

رسالة محمد



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک  
گروه مکانیک سنگ  
پایان نامه کارشناسی ارشد

بررسی عددی پایداری شمع‌ها در مجاورت فضاهای زیرزمینی

فرزاد ابراهیم‌زاده

استاد راهنما :

دکتر سید رحمان ترابی

اردیبهشت ۹۵

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

گروه مکانیک سنگ

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای فرزاد ابراهیمزاده

تحت عنوان: بررسی عددی پایداری شمع‌ها در مجاورت فضاهای زیرزمینی

در تاریخ ..... توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی و با درجه .....  
مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	استاد مشاور	امضاء	استاد راهنما
	...		دکتر سید رحمان ترابی

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	دکتر رامین رفیعی		دکتر مجید نیکخواه
			دکتر شکرالله زارع

تقدیم به:

پدر و مادر عزیزم

و

سپیده زندگانی ام

## مشکر و قدردانی

بر خود لازم می‌دانم از زحمات فراوان استاد عزیز جناب دکتر " سید رحمان ترابی " در طول تمامی مراحل تحقیق حاضر کمال قدردانی و تشکر را داشته

باشم. همین‌طور از جناب آقایان دکتر " زارع " و دکتر " نیکخواه " زنده‌ها برای قبول زحمت داوران تحقیق حاضر بلکه برای تمام زحماتی که در طول مدت

تحصیل در مقطع کارشناسی ارشد برای بنده حقیر کشیده اند کمال تشکر را دارم.

لازم است از زحمات جناب آقای دکتر " ازلی " و مهندس " فروغی " همچنین موسسه " مهندسین مشاور سائل " به سبب همکاری در

مراحل تحقیق و در اختیار قرار دادن اطلاعات لازم مشکر و قدردانی می‌شود.

## تعهد نامه

اینجانب **فرزاد ابراهیمزاده** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی معدن گرایش مکانیک سنگ از دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه کارشناسی ارشد تحت عنوان **بررسی عددی پایداری شمع ها در مجاورت فضاهای زیرزمینی تحت راهنمایی آقای دکتر سید رحمان ترابی** متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تا کنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تاثیرگذار بوده اند، در مقالات مستخرج از این پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های آنها) استفاده شده است، ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است، اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاقی انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده) مربوط به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

## چکیده

حفر فضای زیرزمینی در اعماق کم و زمین‌های خاکی منجر به ایجاد جابجایی‌های افقی و عمودی در اطراف حفریه زیرزمینی می‌گردد. این جابجایی‌ها می‌تواند به سطح زمین رسیده و موجب آسیب به سازه‌های موجود در سطح زمین و پی نگهدارنده آن‌ها شود. از این رو بررسی تغییرات حاصل از عبور تونل به عنوان یکی از فضا‌های زیرزمینی متداول شهری، بر پایداری پی‌های عمیق از اهمیت بالایی برخوردار است. در این پایان‌نامه تاثیر عبور تونل بر پایداری شمع‌های مجاور با استفاده از روش عددی تفاضل محدود و نرم‌افزار  $FLAC^{3D}$  ضمن انجام مطالعه موردی شمع‌های نگهدارنده سازه پل تقاطع غیر هم‌سطح بزرگراه امام علی با بزرگراه شهید محلاتی در حضور عبور تونل خط هفت متروی تهران مورد بررسی قرار گرفته است. پارامترهای اصلی مورد بحث در مطالعه حاضر شامل طول شمع، فاصله جانبی شمع از مرکز تونل و عمق قرارگیری تونل از سطح زمین است. در این مطالعه میزان تاثیر پارامترهای فوق‌الذکر بر تغییر شکل جانبی، میزان نشست نوک شمع، تغییرات نیروی محوری پاشنه، تغییرات مقاومت جداري شمع و ظرفیت باربری شمع ضمن عبور تونل از عمق‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج تحلیل‌های انجام شده حاکی از تشکیل چهار محدوده تاثیر در اطراف تونل است. شمع‌هایی که پاشنه آن‌ها واقع در محدوده اول که روی تاج تونل و در فاصله  $0.6 D_T$  برابر قطر تونل ( $D_T$ ) از مرکز تونل قرار دارد و به اندازه  $3D_T$  از محور مرکزی تونل به طرف سطح زمین گسترش یافته است، بیش‌ترین میزان افت در کاهش ظرفیت باربری محوری و تا  $33.1\%$  ظرفیت باربری محوری شمع بدون حضور تونل را متحمل می‌شوند که می‌توان این قسمت را محدوده بحرانی تاثیر تونل سازی بر شمع‌های مجاور دانست. عبور تونل بر شمع‌های حاضر در محدوده چهارم که با زاویه  $45^\circ$  درجه نسبت به خط افق، از جداره تونل آغاز و در فاصله جانبی  $|X| > 2.1 D_T$  گسترش یافته است، هیچ‌گونه تاثیری ندارد.

کلمات کلیدی: تونل‌سازی، شمع، روش تفاضل محدود، ظرفیت باربری شمع، نیروی محوری پاشنه، مقاومت جداري شمع، نشست نوک شمع

## مقالات مستخرج از پایان نامه

- ابراهیم‌زاده ف، ترابی س (۱۳۹۴)، " بررسی عددی مکانیزم انتقال بار در میان شمع‌ها در حضور تونل‌سازی (مطالعه موردی تونل خط هفت مترو تهران) " دومین همایش بین‌المللی پژوهش‌های صنعت سیمان و بتن و دومین همایش ملی مهندسی عمران شهر سازی و توسعه پایدار ، دانشگاه شهید بهشتی، تهران
- ابراهیم‌زاده ف، ترابی س (۱۳۹۴)، " بررسی عددی پایداری شمع‌ها در مجاورت تونل (مطالعه موردی تونل خط هفت مترو تهران) " همایش ملی مهندسی عمران و پژوهش‌های نیاز محور " دانشگاه خاوران ، مشهد



## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
ش.....	فهرست اشکال.....
ظ.....	فهرست جداول.....
غ.....	فهرست علائم.....
۱.....	۱- فصل اول.....
۲.....	۱-۱- زمینه تحقیق.....
۳.....	۱-۲- سوالات تحقیق.....
۳.....	۱-۳- ضرورت انجام تحقیق.....
۴.....	۱-۴- شیوه انجام تحقیق.....
۵.....	۱-۵- معرفی فصل‌های پایان‌نامه.....
۶.....	۱-۶- جمع‌بندی.....
۷.....	۲- فصل دوم.....
۸.....	۲-۱- مقدمه.....
۸.....	۲-۲- جابجایی ناشی از تونل‌سازی.....
۱۰.....	۲-۳- پایداری جبهه‌کار.....
۱۱.....	۲-۴- گسترش جابجایی به سمت سطح.....

