

بررسی اثر شمع‌های باربر بر رفتار تونل‌های مترو به روش عددی

اسحاق نمازی^۱، رضا رحمان نژاد^{۲*}، محمد علی ابراهیمی فرسنگی^۳، حامد جمشیدی^۴

۱. کارشناس ارشد مکانیک سنگ

۲. استادیار بخش مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان، تلفن: ۰۳۴۱۲۱۲۱۰۰۳، پست الکترونیکی: r_rahmannejad@hotmail.com

۳. استادیار بخش مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان - تلفن: ۰۳۴۱۲۱۲۱۰۰۳ - پست الکترونیکی: maebrahimi@yahoo.co.uk

۴. کارشناس ارشد استخراج معدن، شرکت ساختمانی بام راه

(دریافت ۵ آذر ۱۳۸۶، پذیرش ۱۲ مرداد ۱۳۸۷)

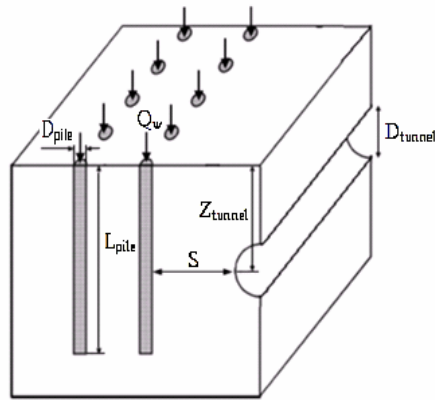
چکیده

در محیط‌های شهری تونل‌های مترو اغلب در کنار پی ساختمان‌ها ساخته می‌شوند. در حالیکه بسیاری از تونل‌ها می‌توانند در مقابل حرکت‌های کوچک مقاوم باشند، شمع‌های بارگذاری شده ساختمان‌های مجاور می‌توانند باعث حرکت‌های ناپایدار و یا افزایش سطح توزیع تنش در خاک اطراف تونل شده که ممکن است سبب بروز شکست در نگهداری تونل‌ها شود. این مقاله به بررسی پارامتریک تأثیر شمع‌های بارگذاری شده بر روی تونل‌های موجود به روش عددی المان محدود می‌پردازد. مدل عددی المان محدود سه بعدی، که شامل تمامی جزئیات مربوط به تونل‌سازی سپری است، به منظور شبیه‌سازی مراحل ساخت گام به گام پیشروی تونل‌های مترو در کنار شمع‌ها در شرایط خاک چسبنده، نرم، همگن و زیر سطح ایستایی ارائه شده است. پارامترهای اصلی مورد بحث در بررسی پارامتریک شامل میزان بار وارده بر هر شمع، فاصله مستقیم بین تونل و ردیف شمع‌های کناری، قطر و طول شمع‌ها است. در این تحقیق، میزان تأثیر پارامترهای فوق‌الذکر بر روی جابجایی‌های افقی و عمودی دیواره تونل، نیروی محوری و ممان خمشی وارد بر نگهداری تونل مورد ارزیابی قرار گرفته است.

کلمات کلیدی

شمع، تونل‌سازی سپری، جابجایی، مطالعه پارامتریک، نیروی محوری، ممان خمشی، المان محدود

۱- مقدمه



شکل ۱: پارامترهای هندسی در بررسی پارامتریک

جابجایی‌های ناشی از حفر تونل را می‌توان به روش‌های تجربی (Attwell and Woodman, 1998; Peck, 1969)، یا روش‌های شبه-تحلیلی (Logathan and Poulos, 1998) با دقت نسبتاً بالایی تعیین کرد. کاربرد این روش‌ها محدود به مناطقی است که هیچ سازه‌ای قبل از تونل در محل احداث نشده باشد. در شرایطی که تونل‌ها در کنار سازه‌های موجود حفر می‌شوند، اندرکنش سازه-تونل نقش اساسی بازی کرده و روش‌های فوق مناسب نمی‌باشند. مطالعات اخیر بر روی مدل-سازی اندرکنش تونل-خاک-سازه (Potts and Addenbrooke, 1997; Bured et al, 2000) اختلاف فاحش بین نشست‌ها و جابجایی‌ها در شرایطی که تونل‌ها در کنار سازه‌های دیگر حفر شده‌اند با محیط‌هایی که قبلاً هیچ سازه‌ای احداث نشده است را نشان می‌دهد. چنین اندرکنش پیچیده‌ای را می‌توان به صورت تئوری با روش عددی المان محدود مدل‌سازی کرد. در این مقاله به منظور بررسی دقیق پارامترهای تأثیرگذار بر روی اندرکنش تونل-خاک-سازه مطالعات پارامتریک به روش عددی المان محدود سه بعدی با استفاده از نرم افزار Plaxis 3D Tunnel، صورت گرفته است. مطالعات پارامتریک شامل تأثیر پارامترهای: بار وارده بر هر شمع (Q_w)، فاصله مستقیم بین دیواره تونل و ردیف شمع‌های کناری (S)، قطر شمع‌ها (D_{pile}) و طول شمع‌ها (L_{pile})، بر روی جابجایی‌های افقی و عمودی دیواره تونل، نیروی محوری و ممان خمشی وارد بر نگهداری تونل است (شکل ۱).

