشست سطحی

- اندازه‌گیری نشست سطحی در مقطع عمود بر محور تونل :



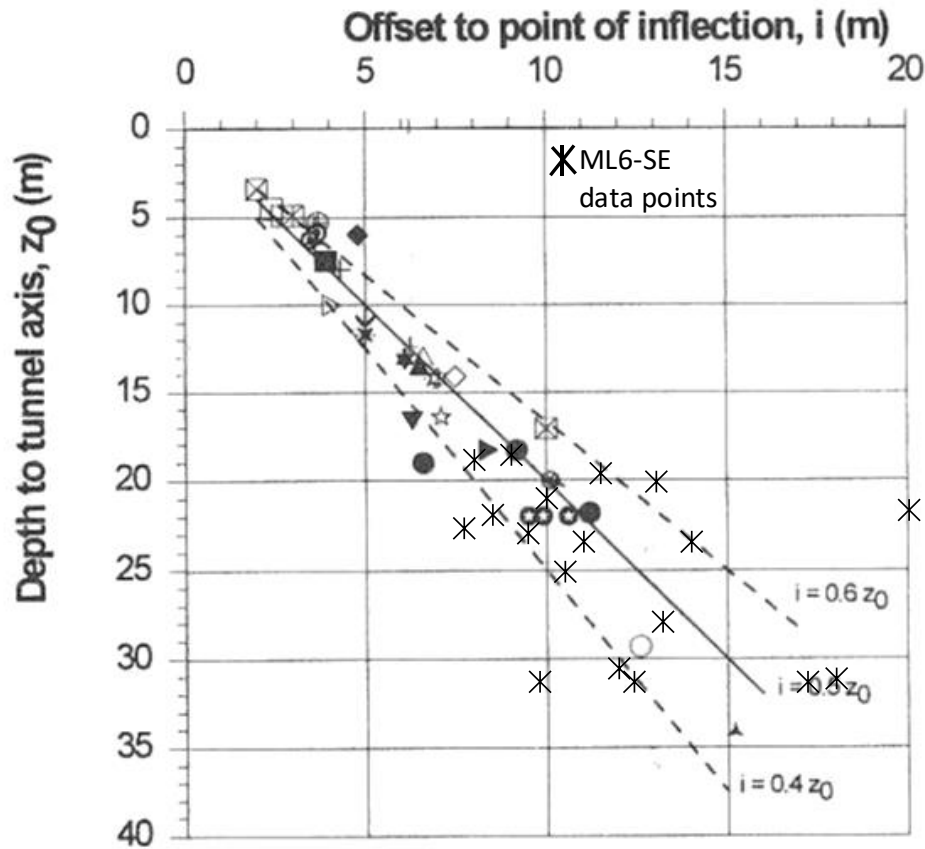
$$S = S_{max} \exp\left(\frac{-x^2}{2i^2}\right)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (S_j - S'_j)^2}{n}}$$

$i = K Z_0$ پارامتر عرض منحنی نشست (i) وابسته به ثابت بدون بعد (k) است که یک فاکتور تجربی وابسته به نوع خاک است.