- ۱۳-۲-۵- کلیاتی در خصوص پی عمیق .....
- ۱۳-۲-۵-۱- شمع‌های منفرد .....
- ۱۴-۲-۵-۲- ظرفیت باربری محوری شمع .....
- ۱۶-۲-۵-۳- روش‌های تحلیل ظرفیت باربری محوری شمع .....
- ۱۶-۲-۵-۳-۱- روش تحلیل استاتیکی برای تعیین ظرفیت باربری محوری .....
- ۱۸-۲-۵-۳-۲- آزمایش‌های بارگذاری .....
- ۱۹-۲-۵-۳-۳- روش مدل‌سازی عددی .....
- ۲۴-۲-۵-۴- ظرفیت باربری جانبی شمع .....
- ۲۵-۲-۵-۴-۱- معیار کوتاه و بلند بودن شمع .....
- ۲۶-۲-۵-۴-۲- محاسبه ظرفیت باربری جانبی شمع‌های کوتاه .....
- ۲۶-۲-۵-۴-۳- ظرفیت باربری شمع‌های بلند .....
- ۲۸-۲-۶- اندرکنش شمع-تونل .....
- ۳۶-۲-۷- جمع‌بندی .....
- ۳۷-۳- فصل سوم .....
- ۳۸-۳-۱- مقدمه .....
- ۳۸-۳-۲- روش‌های عددی .....
- ۳۹-۳-۲-۱- روش تفاضل محدود .....
- ۴۰-۳-۲-۲- آشنایی با نرم‌افزار فلک سه‌بعدی .....

- ۳-۳- شرح پروژه ..... ۴۰
- ۳-۳-۱- تفکیک و توصیف واحدهای زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل ..... ۴۳
- ۳-۳-۲- مشخصات هندسی تونل خط هفت ..... ۴۴
- ۳-۴- مدل‌سازی عددی ..... ۴۴
- ۳-۴-۱- مدل‌سازی مرحله اول ..... ۴۵
- ۳-۴-۱-۱- المان حد فاصل ..... ۴۷
- ۳-۴-۱-۲- انتخاب مدل رفتاری ..... ۴۹
- ۳-۴-۱-۳- اعمال شرایط اولیه ..... ۵۰
- ۳-۴-۲- مدل‌سازی مرحله دوم ..... ۵۱
- ۳-۵- اعتبار سنجی ..... ۵۶
- ۳-۵-۱- آزمایش بارگذاری استاتیکی کومودروموس ..... ۵۷
- ۳-۵-۱-۱- محاسبه ابعاد بهینه برای مدل ..... ۶۱
- ۳-۵-۲- آزمایش بارگذاری جانبی ریسه ..... ۶۳
- ۳-۵-۳- راستی آزمایشی مدل تونل ..... ۶۵
- ۳-۶- جمع‌بندی ..... ۷۰
- ۴- فصل چهارم ..... ۷۱
- ۴-۱- مقدمه ..... ۷۲
- ۴-۲- مرحله اول تحلیل ..... ۷۲

- ۷۳ ..... ۱-۲-۴ - بررسی ظرفیت باربری محوری شمع
- ۷۶ ..... ۲-۲-۴ - بررسی ظرفیت باربری جانبی
- ۷۸ ..... ۳-۴ - مرحله دوم تحلیل
- ۷۹ ..... ۱-۳-۴ - تغییرات نشست نوک شمع ضمن عبور تونل
- ۸۵ ..... ۲-۳-۴ - تغییر شکل جانبی شمع
- ۸۸ ..... ۳-۳-۴ - تغییرات نیروی محوری در پاشنه شمع
- ۹۵ ..... ۴-۳-۴ - تغییرات مقاومت جداری در طول شمع
- ۱۰۰ ..... ۴-۴ - تحلیل سوم
- ۱۰۴ ..... ۵-۴ - جمع بندی
- ۱۰۵ ..... ۵- فصل پنجم
- ۱۰۶ ..... ۱-۵ - نتیجه گیری
- ۱۱۱ ..... ۳-۵ - فهرست منابع

## فهرست اشکال

- شکل (۱-۲): پروفیل جابجایی حفاری برای مقاطع اصلی تونل (لکا، ۲۰۰۷)..... ۹
- شکل (۲-۲): (a) زون تسلیم در عقب جبهه کار (b) زون تسلیم در جلوی جبهه کار (لکا، ۲۰۰۷)..... ۱۰
- شکل (۳-۲): ریزش جبهه کار در زمین‌هایی با خاک چسبنده (لکا، ۲۰۰۷)..... ۱۱
- شکل (۴-۲): ریزش جبهه کار در زمین‌هایی با خاک غیر چسبنده (لکا، ۲۰۰۷)..... ۱۱
- شکل (۵-۲): هندسه گودی نشست حاصل از تونل سازی (گراسو و همکاران، ۲۰۰۸)..... ۱۲
- شکل (۶-۲): مثالی از تخمین بار نهایی شمع به روش دبیر (فلنیوس، ۲۰۱۵)..... ۲۱
- شکل (۷-۲): مثالی از تخمین بار نهایی شمع به روش برون‌یابی چین - کوندرا (فلنیوس، ۲۰۱۵)..... ۲۲
- شکل (۸-۲): مثالی از تخمین بار نهایی شمع به روش حدی دیویسون (فلنیوس، ۲۰۱۵)..... ۲۳
- شکل (۹-۲): محدوده تاثیر عبور تونل بر شمع‌های مجاور از دیدگاه محققان مختلف..... ۳۱
- شکل (۱-۳): (الف) نمایی از محل قرارگیری پل و مسیر تونل (مشاور ساحل، ۹۳)، (ب) نمای شماتیک از محدوده مدل سازی..... ۴۲
- شکل (۲-۳): هندسه تونل خط هفت متروی تهران (مشاور ساحل، ۱۳۹۱)..... ۴۵
- شکل (۳-۳): مدلی از محیط کامل شمع و خاک در نرم‌افزار و حذف نیمی از هندسه به دلیل تقارن..... ۴۶
- شکل (۴-۳): ابعاد المان در راستای حد فاصل (Itasca, 2012)..... ۴۸
- شکل (۵-۳): نمایی از المان‌های مورد استفاده در مدل شمع - خاک..... ۴۹
- شکل (۶-۳): نمودار حداکثر نیروی نامتعادل کننده و شرایط تنش در راستای قائم پس از تحلیل وزن مدل ساخته شده در مرحله اول..... ۵۱
- شکل (۷-۳): مقطع طولی از هندسه تونل ( $HT/DT=3/5$ ) در مجاورت شمع‌های محدوده به همراه واحدهای زمین‌شناسی (مشاور ساحل، ۱۳۹۳)..... ۵۲
- شکل (۸-۳): موقعیت قرارگیری تونل در سه حالت مختلف در حضور شمع‌های محدوده..... ۵۲