در این تحقیق پارامترهای هندسی و زمین شناسی از داده‌های بدست آمده از تونل‌های قطار شهری شیراز که در زیر پل غدیر حفر شده انتخاب شده اند [۸]. تونل‌های مذکور توسط دو دستگاه تونل‌زنی تمام مقطع سپری از نوع فشار تعادلی زمین (EPB) در خاک رس دانه ریز اشباع حفر می‌شوند. این تونل‌ها از کنار پنج جفت شمع‌های میانی پل عبور می‌کنند. فاصله دیواره تونل از شمع‌های جانبی آن ۳/۴ متر، قطر شمع‌ها ۱/۲ متر و طول آن‌ها ۲۴ متر است.

۲- بار وارده بر هر شمع

به منظور ارزیابی تأثیر شمع‌ها بر روی وضعیت تنش-کرنش تونل‌ها، لازم است بزرگی باری که به طور عموم بر روی شمع-های با مقطع دایروی اعمال می‌شود را تعیین کرد. به منظور محاسبه میزان بار وارده بر روی شمع‌ها از روش تعیین ظرفیت باربری نهایی شمع و اعمال ضریب اطمینان بر روی آن استفاده شده است. بطور کلی ظرفیت نهایی یک شمع از مجموع ظرفیت نهایی نوک شمع و دیواره شفت بدست می‌آید.

۱-۲- ظرفیت باربری نهایی نوک شمع (Q_{ub})

ظرفیت نهایی نوک شمع طبق رابطه ۱ بدست می‌آید [۱]:

$$Q_{ub} + W = A_b (N_c C_{ub} + \gamma L_{pile}) \quad (1)$$

که در این رابطه:

W : وزن شمع

$A_b = \frac{\pi D^2}{4}$: سطح مقطع نوک شمع، D قطر شمع

C_{ub} : مقاومت بر شی زهکشی نشده خاک در نوک شمع

N_c : فاکتور ظرفیت باربری شمع

γ : میانگین چگالی خاک در طول شمع (L_{pile})

با فرض در نظر گرفتن وزن شمع برابر $A_b \gamma L_{pile}$ رابطه ۱ به

صورت زیر تبدیل می‌شود [۱]:

$$Q_{ub} = A_b N_c C_{ub} \quad (2)$$

۳- مدل‌سازی سه بعدی پیشروی تونل‌های مترو

در مدل‌های عددی خاک اشباع اطراف تونل، ماده پرکننده فضای خالی دنباله سپر، نگهداری تونل و سطح تماس بین خاک و شمع‌ها بوسیله المان‌های متناسب با خواص آنها شبیه‌سازی شده که در این مدل سپر همانند یک جسم صلب مدل‌سازی شده است [۶]. بطور کلی مدل‌سازی شامل سه مرحله است:

مرحله اول شامل ساخت و بارگذاری شمع‌ها است. در این مرحله بار ۱۳۰ تنی ناشی از وزن پیل بر هر شمع اعمال می‌شود. در تمامی تحلیل‌ها بار به طور جداگانه بر هر شمع اعمال شده و شمع‌ها از خود رفتار مستقلی دارند. شرایط مرزی شمع‌ها توسط سطح اصطکاکی نازکی مدل‌سازی شده است. از آنجا که فضای بین شمع‌ها را خاک محل پر می‌کند، به همین دلیل این منطقه نفوذپذیر در نظر گرفته شده است، این در حالی است که خود شمع‌ها نفوذ ناپذیر هستند [۱].

بعد از مرحله ساخت و بارگذاری شمع‌ها، مرحله تعادل مدل دنبال می‌شود. بدین منظور تا قبل از مدل‌سازی حفر تونل، جابجایی‌های ناشی از بارگذاری‌های اولیه صفر می‌شود [۷].

سومین مرحله مدل‌سازی، فرآیند حفاری گام به گام تونل است. در طی عملیات تونل‌سازی، پیشروی TBM در هر گام بوسیله تغییر طول المان‌ها مدل‌سازی می‌شود. بدین منظور در هر گام پیشروی، حفاری و اعمال فشار در جبهه کار به ترتیب بوسیله ایجاد المان‌های جدید در دهانه و جبهه کار تونل صورت می‌گیرد. تزریق ماده در فضای خالی پشت دنباله سپر و نصب حلقه نگهداری بوسیله تغییر خواص مش‌ها در محدوده مورد نظر انجام می‌شود [۸].

۴- مطالعه پارامتریک

۴-۱- شرایط هندسی و خواص مکانیکی مدل‌های عددی

شبیه‌سازی حفر تونل در کنار شمع‌ها در شرایط خاک نرم، همگن، پیش تحکیم و چسبنده انجام می‌گیرد. در مدل، خاک دارای مدل رفتاری الاستیک-پلاستیک است. پارامترهای مکانیکی خاک: $C' = 3.5 \left(\frac{KN}{m^2} \right)$, $\Phi' = 27^\circ$, $E = 2.6e^4$, $\gamma_{sat} = 20.7 \frac{KN}{m^3}$ و $\nu = 0.25$ اندازه‌گیری شده است [۹].