نشست سطحی

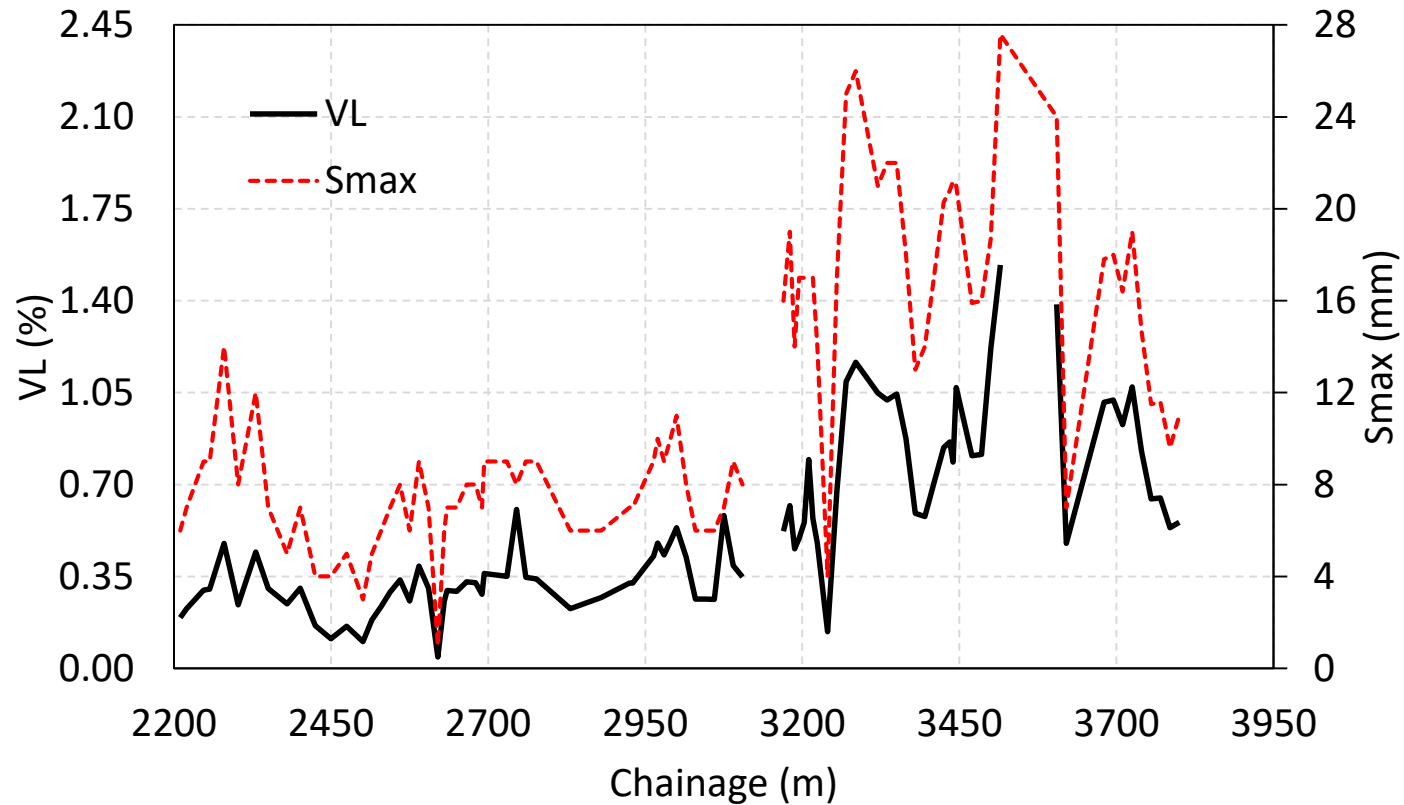
- مقایسه ثابت k با نتایج میر و تیلور (۱۹۹۷) برای رس سفت :