- شکل (۳-۹): هندسه مدل ساخته شده از تقاطع تونل خط هفت با شمع‌های محدوده کیلومتر ۲۲۰+۴ در  $HT/DT = ۳/۵$  ..... ۵۴
- شکل (۳-۱۰): نمونه‌ای از نمودار حداکثر نیروی نامتعادل کننده و شرایط تنش در راستای قائم پس از تحلیل وزن برای مدل مرحله دوم ..... ۵۵
- شکل (۳-۱۱): فرآیند مدل‌سازی پیشروی تونل به روش مرحله‌به‌مرحله ..... ۵۶
- شکل (۳-۱۲): چیدمان شمع‌های مورد آزمایش بارگذاری استاتیکی در آزمایش کومودروموس (کومودروموس، ۲۰۰۳) ..... ۵۸
- شکل (۳-۱۳): هندسه مدل اولیه ساخته شده برای شبیه‌سازی آزمایش استاتیکی ..... ۵۹
- شکل (۳-۱۴): مقایسه نتایج حاصل از مدل‌هایی با زاویه اصطکاک داخلی حد فاصل مختلف ..... ۶۰
- شکل (۳-۱۵): ابعاد مدل سه‌بعدی ساخته شده به منظور شبیه‌سازی آزمایش بارگذاری جانبی در مطالعه ریشه ..... ۶۵
- شکل (۳-۱۶): مقایسه نتایج آزمایش ظرفیت باربری ریشه با نتایج مدل‌سازی عددی ..... ۶۵
- شکل (۳-۱۸): مقطع زمین‌شناسی کیلومتر ۵۰۰+۱۰ تونل خط هفت متروی تهران (مشاور ساحل، ۱۳۹۴) ..... ۶۷
- شکل (۳-۱۷): مقطع زمین‌شناسی کیلومتر ۵۵۰+۱۰ تونل خط هفت متروی تهران (مشاور ساحل، ۱۳۹۴) ..... ۶۷
- شکل (۳-۱۹): مقطع زمین‌شناسی کیلومتر ۷۰۰+۴ تونل خط هفت متروی تهران (مشاور ساحل، ۱۳۹۴) ..... ۶۷
- شکل (۳-۲۰): مدل ساخته شده از کیلومتر ۵۵۰+۱۰ و تغییرات نشست نقطه A نسبت به گام زمانی پس از عبور تونل به اندازه ۳۵ متر ..... **Error! Bookmark not defined.**
- شکل (۳-۲۱): مدل ساخته شده از کیلومتر ۵۰۰+۱۰ و تغییرات نشست نقطه B نسبت به گام زمانی پس از عبور تونل به اندازه ۳۰ متر ..... ۶۹
- شکل (۳-۲۲): مدل ساخته شده از کیلومتر ۷۰۰+۴ و تغییرات نشست نقطه A نسبت به گام زمانی پس از عبور تونل به اندازه ۲۵ متر ..... ۶۹

- شکل (۴-۱): منحنی تنش-نشست و کنتور جابجایی عمودی برای شمع معرف شمع‌های ردیف A... ۷۳
- شکل (۴-۲): منحنی تنش-نشست و کنتور جابجایی عمودی برای شمع معرف شمع‌های ردیف B... ۷۴
- شکل (۴-۳): منحنی تنش-نشست و کنتور جابجایی عمودی برای شمع معرف شمع‌های ردیف C... ۷۴
- شکل (۴-۴): تغییرات نیروی محوری در طول شمع‌های محدوده مورد بررسی در تحلیل مرحله اول ۷۶
- شکل (۴-۵): کنتور جابجایی در جهت نیروی وارده و منحنی نیروی جانبی - جابجایی جانبی در نوک شمع معرف شمع‌های ردیف A ..... ۷۷
- شکل (۴-۶): کنتور جابجایی در جهت نیروی وارده و منحنی نیروی جانبی - جابجایی جانبی در نوک شمع معرف شمع‌های ردیف B ..... ۷۷
- شکل (۴-۷): کنتور جابجایی در جهت نیروی وارده و منحنی نیروی جانبی - جابجایی جانبی در نوک شمع معرف شمع‌های ردیف C ..... ۷۸
- شکل (۴-۸): تغییرات نشست نوک شمع‌های  $B4, B3$  و  $B5$  ضمن عبور تونل از سه حالت مختلف .. ۷۹
- شکل (۴-۹): تغییرات نشست نوک شمع‌های  $A3, A4$  و  $A5$  ضمن پیشروی تونل از سه عمق حالت مختلف ..... ۸۰
- شکل (۴-۱۰): نشست نوک شمع‌های محدوده و خاک مجاور شمع، پس از عبور تونل به اندازه  $2/5DT$  در راستای پیشروی در  $HT/DT = 3/5$  ..... ۸۲
- شکل (۴-۱۱): نشست نوک شمع‌های محدوده و خاک مجاور شمع، پس از عبور تونل به اندازه  $2/5DT$  در راستای پیشروی در  $HT/DT = 4$  ..... ۸۲
- شکل (۴-۱۲): نشست نوک شمع‌های محدوده و خاک مجاور شمع، پس از عبور تونل به اندازه  $2/5DT$  در راستای پیشروی در  $HT/DT = 4/5$  ..... ۸۳
- شکل (۴-۱۳): محدوده‌های تاثیر عبور تونل از مجاورت شمع‌ها از منظر نشست ایجاد شده در شمع ۸۴
- شکل (۴-۱۴): تغییر شکل جانبی شمع‌های مجاور تونل در حالت اول ( $HT/DT = 3/5$ ) ..... ۸۶