خصوصیات مکانیکی خاک در سطح اصطکاکی بین خاک و شمع‌ها، همچنین بین سپر و خاک به دلیل دست خوردگی خاک ناشی از حفر کاهش می‌یابد که بر اساس داده‌های بدست

مقدار N_c به زاویه اصطکاک خاک بستگی دارد. با افزایش زاویه اصطکاک مقدار N_c نیز افزایش می‌یابد. برای شمع‌های دایره ای بارگذاری شده در عمق قابل توجهی از توده رس اشباع، مقدار N_c برابر با ۹ است [۲].

۲-۲- ظرفیت باربری نهایی دیوار شفت (Q_{us})

در این تحقیق از روش α برای محاسبه ظرفیت باربری نهایی دیواره شفت در شرایط خاک رس زهکشی نشده با نفوذپذیری پایین استفاده شده است [۱]:

$$Q_{us} = A \alpha \overline{Cu} \quad (3)$$

در این رابطه:

Q_{us} : ظرفیت باربری نهایی دیواره شفت

A_s : مساحت دیواره شفت

\overline{Cu} : میانگین مقاومت برش زهکشی نشده خاک در طول دیواره شفت

α : فاکتور تجربی کاهش چسبندگی دیواره شفت ($\alpha \leq 1$)

کاهش چسبندگی دیواره شفت را می‌توان به سست شدگی خاک دیواره شفت در عملیات ساخت مربوط دانست. فاکتور تجربی α را نه تنها بر اساس نتایج آزمایش شفت بلکه بر اساس تعیین مقاومت برشی زهکشی نشده خاک \overline{Cu} در طول شمع نیز می‌توان بدست آورد. با افزایش \overline{Cu} در طول شفت مقدار α کاهش می‌یابد [۲].

با محاسبه ظرفیت نهایی شمع، میزان بار وارد بر شمع از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۳]:

$$Q_w = \frac{\zeta(Q_{ub} + Q_{us})}{F} \quad (4)$$

در این رابطه:

Q_w : بار وارد بر هر شمع

F : ضریب اطمینان

ζ : فاکتور گروه شمع

میزان ζ برای گروه‌های از شمع‌ها، کمتر از یک و برای شمع‌های منفرد یک است [۴].

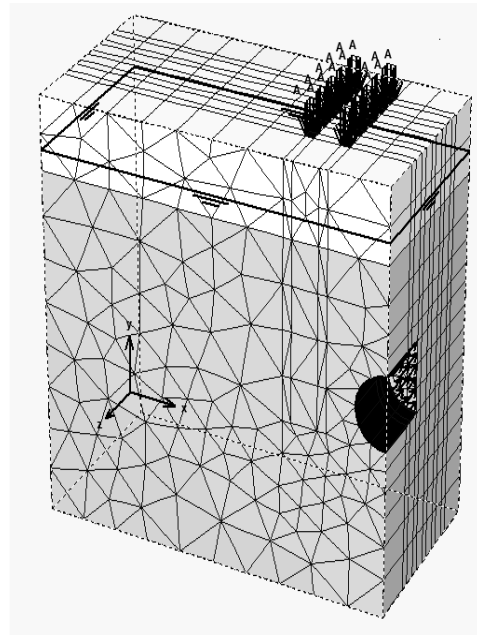
اسکمپتون^۱ (۱۹۵۹) برای شمع‌های با ابعاد معمولی ضریب اطمینان ۲/۵ و در صورتی که ابعاد شمع‌ها بزرگ باشد برای مقابله با نشست، ضریب اطمینان بزرگتر را پیشنهاد کرده است [۲]. طبق روابط بالا، میزان بار محوری وارد بر هر شمع پل غدیر ۱۳۰ تن محاسبه شده است [۵].

خاک به سمت پایین و در کف آن خاک به سمت بالا حرکت می‌کند (شکل ۳b). مطابق شکل ۳b با افزایش بار وارده بر هر شمع بر میزان جابجایی قائم افزوده شده و محور عمودی تونل کوتاه‌تر می‌شود. به طور کلی هر چه بار قائم وارد بر هر شمع بیشتر شود قطر افقی تونل بزرگ‌تر و قطر قائم آن کوتاه‌تر می‌شود و تونل تمایل بیشتری برای بیضی شدن پیدا می‌کند. همچنین بر اساس نتایج مدل‌سازی عددی افزایش بار وارده بر هر شمع منجر به افزایش تنش در خاک و بالا رفتن نیروی محوری وارد بر نگهداری تونل می‌شود. در شکل ۳c دیده می‌شود که برای بار ۲۸۰ تن بیشترین نیروی محوری بر نگهداری اعمال می‌شود. با افزایش بار وارده بر شمع‌ها اختلاف بین تنش برشی وارد بر نگهداری در تاج و کف تونل با دیواره تونل افزایش می‌یابد. در نتیجه ممان خمشی وارد بر نگهداری تونل که به اختلاف تنش برشی در دیواره تونل بستگی دارد، افزایش می‌یابد (شکل ۳d).

