



دانشگاه شاهرود

دانشکده مهندسی - گروه مهندسی عمران



اصول مهندسی تونل

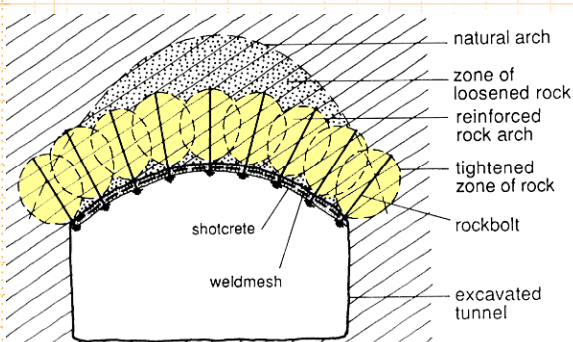
فصل هفتم: تکیه گاه های تونل

علی میرزایی

۷-۱- مقدمه

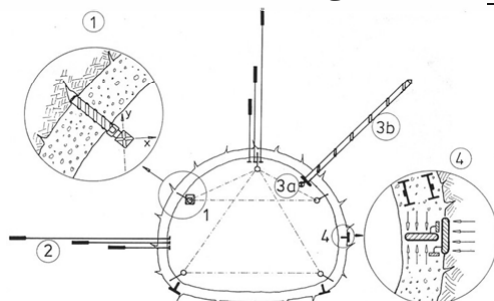
• برای جلوگیری از گسیختگی و حفظ مقاومت مصالح اطراف مقطع حفاری شده، لازم است تا از رخداد تغییر شکل های زمین بعد از حفاری مقطع تونل جلوگیری شود. برای این امر لازم است تا تکیه گاه تونل بعد از اتمام حفاری تعبیه گردد.

• تکیه گاه های اولیه تونل عمدتاً شامل شاتکریت، شبکه فلزی و در صورت نیاز میل مهار ها می باشد که سهم عمده ای در تحمل نیروها و جلوگیری از تغییر شکل های مقطع تونل را دارا می باشند.



۷-۱- مقدمه

• در روش حفاری تونل سازی اتریشی جدید دو پارامتر "رفتار توده سنگ" و "کنترل رفتار توده سنگ در حین ساخت تونل" حایز اهمیت می باشند.



• در روش حفاری NATM به واسطه کنترل تغییر شکل های زمین در حین حفاری و بعد از آن، وضعیت تکیه گاه های تونل را برای نیل به اقتصادی ترین و پایدارترین وضعیت مرتبا بهبود بخشید.

Legend	Measuring objective	Instrument
1	Deformation of the excavated tunnel surface	Convergence tape Surveying marks
2	Deformation of the ground surrounding the tunnel	Extensometer
3	Monitoring of ground support element 'anchor'	Total anchor force
4	Monitoring of ground support element 'shotcrete shell'	Pressure cells Embedments gauge

• رفتار زمین و تکیه گاه های تونل با نصب تجهیزات و حسگرهای لازم اندازه گیری می شود.

۲/۱۹

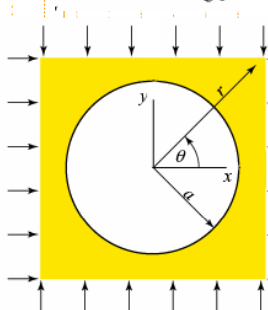
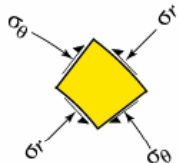
علی میرزایی

فصل هفتم: تکیه گاه های تونل

اصول مهندسی تونل

۷-۲- تنش و تغییر شکل های پیرامون مقطع حفاری دایروی

• با استفاده از معادلات کرش (Kirsch) می توان تنش ها و تغییر شکل های ایجاد شده در پیرامون یک مقطع دایره ای شکل را که تحت اثر بارگذاری مطابق شکل زیر قرار گرفته محاسبه نمود:



$$k = \sigma_h / \sigma_v$$

$$\sigma_{rr} = \frac{p}{2} \left[(1+K) \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) - (1-K) \left(1 - 4\frac{a^2}{r^2} + \frac{3a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \right]$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{p}{2} \left[(1+K) \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) + (1-K) \left(1 + \frac{3a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \right]$$