- شکل (۴-۱۵): تغییر شکل جانبی شمع‌های مجاور تونل در حالت دوم ( $HT/DT = 4$ ) ..... ۸۶
- شکل (۴-۱۶): تغییر شکل جانبی شمع‌های مجاور تونل در حالت سوم ( $HT/DT = 4/5$ ) ..... ۸۷
- شکل (۴-۱۷): تغییرات نیروی محوری در پاشنه شمع‌های مجاور تونل ضمن عبور تونل در حالت  
 $HT/DT = 3/5$  ..... ۹۰
- شکل (۴-۱۸): تغییرات نیروی محوری در پاشنه شمع‌های مجاور تونل ضمن عبور تونل در حالت  
 $HT/DT = 4$  ..... ۹۱
- شکل (۴-۱۹): تغییرات نیروی محوری در پاشنه شمع‌های مجاور تونل ضمن عبور تونل در حالت  
 $HT/DT = 4/5$  ..... ۹۲
- شکل (۴-۲۰): تغییرات نهایی نیروی محوری پاشنه برای شمع‌های حاضر در مجاورت تونل ضمن عبور  
تونل از سه حالت مختلف ..... ۹۳
- شکل (۴-۲۱): تغییرات نهایی نیروی محوری در پاشنه شمع‌های مجاور تونل ..... ۹۴
- شکل (۴-۲۲): تغییرات مقاومت جداری شمع‌های مجاور در حالت  $HT/DT = 3/5$  ..... ۹۷
- شکل (۴-۲۳): تغییرات مقاومت جداری شمع‌های مجاور در حالت  $HT/DT = 4$  ..... ۹۸
- شکل (۴-۲۴): تغییرات مقاومت جداری شمع‌های مجاور در حالت  $HT/DT = 4/5$  ..... ۹۹
- شکل (۴-۲۵): تغییرات ظرفیت باربری محوری شمع‌ها در حالت  $HT/DT = 3/5$  ..... ۱۰۱
- شکل (۴-۲۶): تغییرات ظرفیت باربری محوری شمع‌ها در حالت  $HT/DT = 4$  ..... ۱۰۱
- شکل (۴-۲۷): تغییرات ظرفیت باربری محوری شمع‌ها در حالت  $HT/DT = 4/5$  ..... ۱۰۲
- شکل (۴-۲۸): تغییرات ظرفیت باربری محوری برای شمع‌های مجاور تونل در سه حالت مختلف . ۱۰۲



## فهرست جداول

- جدول (۱-۲): متداول‌ترین روابط ارائه شده برای تعیین ظرفیت باربری محوری با روش تحلیل استاتیکی (فخاریان، ۱۳۸۴). ..... ۱۷
- جدول (۱-۳): طبقه‌بندی روش‌های عددی بر اساس محیط کاربرد (جینگ، ۲۰۰۳). ..... ۳۹
- جدول (۲-۳): معرفی واحدهای لایه‌های خاک مسیر تونل (مشاور ساحل، ۱۳۹۴). ..... ۴۳
- جدول (۳-۳): مقادیر پارامترهای ژئوتکنیکی پیشنهادی برای واحدهای زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل (مشاور ساحل، ۱۳۹۴). ..... ۴۴
- جدول (۴-۳): خصوصیات الاستیک بتن و المان سطح شمع‌های پل (مشاور ساحل، ۱۳۹۳). ..... ۵۰
- جدول (۵-۳): مشخصات دوغاب و پوشش بتنی تونل خط هفت متروی تهران (مشاور ساحل، ۱۳۹۱). ..... ۵۵
- جدول (۶-۳): مشخصات خاک در محدوده آزمایش بارگذاری استاتیکی (کومودروموس، ۲۰۰۳). ..... ۵۷
- جدول (۷-۳): پارامترهای بکار رفته برای مدل‌سازی عددی شمع در آزمایش بارگذاری استاتیکی کومودروموس (کومودروموس، ۲۰۰۳). ..... ۵۹
- جدول (۸-۳): مقایسه ظرفیت باربری محوری مدل‌هایی با زاویه اصطکاک داخلی مختلف با نتایج گزارش کومودروموس ..... ۶۰
- جدول (۹-۳): تغییرات ظرفیت باربری محوری با ابعاد مدل ساخته شده برای شبیه‌سازی آزمایش استاتیکی کومودروموس ..... ۶۲
- جدول (۱۰-۳): تغییرات ظرفیت باربری محوری با ابعاد عمق مدل ساخته شده برای شبیه‌سازی آزمایش استاتیکی کومودروموس ..... ۶۳
- جدول (۱۱-۳): مشخصات خاک در محدوده آزمایش ریسه (ریسه، ۱۹۷۴). ..... ۶۴
- جدول (۱۲-۳): پارامترهای بکار رفته برای مدل‌سازی عددی شمع در آزمایش ریسه (ریسه، ۱۹۷۴). ..... ۶۴

جدول (۳-۱۳): مقایسه نتایج حاصل از ایزاربندی و مدل سازی عددی کیلومترهای ۱۰+۵۵۰، ۱۰+۵۰۰

و ۴+۷۰۰ ..... ۶۹

جدول (۴-۱): ظرفیت باربری محوری، تنش و جابجایی مجاز شمع های هر ردیف ..... ۷۵

جدول (۴-۲): ظرفیت باربری جانبی و مقدار مجاز جابجایی شمع های معرف ردیف های شمع محدوده ... ۷۸

## فهرست علائم

$Q_u$	ظرفیت باربری نهایی
$Q_p$	ظرفیت باربری پاشنه
$q_p$	مقاومت پاشنه
$f_s$	مقاومت جلدی
$A_p$	سطح مقطع پاشنه شمع
$A_s$	محیط شمع
$S_u$	مقاومت برشی زهکشی نشده خاک
$\gamma$	وزن مخصوص خاک
$\bar{q}$	تنش موثر قائم درتراز پاشنه شمع
$B$	عرض یا قطر شمع
$N_c, N_q$ و $N_\gamma$	فاکتورهای بی بعد ظرفیت باربری
$Q_a$	ظرفیت باربری مجاز
$FS$	ضریب ایمنی
$\omega$	نسبت چسبندگی به تنش موثر
$OCR$	نرخ پیش تحکیمی
$L$	طول شمع
$\sigma_{v0}$	تنش موثر متوسط
$P_0'$	تنش موثر قائم
$\theta$	زاویه اصطکاک موثر بین شمع و خاک
$\varphi$	زاویه اصطکاک داخلی خاک
$K$	ضریب فشار جانبی زمین
$K_H$	مدول عکس العمل افقی بستر
$I_p$	گشتاور ماند مقطع شمع
$R$	ضریب سختی شمع
$\nu_s$	ضریب پواسون خاک
$E_s$	مدول الاستیک خاک
$P_u$	فشار نهایی خاک
$M_u$	لنگر نهایی شمع
$F_u$	بار نهایی افقی