۳-۴- طول شمع (L_{pile})

به منظور ارزیابی تأثیر طول شمع‌ها بر روی رفتار تونل‌ها، مقادیر ۳۰، ۲۴ و ۱۸ متر برای طول شمع‌ها در نظر گرفته شده است که مقدار ۲۴ متر مربوط به طول شمع‌های پل غدیر شیراز است. در هر سه حالت مقدار بار ثابت ۱۳۰ تن بر روی هر کدام از شمع‌ها اعمال می‌شود. اشکال ۴a و ۴b به ترتیب جابجایی‌های افقی و عمودی تونل را نسبت به زاویه از تاج تونل نشان می‌دهد. بطور خلاصه می‌توان گفت که با کاهش طول شمع‌ها جابجایی افقی و قائم دیواره تونل افزایش می‌یابد. کوتاه‌تر شدن طول شمع‌ها سبب می‌شود سطح تماس شمع با خاک کمتر شده و بار وارده بر هر کدام از این شمع‌ها در سطح مقطع کوچکتری به خاک اطراف منتقل شود، در نتیجه میزان بار وارده بر واحد سطح در خاک اطراف شمع‌ها افزایش یابد و خاک تمایل بیشتری برای جابجایی به طرف دهانه تونل از خود نشان می‌دهد. کاهش طول شمع‌ها همچنین باعث افزایش بار و ممان خمشی وارده بر نگهداری تونل می‌شود (شکل‌های ۴c و ۴d).

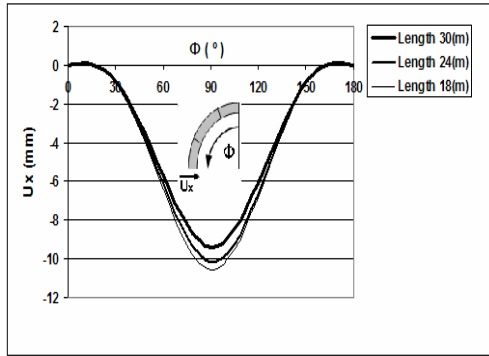
آمده از آزمایش‌های درمحل ضریب کاهش $R_{int}=0.6$ برای آن انتخاب شده است [۹]. در این مدل، تونل مستقیم و به قطر ۶/۸۸ متر به فاصله ۱۶ متری از سطح زمین حفر می‌شود. سطح آب زیر زمینی در ۵ متری از سطح زمین قرار دارد. به طور کلی مدل در امتداد محور تونل دارای ۱۱ مش‌بندی است که وضعیت قرارگیری مش‌بندی بر اساس موقعیت شمع‌ها تنظیم شده است. ضخامت مش‌های که در موقعیت شمع‌ها قرار دارد برابر قطر معادل شمع‌ها و ضخامت مش‌هایی که در موقعیت فضای بین شمع‌ها قرار دارد مساوی با فاصله بین شمع‌ها در نظر گرفته شده است. به منظور انجام مطالعات پارامتریک یک مقطع از مدل در مش ششم، جایی که شمع‌ها بیشترین تأثیر بر روی تونل دارد، انتخاب شده است (شکل ۲).



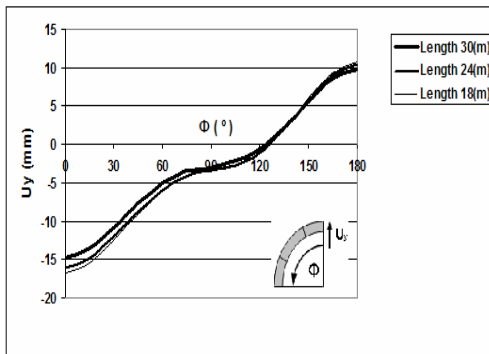
شکل ۲: مدل سه بعدی حفر تونل در کنار شمع‌های پل غدیر

۴-۲- تأثیر بار محوری وارد بر هر شمع (Q_w)

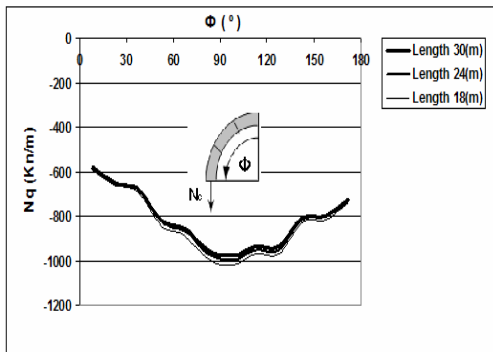
بار اعمال شده بر روی شمع‌ها از طریق جداره و نوک شمع به خاک‌های مجاور آن منتقل می‌شود. به منظور ارزیابی تأثیر این بارها بر روی عملکرد نگهداری تونل سه بار با مقادیر ۲۸۰ تن، ۱۳۰ تن و ۵۵ تن در نظر گرفته شده است. شکل ۳a، جابجایی افقی خاک از تاج تونل تا کف در جهت پادساعتگرد را نشان می‌دهد. در هر سه حالت، با اعمال بار، دیواره تونل به سمت شمع جابجا می‌شود و با افزایش بار وارده بر هر شمع، جابجایی خاک اطراف تونل به طرف شمع‌ها افزایش می‌یابد. در تاج تونل



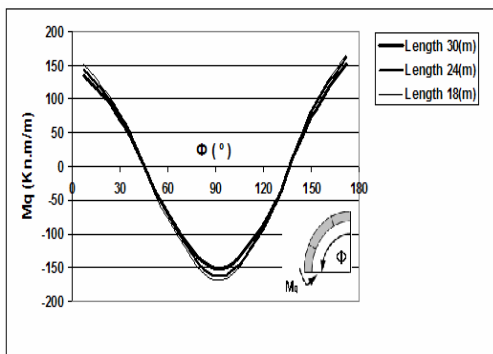
(a)