$$\sigma_{r\theta} = \frac{p}{2} \left[(1-K) \left(1 + \frac{2a^2}{r^2} - \frac{3a^4}{r^4} \right) \sin 2\theta \right]$$

$$u_r = -\frac{pa^2}{4Gr} \left[(1+K) - (1-K) \left\{ 4(1-\nu) - \frac{a^2}{r^2} \right\} \cos 2\theta \right]$$

$$u_\theta = -\frac{pa^2}{4Gr} \left[(1-K) \left\{ 2(1-2\nu) + \frac{a^2}{r^2} \right\} \sin 2\theta \right]$$

۳/۱۹

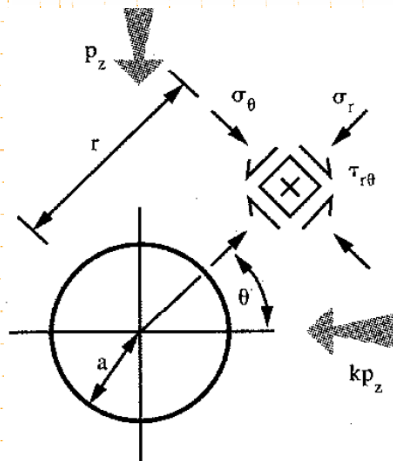
علی میرزایی

فصل هفتم: تکیه گاه های تونل

اصول مهندسی تونل

۲-۷- تنش و تغییر شکل های پیرامون مقطع حفاری دایروی

• نحوه توزیع تنش ها بر روی مرز مقطع حفاری (جداره تونل) با جایگذاری $r=a$ در معادلات کرش به صورت زیر ساده خواهد شد:



$$\sigma_{\theta\theta} = p[(1+k) + 2(1-k)\cos 2\theta]$$

$$\sigma_{rr} = 0$$

$$\tau_{r\theta} = 0$$

• در نتیجه، بر روی مرز مقطع حفاری تنش های دایره ای و تنش های برشی صفر بوده و تنها تنش های محیطی وجود خواهند داشت.

۴/۱۹

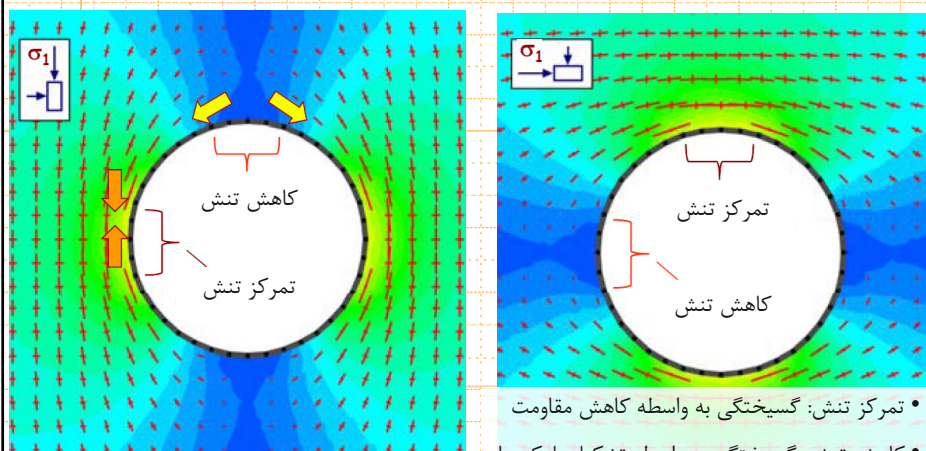
علی میرزایی

فصل هفتم: تکیه گاه های تونل

اصول مهندسی تونل

۲-۷- تنش و تغییر شکل های پیرامون مقطع حفاری دایروی

• بسته به جهت تنش های اصلی، امکان به وجود آمدن تمرکز تنش و یا کاهش تنش در جداره های مقطع تونل میسر می باشد.