$$V_L = \frac{i S_{max}}{0.313 D^2}$$

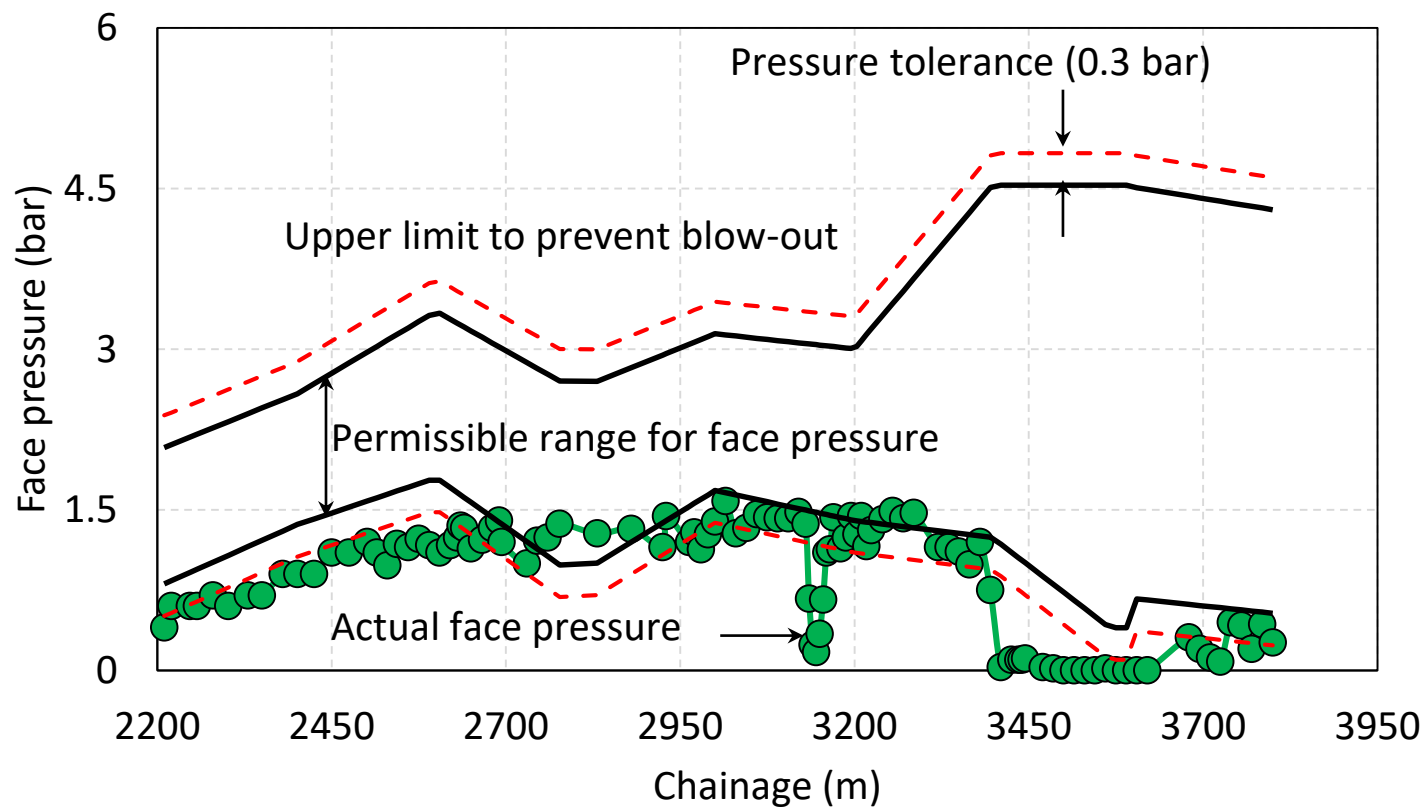
افت حجمی

- افت حجمی و نشست سطحی در طول تونل :