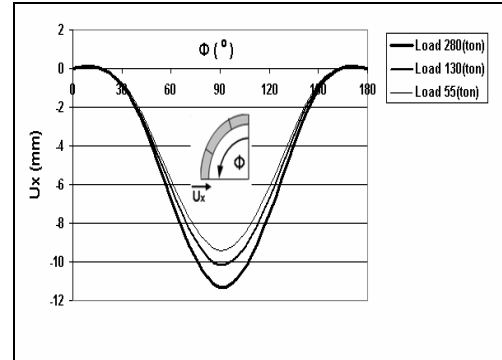
(b)



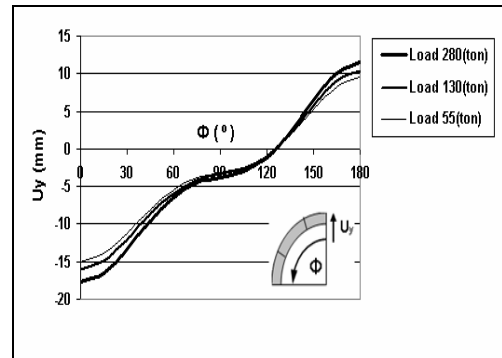
(c)



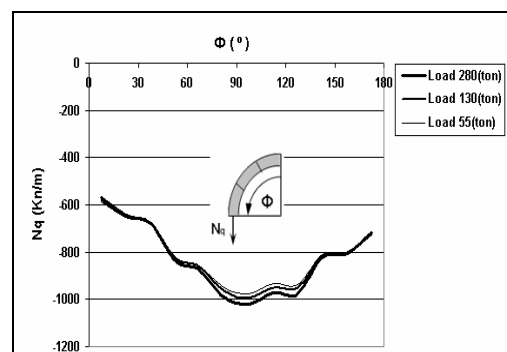
(d)



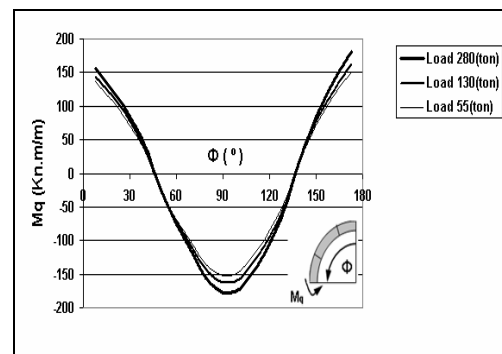
(a)



(b)



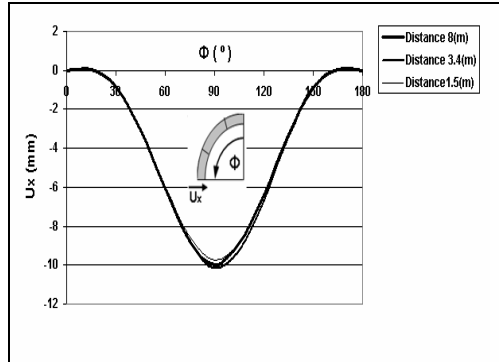
(c)



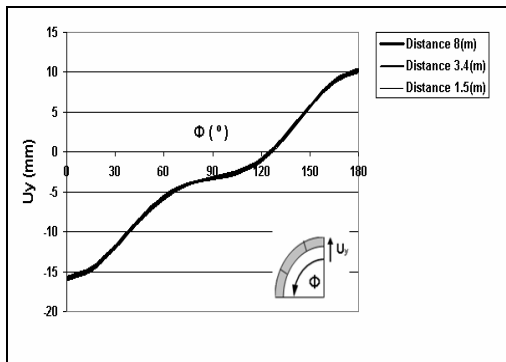
(d)

شکل ۴: تأثیر طول شمع‌ها بر روی (a) جابجایی افقی (b) جابجایی قائم (c) نیروی محوری (d) ممان خمشی وارد بر دیواره تونل

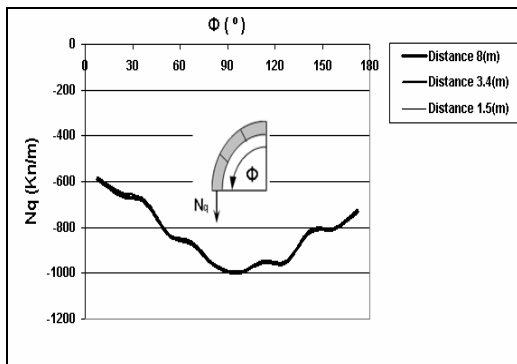
شکل ۳: تأثیر بار وارده بر هر شمع بر (a) جابجایی افقی (b) جابجایی قائم (c) نیروی محوری (d) ممان خمشی وارد بر دیواره تونل



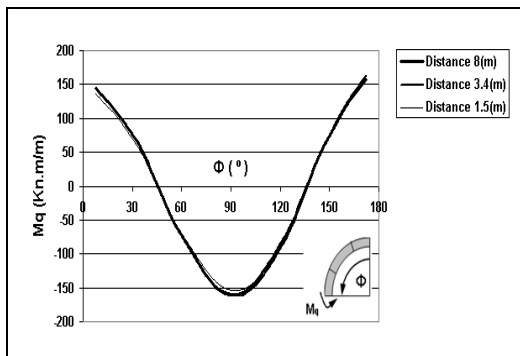
(a)