• تمرکز تنش: گسیختگی به واسطه کاهش مقاومت
• کاهش تنش: گسیختگی به واسطه تشکیل بلوک ها

۵/۱۹

علی میرزایی

فصل هفتم: تکیه گاه های تونل

اصول مهندسی تونل

۷-۳- تکیه گاه های تونل

- به واسطه حفر تونل درون زمین، تغییر شکل هایی در مقطع تونل ایجاد شده و عمدتاً به دلیل حفر مقطع تونل قطر آن کاهش یافته و اصطلاحاً نقاط مختلف بر روی پیرامون تونل به یکدیگر همگرا می شوند.
- هدف از تعبیه تکیه گاه های تونل، تحمل آن بخشی از تغییر شکل های ایجاد شده بوده که توسط توده زمین اطراف تونل قابل تحمل نبوده و می تواند باعث گسیختگی مقطع حفاری شده تونل گردد.
- در طراحی سیستم تکیه گاه تونل، به جای آن که تمامی نیروهای ایجاد شده توسط یک لاینینگ ضخیم تحمل گردد، مقاومت زمین اطراف تونل نیز در تحمل نیروهای ایجاد شده استفاده شده و با توجه به مقاومت زمین به آن اجازه تغییر شکل داده شده و در ادامه از یک لاینینگ نازک تر به عنوان تکیه گاه تونل استفاده می شود.
- در نتیجه: میزان تغییر شکل های مجاز مقطع تونل بعد از حفاری با توجه به مقاومت زمین اطراف آن و نحوه طراحی و اجرای تکیه گاه تونل وابسته می باشد.

۶/۱۹

علی میرزایی

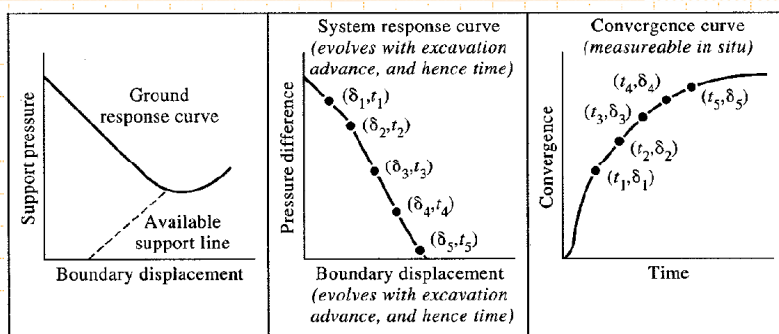
فصل هفتم: تکیه گاه های تونل

اصول مهندسی تونل

۷-۳- تکیه گاه های تونل

عکس العمل زمین- همگرایی:

- در عمل امکان اندازه گیری مستقیم عکس العمل زمین نسبتاً دشوار و میسر نمی باشد.
- لیکن امکان اندازه گیری جابجایی ها و میزان همگرایی تونل میسر می باشد.
- با توجه به آن که "عکس العمل زمین" و "همگرایی" تونل هر دو یک بیانگر یک مفهوم بوده، می توان عکس العمل زمین را با توجه به میزان همگرایی تونل بررسی نمود.