$Z_r$	عمق دوران
$e$	خروج از مرکز بارگذاری
$K_a$	ضریب تنش فشار خاک در حالت افقی
$K$	مدول برشی
$G$	مدول بالک
$k_n$	سختی نرمال
$k_s$	سختی برشی
$\Delta z_{\min}$	کوچکترین بعد هندسی المان
$\delta_i$	نشست مجاز شمع
$P$	نیروی محوری در طول شمع
$P_{Per}$	نیروی محوری اعمال شده به نوک شمع
$\delta$	نشست نوک شمع

## ۱- فصل اول

### کلیات تحقیق

## ۱-۱- زمینه تحقیق

پی‌های عمیق (شمع‌ها) علاوه بر مواجهه با بار مستقیم سازه، در معرض بارگذاری ثانویه حاصل از جابجایی خاک قرار دارند. یکی از عوامل مهم جابجایی خاک در محیط‌های شهری، حفر فضای زیرزمینی است. با افزایش جمعیت و رشد شهرها تمایل به استفاده از فضاهای زیرزمینی خصوصاً با هدف حمل و نقل عمومی، افزایش پیدا کرده است و می‌توان تونل را یکی از مهم‌ترین فضاهای زیرزمینی مورد استفاده در محیط‌های شهری دانست. از این رو تمرکز مطالعه حاضر به بررسی تاثیر تونل سازی بر پایداری پی عمیق (شمع) اختصاص دارد.

با توجه به افزایش تونل‌ها در محیط‌های شهری به منظور ترفیع نیازهای زندگی در کلان‌شهرها، نزدیکی موقعیت قرارگیری تونل‌ها با یکدیگر و نیز ساخت تونل‌های جدید در مجاورت پی‌های عمیق و کم‌عمق سازه‌های سطحی در مناطق پرتراکم شهری، امری اجتناب ناپذیر است. تحقیقات فراوانی در خصوص تاثیر عبور تونل بر سازه‌های سطحی صورت پذیرفته است که بخش بسیار اندکی از مطالعات به سازه‌های سطحی نگهداری شده توسط پی‌های عمیق اختصاص دارد که از جمله آن‌ها می‌توان به چنگ و لونگ<sup>۱</sup> (۲۰۰۴)، سلمتاس و استندینگ<sup>۲</sup> (۲۰۰۵)، لی و جاکوبز<sup>۳</sup> (۲۰۰۶)، لی و باست<sup>۴</sup> (۲۰۰۷)، یو<sup>۵</sup> (۲۰۱۳) اشاره کرد. در تحقیق حاضر به بررسی پایداری شمع‌های پل تقاطع بزرگراه امام علی با بزرگراه شهید محلاتی ضمن عبور تونل خط هفت مترو تهران پرداخته می‌شود.

---

<sup>۱</sup> Cheng & Leung

<sup>۲</sup> Selemetas & Standing

<sup>۳</sup> Lee & Jacobsz

<sup>۴</sup> Lee & Bassett

<sup>۵</sup> Yoo

## ۱-۲- سوالات تحقیق

موضوع اصلی مورد بحث در تحقیق حاضر، چگونگی تاثیر تونل سازی بر رفتار شمع های مجاور تونل است. سوالات مطرح شده در این رابطه عبارت اند از: تاثیر تغییر طول و فاصله جانبی شمع از مرکز تونل در نشست و جابجایی جانبی شمع و نیز مقاومت پاشنه، مقاومت جداری و ظرفیت باربری شمع پس از عبور تونل. سایر سوالات مطرح شده عبارت اند از اینکه: افزایش عمق قرارگیری تونل چه تاثیری بر تغییرات موارد ذکر شده دارد؟ و محدوده تاثیر بحرانی پیشروی تونل بر شمع های مجاور چقدر است و تغییرات آن با افزایش عمق چگونه است؟

به طور کلی در این تحقیق این گونه استدلال شده است که موارد ذکر شده برای شمع هایی با طول و فاصله جانبی مختلف با تغییر در موقعیت قرارگیری تونل به طور قابل ملاحظه ای تغییر می کنند. با پاسخ به سوالات مطرح شده می توان محدوده تاثیر عبور تونل بر پایداری شمع های مجاور را مشخص و از آن برای تعیین عمق مناسب برای عبور تونل با کمترین اندرکنش نسبت به شمع های مجاور استفاده کرد. ضمن اینکه در مطالعه حاضر، آنالیزهای متعددی جهت نزدیک شدن نتایج مدل عددی با نتایج صحرایی انجام شده است. این عوامل شامل در نظرگیری فصل مشترک بین شمع و خاک، پارامترهای مدل ساختاری، ابعاد مدل و ... می باشد. در این مطالعه علاوه بر موارد ذکر شده، توضیحات مختصری در مورد نحوه برآورد ظرفیت باربری شمع و روش های مختلف تفسیر نتایج ارائه شده است.

## ۱-۳- ضرورت انجام تحقیق

با توجه به اینکه مجاورت تونل با پی عمیق سازه های سطحی در مناطق متراکم شهری، امری اجتناب ناپذیر محسوب می شود، کنترل حفر تونل برای به حداقل رساندن اثرات نامطلوب آن، امری ضروری است؛ چراکه ساخت تونل جدید منجر به جابجایی و تغییر شکل زمین می شود که ممکن است سایر سازه های

مجاور را تحت تاثیر قرار دهد. یکی از پیامدهای ساخت تونل در عمق کم نسبت به سطح زمین، داشتن پتانسیل آسیب زدن به سازه‌های سطحی و زیرسطحی است. نشست و تغییر شکل پی‌های عمیق، همین‌طور تغییر در تنش‌های برشی جداره شمع و کاهش ظرفیت باربری از مهم‌ترین آسیب‌های محتمل در اثر عبور تونل بر پی عمیق است. لذا بررسی اندرکنش پی عمیق با تونل امری لازم و ضروری است.