(b)



(c)

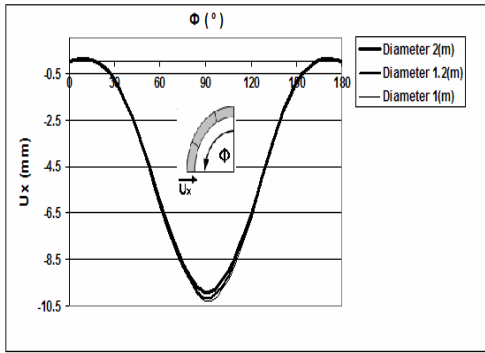


(d)

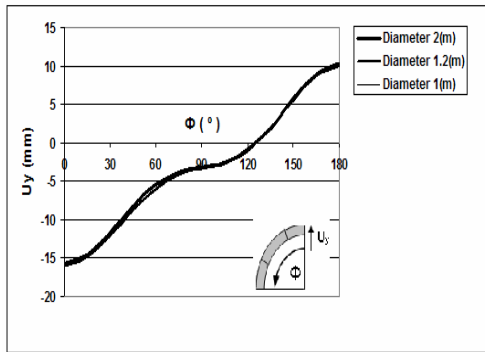
شکل ۵: تأثیر فاصله تونل - شمع بر (a) جابجایی افقی (b) جابجایی قائم (c) نیروی محوری (d) ممان خمشی وارد بر دیواره تونل

۴-۴- فاصله مستقیم بین دیواره تونل و شمع‌های کناری (S) به منظور بررسی تأثیر فاصله مستقیم بین دیواره تونل و شمع‌های کناری (S) بر روی عکس‌العمل تونل‌ها، مقادیر ۸، ۳/۴ و ۱/۵ متر برای این فواصل انتخاب شده است. اشکال ۵a و ۵b به ترتیب جابجایی‌های افقی و قائم دیواره تونل را نسبت به زاویه از تاج تونل برای فواصل مختلف نشان می‌دهد. در هر سه حالت افزایش قطر افقی تونل و کاهش قطر عمودی تونل دیده می‌شود. همچنانکه در شکل دیده می‌شود میزان اختلاف جابجایی‌ها در هر سه حالت ناچیز است، هر چند که در فاصله ۳/۴ متری جابجایی بیشتری نسبت به فواصل ۸ و ۱/۵ متر وجود دارد. این بدان معنی است که با کاهش فاصله از مقدار ۸ متر به مقدار ۳/۴ متر جابجایی افزایش می‌یابد. ولی با نزدیک‌تر شدن تونل به شمع‌ها دوباره از جابجایی‌ها کاسته می‌شود. میزان نیروی محوری وارد بر نگهداری در واحد طول در شکل ۵c نشان داده شده است. در فاصله ۱/۵ متری ماکزیمم نیروی فشار محوری وارد بر نگهداری $996 \frac{KN}{m}$ است که در فاصله ۳/۴ متری نیروی محوری ماکزیمم وارد بر نگهداری به مقدار $998 \frac{KN}{m}$ افزایش می‌یابد. با افزایش فاصله، به مقدار ۸ متر نیروی محوری دوباره تا اندازه $996 \frac{KN}{m}$ کاهش می‌یابد. ماکزیمم ممان خمشی وارد بر نگهداری همانند نیروی محوری در فاصله ۳/۴ متری بیشترین مقدار را دارا است (شکل ۵d). در مجموع مشاهده می‌شود که تأثیر فواصل انتخاب شده بر رفتار سیستم توده سنگ - نگهداری ناچیز است. در ادامه به بررسی دقیق‌تر تأثیر فاصله بین شمع‌ها و تونل (S) پرداخته شده است.

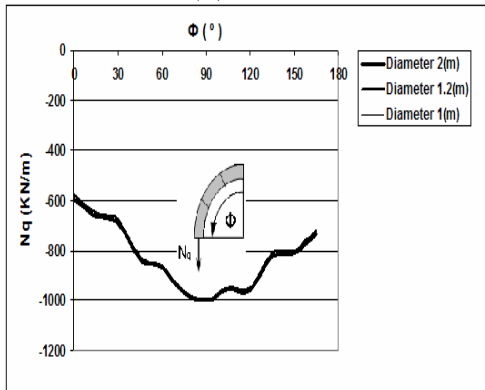
شکل ۶a نشست تاج تونل (جابجایی ماکزیمم) را نسبت به فاصله تونل - شمع نشان می‌دهد. با کاهش فاصله تونل - شمع (S) از مقدار ۸m تا ۴m، جابجایی تاج تونل افزایش می‌یابد که با کاهش فاصله تا مقدار ۱m جابجایی تاج تونل دوباره کاهش می‌یابد. همچنین منحنی تغییرات نیروی محوری ماکزیمم نسبت به فاصله تونل - شمع در شکل ۶b نشان داده است. مطابق شکل بیشترین مقدار نیروی محوری در فاصله ۲ متری بر تونل اعمال می‌شود. در بررسی تأثیرات فواصل شمع - تونل دو فاکتور بار وارده بر شمع و حضور شمع نقش اساسی را دارند.