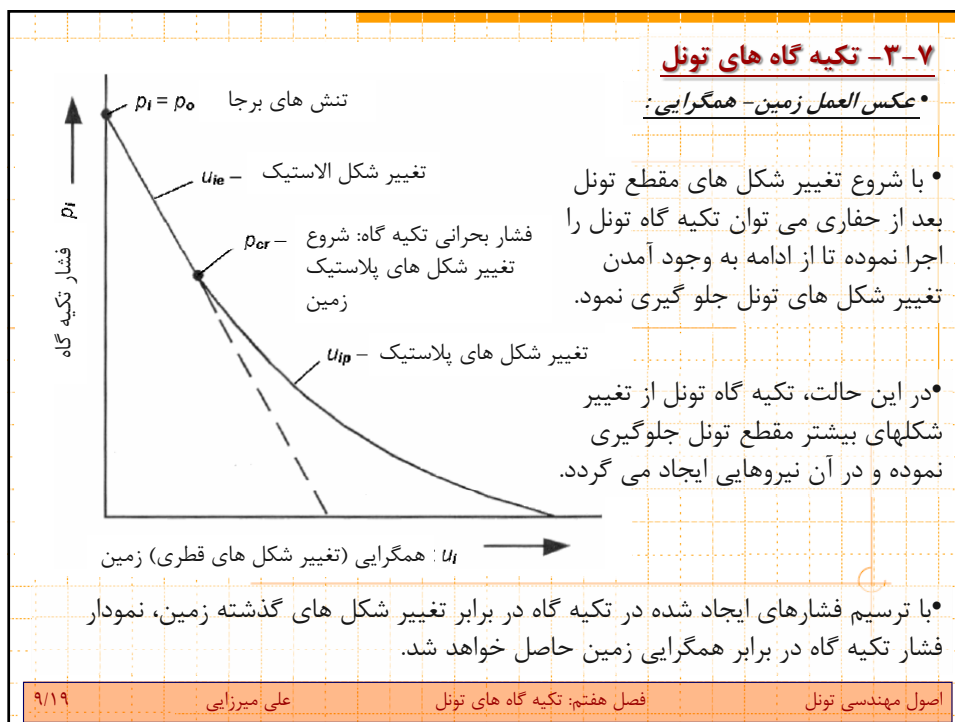
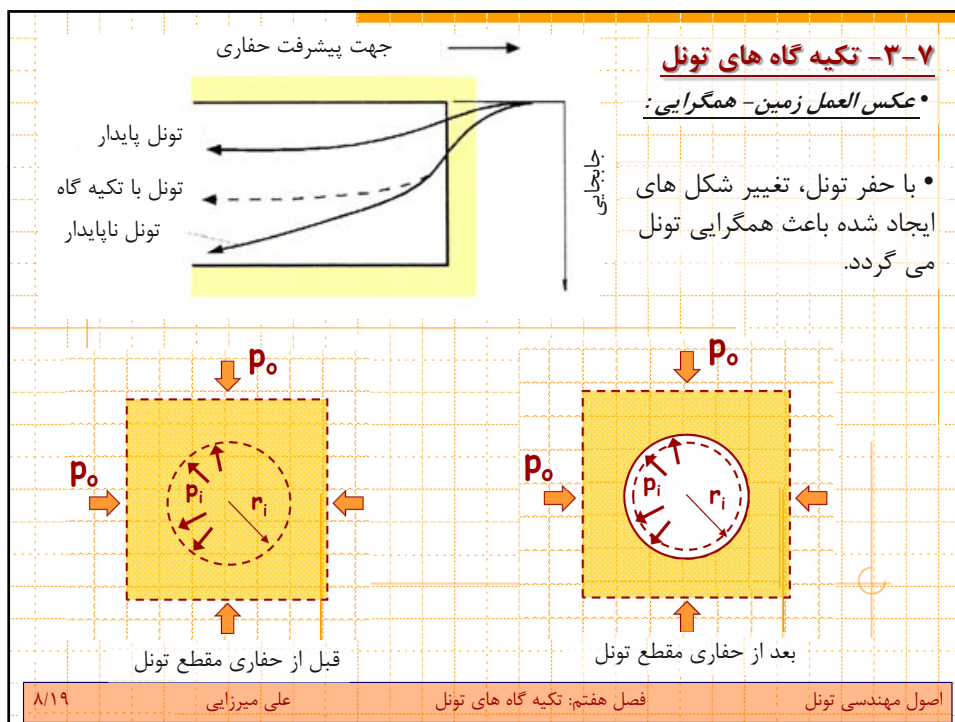


۷/۱۹

علی میرزایی

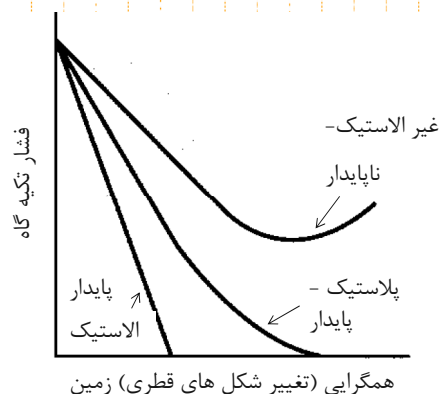
فصل هفتم: تکیه گاه های تونل

اصول مهندسی تونل



۳-۷- تکیه گاه های تونل

• عکس العمل زمین - همگرایی:



• نمودار فشار تکیه گاه - همگرایی زمین بیانگر عکس العمل زمین به مقطع تونل حفر شده بوده و در حالت کلی می تواند دارای سه شکل مختلف باشد.