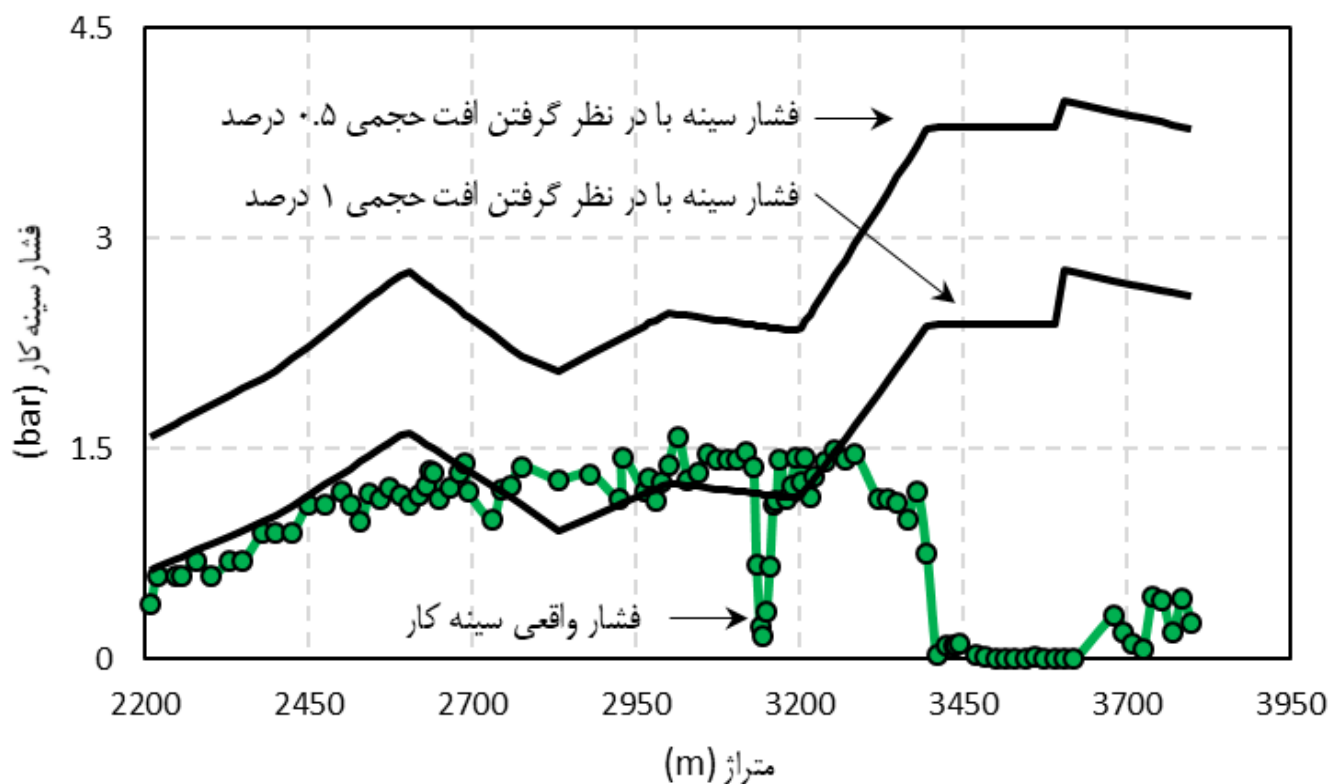
تنش کل و حالت حدی نهایی

- مقایسه فشار سینه کار طراحی در حالت حدی نهایی با فشار سینه کار واقعی در طول تونل :



تنش کل و حالت حدی سرویس

- مقایسه فشار سینه کار طراحی در حالت حدی سرویس با فشار سینه کار واقعی در طول تونل :