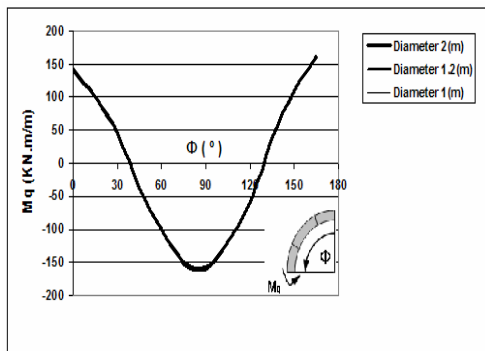
(a)



(b)



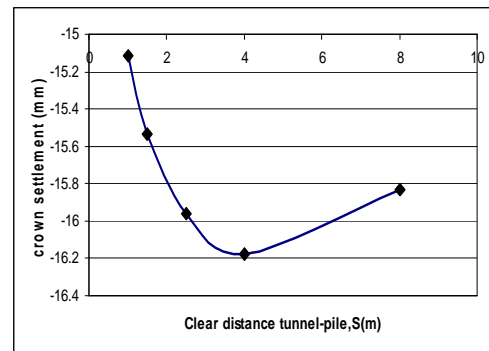
(c)



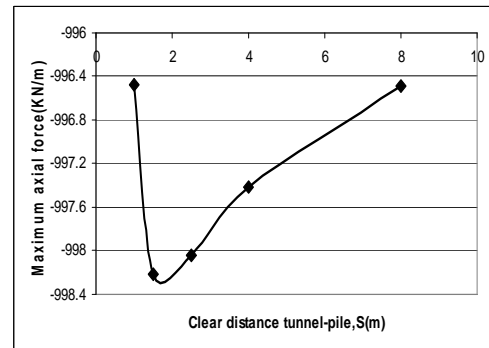
(d)

شکل ۷: تأثیر قطر شمع‌ها بر روی (a) جابجایی افقی (b) جابجایی عمودی (c) نیروی محوری (d) ممان خمشی وارد بر دیواره تونل

در فواصل دورتر فاکتور بار وارده بر شمع‌ها نقش اصلی را بازی می‌کند و باعث افزایش بار و جابجایی دیواره تونل می‌شود، بنابراین هر چه تونل در فواصل دور به شمع‌ها نزدیک‌تر شود میزان بار و جابجایی دیواره تونل بیشتر است. از طرف دیگر در فواصل نزدیک حضور شمع‌ها نقش اصلی را بازی می‌کند و شمع‌ها همانند دیواره حائل برای تونل عمل می‌کنند که باعث کاهش جابجایی می‌شوند. بنابراین در فواصل نزدیک هر چه تونل به شمع‌ها نزدیک باشد، میزان جابجایی دیواره تونل و بار وارد بر نگهداری تونل کاهش می‌یابد.



(a)



(b)

شکل ۶: تأثیر فاصله تونل - شمع بر روی (a) نشست تاج (b) ماکزیمم نیروی محوری

۴-۵- قطر شمع‌ها (D_{pile})

برای بررسی تأثیر قطر شمع‌ها مقادیر قطر شمع، $1/2$ (قطر شمع‌های پل غدیر شیراز)، $1/5$ و 1 متر در نظر گرفته شده است. در همه این موارد فاصله بین شمع‌ها تا دیواره تونل $3/4$ متر و نیروی محوری وارد بر هر شمع همان مقدار ثابت 130 تن اعمال شده است. اشکال $7a$ و $7b$ تغییرات قطر تونل ناشی از بارگذاری شمع‌ها در دو جهت افقی و عمودی نسبت به قطر شمع‌ها را نشان می‌دهند.

۵- نتایج

بررسی‌های عددی نشان می‌دهد که رفتار تونل‌های عبوری از نزدیک شمع‌های باربر به عواملی چون میزان بار وارده بر هر شمع، طول شمع، فاصله مستقیم بین تونل و ردیف شمع‌های کناری و قطر شمع‌ها بستگی دارد. در میان پارامترهای فوق، پارامتر بار وارده بر هر شمع و طول شمع از اهمیت بیشتری برخوردار هستند. افزایش میزان بار وارده بر هر شمع، سبب افزایش توزیع تنش در خاک آن منطقه و افزایش نیرو و جابجایی در مقطع تونل می‌شود. با افزایش طول و قطر شمع‌ها، بار ثابت وارد بر هر شمع در سطح مقطع گسترده‌تری از خاک پخش می‌شود. بنابراین میزان تنش در واحد سطح توزیع بار کاهش می‌یابد و باعث کاهش جابجایی و تنش وارد بر نگهداری تونل می‌شود. بررسی‌های عددی نشان می‌دهد که در فواصل دور، با نزدیک شدن تونل به شمع میزان بار و جابجایی تونل افزایش می‌یابد. در حالی که در فواصل خیلی نزدیک این روند بر عکس شده و شمع‌ها همانند دیواره حائل عمل می‌کند و با نزدیک شدن تونل به شمع، جابجایی و بار وارد بر تونل کاهش می‌یابد. به منظور بررسی دقیقتر این موضوع توصیه می‌شود مواردی مطالعه شود که شمع‌ها در کنار تونل‌ها و بعد از تونل‌ها احداث می‌شود تا بتوان تأثیر دو عامل ساخت و بارگذاری شمع‌ها به طور جداگانه بررسی کرد. فواصل خیلی نزدیک این روند بالعکس شده و شمع به عنوان عامل بازدارنده حرکت دیواره تونل عمل می‌کند. همچنین به منظور تکمیل مطالعه پارامتریک لازم است تأثیر پارامترهای موقعیت نوک شمع نسبت به محور تونل، تعداد ردیف شمع‌ها، فاصله بین شمع‌ها بررسی شوند.