• هوک (۱۹۹۹) فشار بحرانی مرتبط با شروع تغییر شکل های پلاستیک را برای سنگ ها به صورت زیر پیشنهاد نمود:

$$P_{cr} = \frac{2P_o - \sigma_{cm}}{1+k}, \quad k = \frac{1+\sin\phi}{1-\sin\phi}$$

P_{cr}	= فشار بحرانی تکیه گاه
P_o	= فشار اولیه زمین
σ_{cm}	= مقاومت تک محوری توده سنگ
ϕ	= زاویه اصطکاک داخلی

۱۰/۱۹

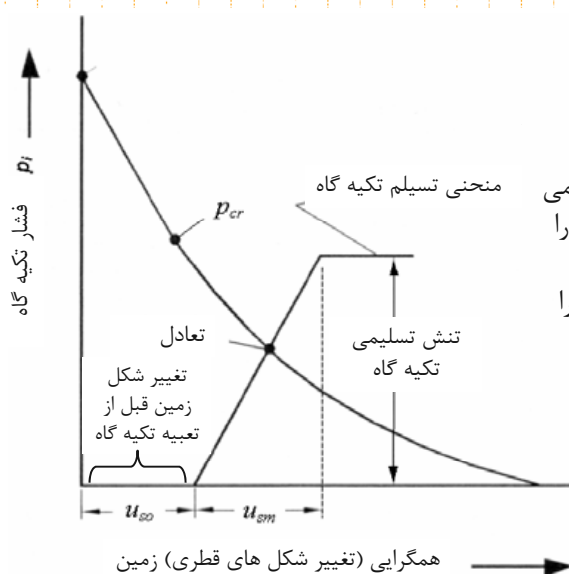
علی میرزایی

فصل هفتم: تکیه گاه های تونل

اصول مهندسی تونل

۳-۷- تکیه گاه های تونل

• عکس العمل زمین - همگرایی:



• با ترسیم منحنی تسلیم تکیه گاه تونل در منحنی عکس العمل زمین می توان میزان تغییر شکل نهایی زمین را بعد از تعبیه تکیه گاه و نیز میزان نیروهای ایجاد شده درون تکیه گاه را بدست آورد.

۱۱/۱۹

علی میرزایی

فصل هفتم: تکیه گاه های تونل

اصول مهندسی تونل

۷-۳- تکیه گاه های تونل

• عکس العمل زمین- همگرایی:

• منحنی تسلیم تکیه گاه دارای دو پارامتر تنش تسلیم تکیه گاه و سختی تکیه گاه (شیب منحنی الاستیک منحنی تسلیم) بوده و با توجه به جنس و نوع سازه تکیه گاه قابل محاسبه می باشد.

• به عنوان مثال برای تکیه گاه شامل شاتکریت و یا بتنی تنش تسلیم تکیه گاه و سختی آن با استفاده از دو رابطه زیر قابل محاسبه خواهند بود:

$$K = \frac{E_c [r_i^2 - (r_i - t_c)^2]}{(1 + \nu_c) [(1 - 2\nu_c)r_i^2 + (r_i - t_c)^2]}$$

مدول الاستیک بتن: E_c
ضریب پواسن بتن: ν_c
ضخامت تکیه گاه: t_c
شعاع داخلی تکیه گاه: r_i
مقاومت تک محوری بتن: σ_{cc}

سختی تکیه گاه

$$P_{\max} = \frac{\sigma_{cc}}{2} \left[1 - \frac{(r_i - t_c)^2}{r_i^2} \right]$$

تنش تسلیم تکیه گاه

۱۲/۱۹

علی میرزایی

فصل هفتم: تکیه گاه های تونل

اصول مهندسی تونل

۷-۳- تکیه گاه های تونل

• مثال:

• یک تونل با مقطع دایره ای با شعاع ۱/۸۵ متر درون یک زمین که دارای فشار هیدرواستاتیک ۱۰ مگاپاسکال قبل از حفر تونل بوده ایجاد می گردد. شعاع مقطع دایره ای تونل بعد از تعبیه لاینینگ بتنی برابر ۱/۷ متر می باشد. مطلوبست:

الف) ترسیم منحنی فشار تکیه گاه- تغییر شکل قطری و منحنی گسیختگی لاینینگ تونل
ب) حداقل تغییر شکل مجاز زمین در مرحله تحکیم قبل از تعبیه لاینینگ تونل برای جلوگیری از گسیختگی لاینینگ تونل.
در تمامی مراحل رفتار کل محیط در محدوده الاستیک فرض گردد.

مدول الاستیسیته بتن: ۳۰ گیگا پاسکال، ضریب پواسن بتن: ۰/۲۵، مدول برشی بتن: ۲ گیگا پاسکال،
مقاومت تک محوری بتن: ۵۰ مگا پاسکال

۱۳/۱۹

علی میرزایی

فصل هفتم: تکیه گاه های تونل

اصول مهندسی تونل

۳-۷- تکیه گاه های تونل

• حل:

محاسبه منحنی تغییر شکل زمین- فشار تکیه گاه : استفاده از قانون کرش

$$u_r = -\frac{pa^2}{4Gr} \left[(1+K) - (1-K) \left\{ 4(1-\nu) - \frac{a^2}{r^2} \right\} \cos 2\theta \right] \quad \text{تغییر شکل شعاعی (قانون کرش)}$$

$K=1$: به علت شرایط فشار هیدرواستاتیک (همه جانبه یکسان)
ضریب فشار جانبی (نسبت تنش افقی به تنش قائم) برابر ۱ می باشد.

$r=a$: در جداره تونل

با جایگذاری مقادیر $r=a$ و $K=1$ در معادله کرش و دو برابر کردن آن، تغییر شکل های قطری (میزان همگرایی تونل) با استفاده از رابطه زیر بیان خواهد شد.

تغییر شکل های قطری
(میزان همگرایی تونل)
بر حسب میلی متر
(فشار بر حسب مگا
پاسکال)

$$= -2 \times \frac{p \cdot a^2}{4 \cdot G \cdot a} \times [(1+1)] = -\frac{p \cdot a}{G} = -\frac{p \cdot (1.85 \times 0.5)}{2}$$

۱۴/۱۹

علی میرزایی

فصل هفتم: تکیه گاه های تونل

اصول مهندسی تونل

۳-۷- تکیه گاه های تونل

• حل:

$$K = \frac{E_c \left[r_i^2 - (r_i - t_c)^2 \right]}{(1 + \nu_c) \left[(1 - 2\nu_c) r_i^2 + (r_i - t_c)^2 \right]} \quad \text{سختی تکیه گاه}$$

$$= \frac{30 \times [1.85^2 - (1.85 - [1.85 - 1.7])^2]}{(1 + 0.25) [(1 - 2 \times 0.25) \times 1.85^2 + (1.85 - [1.85 - 1.7])^2]} = 2.78 \text{ GPa}$$

$$P_{\max} = \frac{\sigma_{cc}}{2} \left[1 - \frac{(r_i - t_c)^2}{r_i^2} \right] = \frac{50}{2} \left[1 - \frac{(1.85 - 0.15)^2}{1.85^2} \right] = 3.88 \text{ MPa} \quad \text{تنش تسلیم تکیه گاه}$$

۱۵/۱۹

علی میرزایی

فصل هفتم: تکیه گاه های تونل

اصول مهندسی تونل

۳-۷- تکیه گاه های تونل

• حل:

میزان تغییر شکل قطری تونل
(همگرایی) بعد از حفر کامل و
آزاد شده ۲۰ مگا پاسکال فشار
همه جانبه

$$= -\frac{p \cdot (1.85 \times 0.5)}{2} = -\frac{10 \cdot (1.85 \times 0.5)}{2} = -4.63 \text{ mm}$$