#### ۴-۱- شیوه انجام تحقیق

به‌طور کلی روش‌های آزمایش‌های میدانی و آزمایشگاهی، تحلیلی، تجربی و عددی را می‌توان از راه‌های پاسخگویی به سوالات تحقیق حاضر دانست. از آنجاکه در زمان احداث اکثر سازه‌های سطحی، احتمالی مبنی بر حفر فضای زیرزمینی در نظر گرفته نمی‌شود، در اکثر پی‌ها، تجهیزات پایش وجود ندارد. علاوه بر این، تردید در سازگاری مدل آزمایشگاهی با شرایط طبیعی زمین و حفر تونل و همین‌طور پیچیدگی‌های فراوان حفر تونل با روش مکانیزه، از عمده دلایلی است که منجر به استفاده روزافزون از روش‌های عددی در بررسی اندرکنش تونل و شمع می‌شود. در تحقیق حاضر با استفاده از روش عددی تفاضل محدود و نرم‌افزار  $FLAC^{3D}$  طی دو مرحله اقدام به بررسی اندرکنش شمع - خاک - تونل شده است. مرحله اول به مدل‌سازی اندرکنش شمع - خاک اختصاص دارد. در این مرحله آنالیزهای متعددی به‌منظور نزدیکی نتایج حاصل از مدل‌سازی به نتایج صحرائی انجام شد. در مرحله دوم با مدل‌سازی عبور تونل در سه عمق مختلف از مجاورت شمع‌های حاضر، به بررسی اندرکنش شمع - تونل پرداخته شد.



## ۱-۵- معرفی فصل‌های پایان‌نامه

پایان‌نامه حاضر از پنج فصل تشکیل شده است که در زیر شرح مختصری از هر یک از فصل‌ها ارائه شده است:

- در فصل اول تلاش شد اهداف پروژه و چگونگی نیل به آن تشریح شود.
- در فصل دوم ضمن مروری بر مطالعات انجام شده در زمینه اندرکنش شمع و تونل، به مرور کلیاتی در مورد شمع‌ها و روش‌های تعیین ظرفیت باربری آن‌ها پرداخته می‌شود.
- در فصل سوم روش انجام تحقیق تشریح شده است؛ به طوری که ابتدا شرح مختصری از روش‌های عددی و نرم‌افزار مورد استفاده بیان شده است و سپس وضعیت محدوده مورد مطالعه، از لحاظ مشخصات زمین‌شناسی و فنی بررسی شده است و در نهایت روند انجام مدل‌سازی شرح داده شده است.
- در فصل چهارم به بررسی تغییرات حاصل از عبور تونل، بر شمع‌هایی با طول‌ها و فواصل جانبی مختلف از مرکز تونل پرداخته شده است. تغییرات مربوط به نشست، جابجایی جانبی، نیروی محوری پاشنه، مقاومت جداری شمع و ظرفیت باربری شمع‌های مجاور تونل ضمن عبور تونل از سه عمق مختلف مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.
- در فصل پنجم نیز نتایج تحقیق جمع‌بندی و منابع مورد استفاده در تحقیق حاضر معرفی شده است و همین‌طور پیشنهاداتی برای تحقیقات آتی ارائه شده است.

## ۱-۶- جمع بندی

در این فصل سوالات اصلی تحقیق که در ارتباط با اندرکنش میان شمع و تونل است، بیان شد. همچنین علت انجام تحقیق و ضرورت آن نیز تشریح گردید. در ادامه روش تحقیق و آنچه در فصول مختلف پایان نامه ارائه شده است، به طور مختصر بیان شد. بدین ترتیب بر پایه مبانی ذکر شده می توان در طول پایان نامه برای تشریح جزئیات این تحقیق به پیش رفت. در فصل آتی پایان نامه به بررسی کلیاتی در مورد پی عمیق و مروری بر تحقیقات انجام شده در خصوص موضوع پایان نامه پرداخته شده است.

## ۲- فصل دوم

### مروری بر تحقیقات گذشتگان

## ۲-۱- مقدمه

به طور کلی حفر تونل در هر عمق از خاک منجر به تغییر سیستم توزیع تنش‌ها و همگرایی دهانه تونل و به وجود آمدن تغییر شکل‌هایی در سطح زمین می‌شود. این هم‌گرایی قبل از رسیدن جبهه‌کار به مقطع مورد نظر آغاز می‌شود که شروع آن از قسمتی در حدود شعاع تونل از جبهه‌کار است و در فاصله‌ای در حدود دو برابر قطر تونل این تاثیر محو می‌شود. پس از عبور جبهه‌کار از مقطع مورد نظر تغییر مکان‌ها زیاد می‌شود. از آنجاکه حفر تونل در محیط‌های شهری معمولاً در اعماق کم صورت می‌گیرد، تاثیر آن می‌تواند تا سطح زمین گسترش یابد و منجر به تشکیل فرورفتگی نشست (گودی نشست) در سطح زمین شود. این نشست برای سازه‌های سطحی و زیرسطحی موجود در مجاورت تونل خطرانی را به همراه دارد (لکا<sup>۱</sup>، ۲۰۰۷). خصوصاً در مواجهه با پی‌های عمیق (شمع) ممکن است منجر به وارد آمدن بارهای محوری اضافی، نشست، تغییر شکل و افت ظرفیت باربری پی‌های عمیق مجاور تونل شود. وجود درک صحیح از تاثیرات جابجایی‌های به وجود آمده در خاک به واسطه عملیات تونل‌سازی بر واکنش پی‌ها، می‌تواند موجب به حداقل رسیدن مخاطرات احتمالی شود (ران خیا<sup>۲</sup>، ۲۰۰۴). در این فصل به منظور حصول درک صحیح از رفتار پی‌های عمیق در مجاورت تونل، به مطالعه کلیاتی در خصوص جابجایی ایجاد شده در زمین در اثر تونل‌سازی، بر پی‌های عمیق یا شمع‌ها و اندرکنش خاک - شمع - تونل پرداخته شده است.

## ۲-۲- جابجایی ناشی از تونل‌سازی

رابطه بین نشست سطح و عمق تونل یک رابطه خطی و ساده نیست. در حقیقت حرکت زمین به عوامل متعددی وابسته است. برخی از مهم‌ترین این عوامل عبارت‌اند از: شرایط آب، زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی،