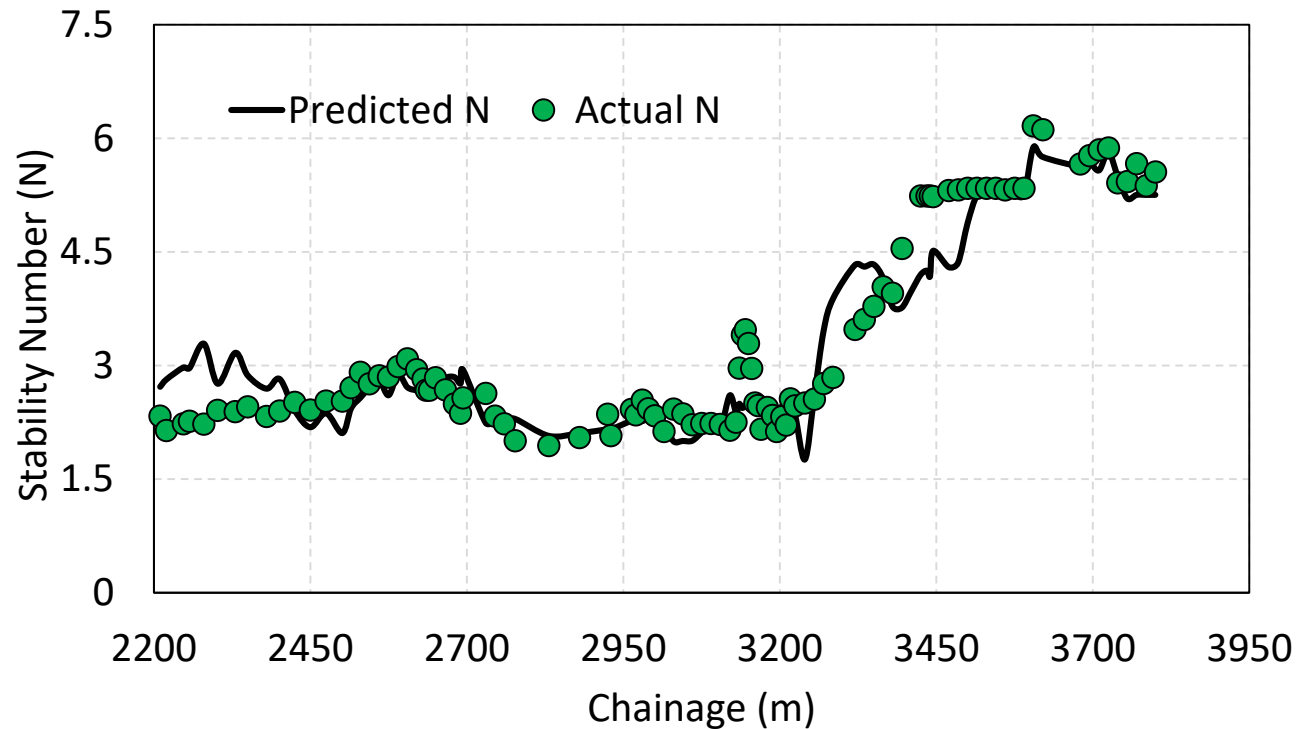
تنش کل و حالت حدی سرویس

- فرمول تجربی جدید :
 - - با افزایش افت حجمی مجاز، عدد پایداری افزایش می یابد به این معنی که امکان کاهش تنش در سینه کار بیشتر است،
 - - در زمینهای با مقادیر مدول یانگ بالاتر، سطح فشار سینه کار را می توان نسبت به تنش بر جای زمین، پایین تر در نظر گرفت که این خود منجر به یک عدد پایداری بالاتر می شود،
 - - بخش هایی از تونل با ارتفاع آب بیشتر، نیاز به اعمال فشار بیشتری در سینه کار دارند و این منجر به یک عدد پایداری کمتری می شود.