قدردانی

این تحقیق با حمایت هسته پژوهشی طراحی و ساخت ابنیه زیرزمینی در دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه شهید باهنر انجام گرفته است. لازم است از مدیریت و مسئولین این بخش صمیمانه تشکر و سپاسگزاری شود.

منابع

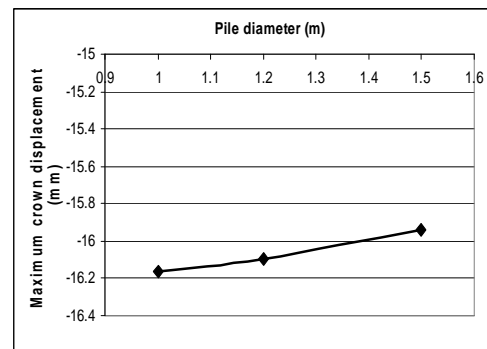
- [1] Christian, S. F.; (2002); "The influence of bored piles on existing tunnels"; Imperial College of Science, Technology and Medicine . London.
- [2] Skempton , A.W. ; (1959); "Cast in-situ bored piles in London clay"; Geotechnique, No.4, pp.153-173.

بررسی‌ها نشان می‌دهند که قطر شمع‌ها تأثیر ناچیزی بر روی همگرایی تونل دارد. شکل‌های Yc و Yd به ترتیب نیروی محوری و ممان خمشی وارد بر نگهداری تونل را نسبت به تغییرات قطر شمع‌ها را نمایش می‌دهند.

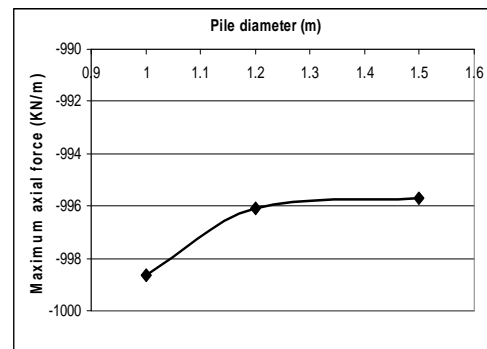
نیروی محوری وارد بر نگهداری تونل با افزایش قطر شمع‌ها به صورت خطی کاهش یافته و تغییرات قطر تونل تأثیر ناچیزی بر روی ممان خمشی وارد بر نگهداری می‌گذارد.

افزایش قطر شمع سبب می‌شود که نیروی ثابت وارد بر هر شمع در سطح گسترده‌تری از خاک اطراف شمع پخش شود و میزان تنش در واحد سطح خاک کاهش یابد. بنابراین نیروی القایی ناشی از بارگذاری شمع‌ها وارد بر نگهداری تونل و متعاقباً جابجایی دیواره تونل کاهش می‌یابد. شکل $8a$ ماکزیمم جابجایی عمودی که در تاج تونل اتفاق می‌افتد نسبت به قطر شمع‌ها را نشان می‌دهد.

با افزایش قطر شمع میزان ماکزیمم جابجایی تونل به مقدار ناچیزی کاهش می‌یابد. همچنین ماکزیمم نیروی محوری وارد بر نگهداری تونل با افزایش قطر شمع‌ها کاهش می‌یابد (شکل $8b$).



(a)



(b)

شکل ۸: تأثیر قطر شمع‌ها بر روی (a) جابجایی عمودی ماکزیمم (b) نیروی محوری ماکزیمم وارد بر دیواره تونل

- [3] Tomlinson, M. J.; (2001); "*Foundation design and construction*" Seventh edition, Pearson Education, Harlow, UK.
- [4] Schroeder, F.C. , Adden Brooke, T. I and Potts, D. M ; (2002); "*A numerical investigation into the impact of piles group loading on tunnels*". 2nd international conference on soil structure interaction in urban civil engineering, pp. 205-212.
- [5] نمازی، اسحاق؛ (۱۳۸۵)؛ **اندرکنش سیستم پل-توده سنگ-تونل**؛ پایان‌نامه کارشناسی ارشد، بخش مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان.
- [6] Vermeer, P. A and Birkgreve , R. B. J. ; (2001); "*Plaxis 3D tunnel manual*".
- [7] Abu-Farsakh, M. Y. and Tumay, M. T.; (1999); "*Finite element analysis of ground response due to tunnel excavation in soils*", In: Fernandez, G., Baver, R. (Eds), *Geo- Engineering for underground facilities* , ASCE geotechnical special publication No 90, American Society of Civil Engineers, pp. 514 –525.
- [8] Abu-krisna, A. A. M.; (1998); "*Numerical modeling of TBM tunneling in consolidation clay*", Ph.D thesis, university of Innsbruck.
- [9] آزمایشگاه مکانیک خاک شیراز؛ (۱۳۸۱)؛ **گزارش تحقیقات و مطالعات ژئوتکنیک پروژه قطار شهری شیراز؛ شرکت ساختمانی بام‌راه.**

زیرنویس‌ها

¹ - Skempton