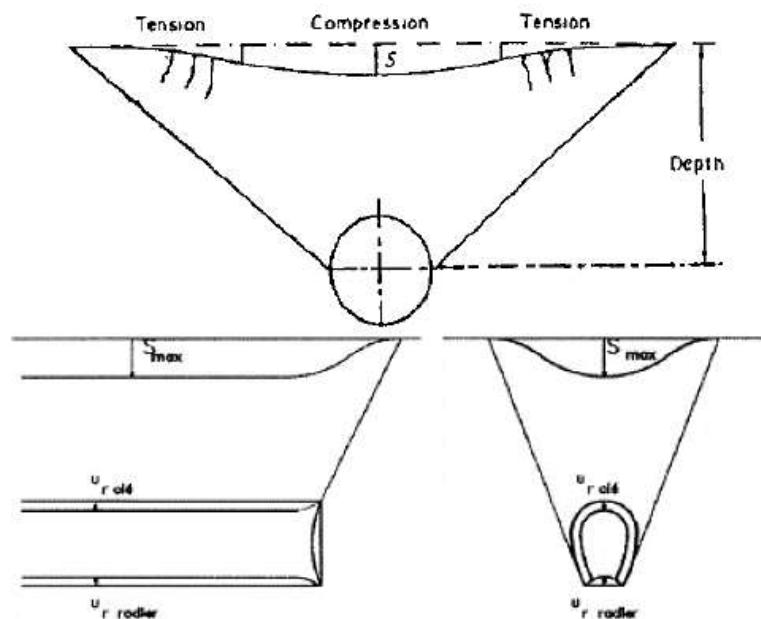
---

<sup>۱</sup> Leca

<sup>۲</sup> Ran Xia

عمق و هندسه تونل، روش احداث تونل، کیفیت محیط کار و مدیریت. با این حال روشن است تونل‌های کم‌عمق تمایل به تاثیر بیشتری روی سازه‌های سطحی، نسبت به تونل‌های عمیق دارند.

احداث یک تونل خواه یا ناخواه بر روی تنش موجود در زمین و شرایط آب و زمین‌شناسی تاثیر می‌گذارد. این تعدیل شرایط تنش طبیعی، به‌طور کلی با جابجایی مداوم جبهه کار و هم‌گرایی دیواره‌های تونل همراه می‌باشد (شکل ۱-۲). در خاک‌های نرم چسبنده، در اثر فرایند تونل‌سازی، فشار آب حفره‌ای تغییر کرده و بنا به همین دلیل سبب حرکت زمین در طولانی مدت می‌گردد (لکا، ۲۰۰۷).

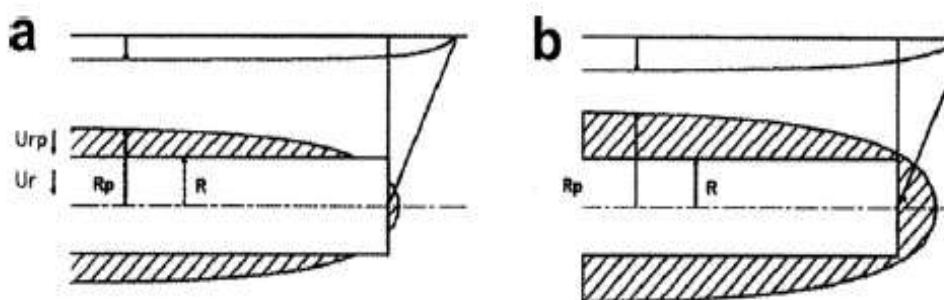


شکل (۱-۲): پروفیل جابجایی حفاری برای مقاطع اصلی تونل (لکا، ۲۰۰۷)

بزرگی، جهت و موقعیت حرکت زمین در اطراف فضای حفر شده به شرایط ژئوتکنیکی، تنش‌های ایستای موجود و بارهای صفحه‌ای، شرایط آب، زمین‌شناسی و همین‌طور روش مورد استفاده در حفر تونل و نگهداری زمین بستگی دارد. زمانی که میزان تنش‌ها از مقاومت زمین تجاوز نماید، جابجایی به وجود می‌آید. این

جابجایی‌ها ممکن است منجر به تشکیل صفحات برشی در توده زمین گردد. وجود این صفحات برشی منجر به الزام به نگهداری تونل برای محدود کردن حرکت زمین می‌شوند.

به‌طور کلی احداث یک تونل نگهداری نشده در زمین نرم، جابجایی‌های بزرگی در زمین به وجود می‌آورد که این خود باعث تشکیل زون شکست در پشت جبهه کار می‌شود. در زمین‌های سست‌تر، زون شکست ممکن است به سمت جلوی جبهه کار پیشروی کند.



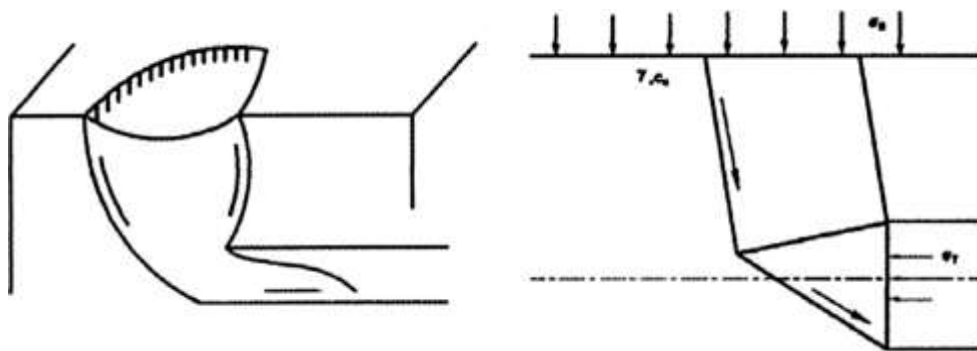
شکل (۲-۲): (a) زون تسلیم در عقب جبهه کار (b) زون تسلیم در جلوی جبهه کار (لکا، ۲۰۰۷)

## ۳-۲- پایداری جبهه کار

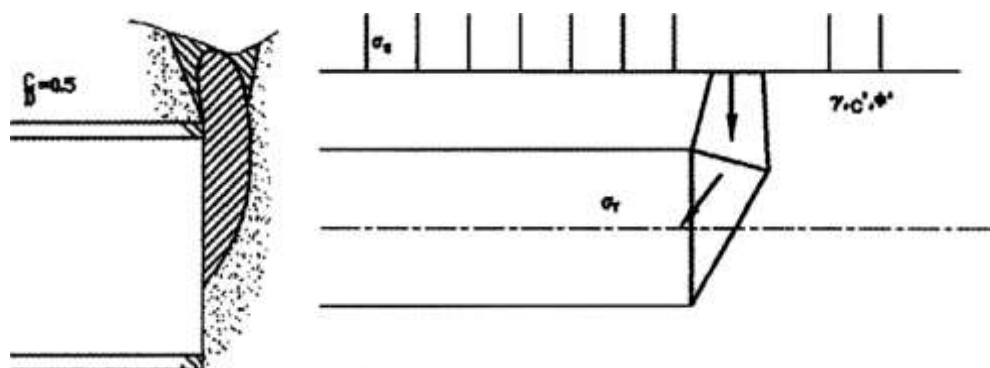
حرکت زمین در جبهه کار یکی از عوامل اصلی شکست است؛ بنابراین یک ارزیابی دقیق از ریسک شکست در جبهه کار تونل هم از نظر ایجاد یک محیط امن و هم از نظر تخمین احتمال رخداد نشست‌های بزرگ ضروری است.