$$N = 0.0573 \frac{V_L^{0.2455} \cdot E^{1.118}}{(h_w/D)^{0.1531}}$$

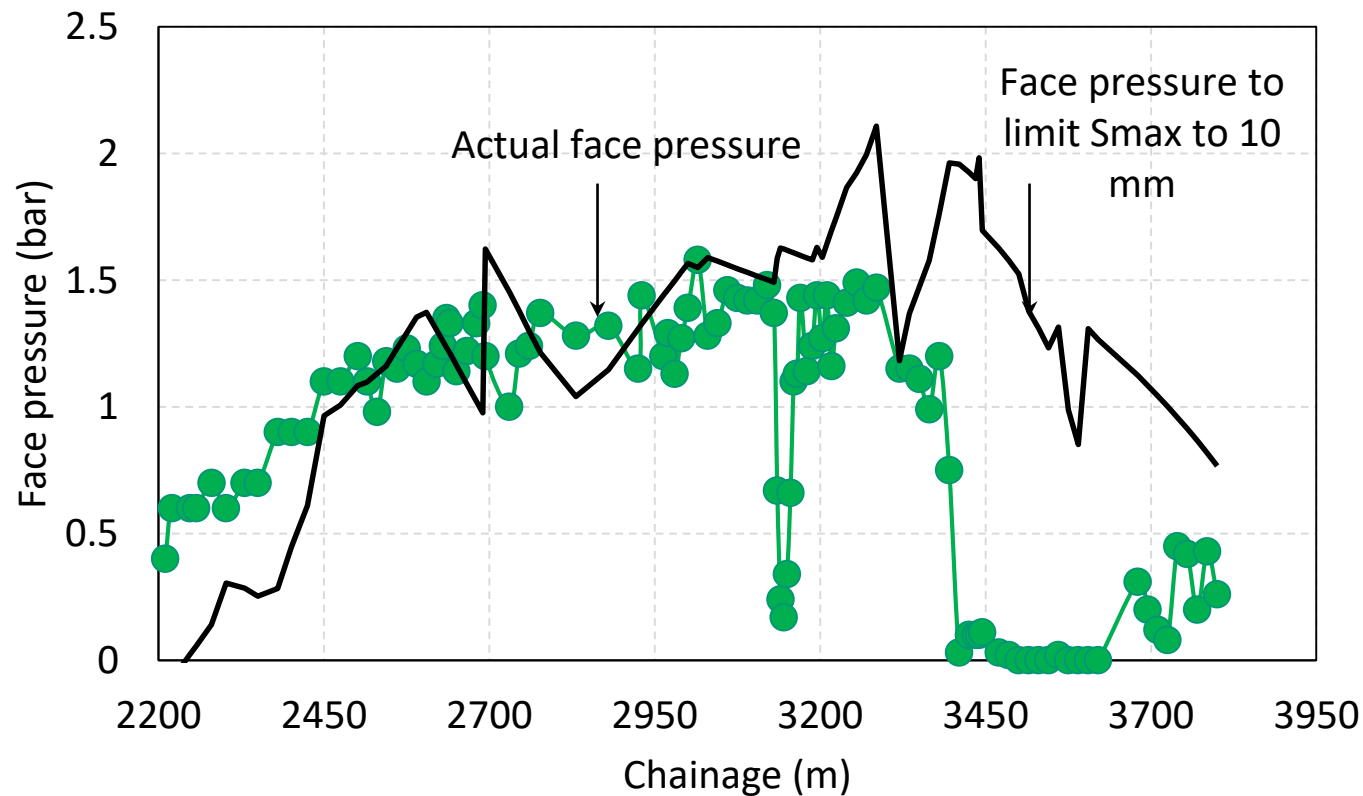
تنش کل و حالت حدی سرویس

- مقایسه عدد پایداری واقعی و پیش بینی شده در طول تونل :



تنش کل و حالت حدی سرویس

- مقایسه ای بین فشار سینه کار محاسبه شده از روش حالت حدی سرویس برای کنترل نشست در حد ۱۰ میلیمتر و مقادیر واقعی فشار سینه کار :



جمع بندی

- روشهای مختلف برآورد فشار سینه کار نتایج مختلفی را به دست می دهد که در بعضی شرایط تصمیم گیری را برای انتخاب یک معیار طراحی مشکل می کند.
- استفاده از حالت حدی سرویس و روشهای تجربی کمک شایانی را برای تدقیق نتایج می کند.
- به کارگیری سیستم رفتارنگاری در زمان واقعی در پروژه های حال حاضر کشور می تواند باعث تقویت مدیریت ریسک در زمان اجرا، تصمیم سازی به موقع ارکان پروژه، و بایگانی اطلاعات ذیقیمت پروژه های ملی برای رجوع به موقع به اطلاعات، تسهیل دعاوی حقوقی محتمل، مستند سازی تجربیات پروژه های گذشته، و بهبود عملکرد پروژه های آتی شود.

با تشکر از توجه شما