همگرایی (تغییر شکل های قطری) زمین، میلی متر

۱۶/۱۹

علی میرزایی

فصل هفتم: تکیه گاه های تونل

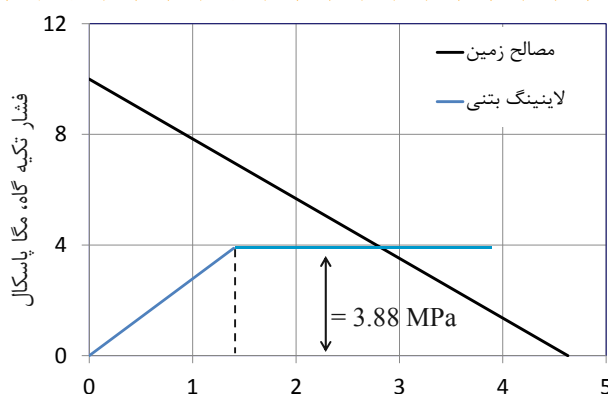
اصول مهندسی تونل

۳-۷- تکیه گاه های تونل

• حل:

تغییر شکل لاینینگ تونل تا رسیدن به لحظه گسیختگی

$$= \frac{3.88}{2.78} = 1.39 \text{ mm}$$



همگرایی (تغییر شکل های قطری) زمین، میلی متر

۱۷/۱۹

علی میرزایی

فصل هفتم: تکیه گاه های تونل

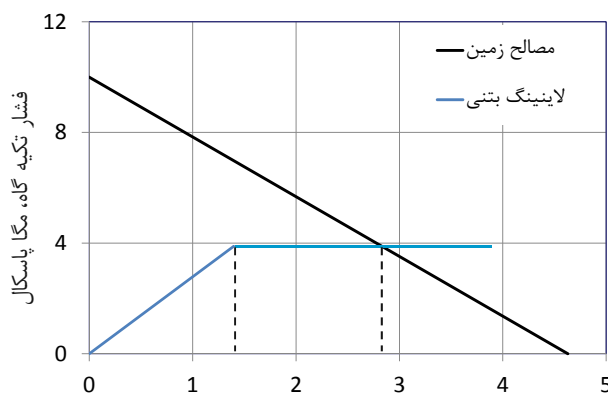
اصول مهندسی تونل

۳-۷- تکیه گاه های تونل

حل:

میزان همگرایی در
محل تقاطع منحنی
های مصالح زمین و
لاینینگ بتنی

$$= -\frac{p \cdot (1.85 \times 0.5)}{2} = -\frac{(10 - 3.88) \times (1.85 \times 0.5)}{2} = -2.83 \text{ mm}$$



همگرایی (تغییر شکل های قطری) زمین، میلی متر

۱۸/۱۹

علی میرزایی

فصل هفتم: تکیه گاه های تونل

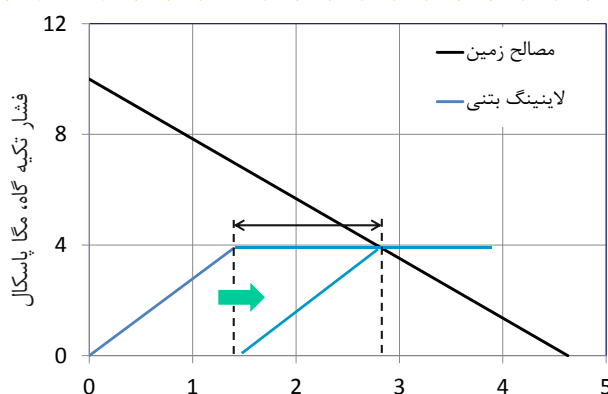
اصول مهندسی تونل

۳-۷- تکیه گاه های تونل

حل:

$$= (2.83 - 1.39) = 1.44 \text{ mm}$$

حد اقل جابجایی زمین برای جلوگیری از گسیختگی لاینینگ بتنی



همگرایی (تغییر شکل های قطری) زمین، میلی متر

۱۹/۱۹

علی میرزایی

فصل هفتم: تکیه گاه های تونل

اصول مهندسی تونل