بر اساس پتانسیل طبیعی زمین‌ها، دو نوع مکانیزم شکست در جبهه کار ممکن است مشاهده شود:

- در خاک‌های چسبنده، شکست جبهه کار شامل حجم بزرگی از زمین در جلوی جبهه کار است. این مکانیزم منجر به تشکیل یک گودال در سطح زمین با عرضی بزرگ‌تر از قطر تونل می‌شود (شکل ۲-۳).
- در خاک‌های غیر چسبنده، شکست تمایل دارد تا با مکانیزمی دودکش مانند در بالای جبهه کار گسترش یابد (شکل ۲-۴).



شکل (۲-۳): ریزش جبهه کار در زمین‌هایی با خاک چسبنده (لکا، ۲۰۰۷)



شکل (۲-۴): ریزش جبهه کار در زمین‌هایی با خاک غیر چسبنده (لکا، ۲۰۰۷)

## ۲-۴- گسترش جابجایی به سمت سطح

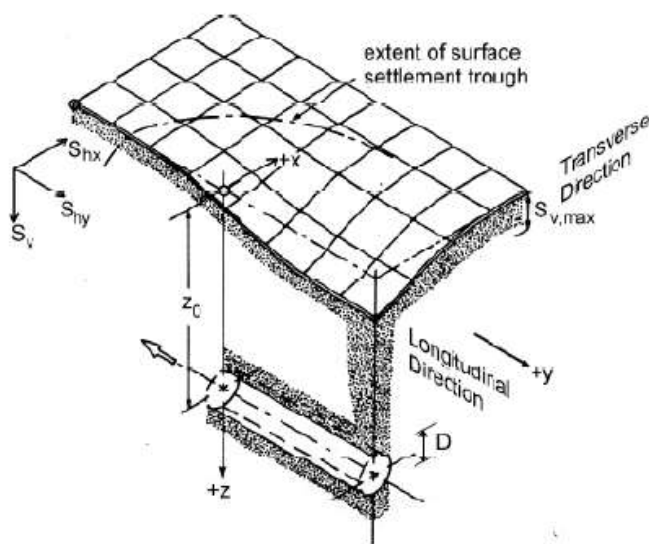
حرکت زمین از تونل آغاز شده و به سمت سطح زمین متمایل می‌گردد. محدوده و مقیاس زمانی این پدیده به‌طور عمده به شرایط ژئوتکنیکی، هندسی و نیز روش احداث مورد استفاده بستگی دارد. بر اساس نتایج حاصل از مشاهدات و اندازه‌گیری‌های محلی، دو نوع عمده از شکل گسترش جابجایی وجود دارد. این دو نوع شکل گسترش به عنوان نوع اولیه و ثانویه مشخص گردیده‌اند:

نوع اولیه در اثر آزاد شدن تنش در جبهه کار تونل رخ می‌دهد. این نوع گسترش جابجایی به‌وسیله تشکیل یک زون سست شده در بالای بخش حفاری مشخص می‌شود. ارتفاع این زون به‌طور عمده یک تا یک و نیم برابر قطر تونل است؛ و تقریباً عرضی برابر با قطر تونل دارد. دو محدوده فشار به‌طور موازی در جهت قائم

گسترش می‌یابد. برای تونل‌های عمیق‌تر که نسبت روباره به قطر تونل بیش از ۲/۵ است، تاثیرات مشاهده شده عملیات تونل‌سازی بر روی سطح زمین به‌طور کلی محدود می‌شود.

نوع ثانویه ممکن است زمانی اتفاق افتد که تونل به سطح زمین نزدیک و نگهداری ناکافی باشد. این شرایط موجب تشکیل بلوکی صلب در زمین می‌شود که مرزهای آن به‌وسیله دو یا چند صفحه برشی که از تونل تا سطح کشیده شده‌اند، مشخص می‌شود. جابجایی رخ داده در سطح زمین در بالای فضای حفر شده، دارای اندازه مشابهی با اندازه جابجایی ایجاد شده در تونل است. این مکانیزم رفتار زمین، عموماً منجر به ایجاد جابجایی‌های افقی و عمودی می‌شود؛ که با پیشروی حفاری تا سطح زمین گسترش می‌یابد. این مکانیزم منجر به ایجاد گودی نشست می‌شود.

برای اهداف علمی، گودی نشست به‌وسیله یک گودی عرضی و یک گودی طولی در امتداد پلان مرکزی تونل مشخص می‌گردد.



شکل (۵-۲): هندسه گودی نشست حاصل از تونل‌سازی (گراسو<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۰۸)

<sup>۱</sup> Grasso & etal



## ۲-۵- کلیاتی در خصوص پی عمیق

سازه و ساختمان‌هایی که بر روی محیط خاک قرار می‌گیرند، به واسطه وزن و سنگینی خود بارهای قابل توجهی را به این محیط اعمال می‌کنند. این نیروها می‌توانند فشاری یا کششی، همانند وزن سازه و یا جانبی، همانند نیروهای ناشی از باد و زلزله باشند. اگر چنین نیروهایی به‌طور مستقیم به محیط خاک وارد شوند، قادرند در خاک خرابی‌های موضعی ایجاد کنند و به دنبال چنین خرابی‌هایی، خود سازه دچار نشست و یا چرخش‌هایی خواهد گردید که به تبع آن سازه ناپایدار، ناکارآمد و یا منهدم خواهد شد. برای حل چنین مشکلی از عضو واسطی بهره گرفته می‌شود. این عضو واسط را پی و خاک زیر پی را شالوده می‌نامند. عملکرد پی در واقع درگیر کردن حجم بیشتری از خاک، جهت تحمل بار اعمالی سازه است تا به این ترتیب تنش در محیط خاک کاهش یابد. گونه‌ای از پی‌های متعارف، پی‌های عمیق هستند. پی عمیق عضوی است که نسبت عمق به عرض آن حداقل شش باشد. شمع‌ها را می‌توان از این دسته پی‌ها دانست. شمع‌ها به دو صورت منفرد و گروهی مورد استفاده قرار می‌گیرند (فاخر، ۱۳۹۲). با توجه به اینکه هدف مطالعه پیش رو بررسی رفتار شمع‌های منفرد در حضور تونل سازی می‌باشد، از بررسی شمع‌های گروهی اجتناب شده است. در این بخش به بررسی کلیاتی از شمع و روش‌های تخمین ظرفیت باربری آن پرداخته می‌شود.

### ۲-۵-۱- شمع‌های منفرد

شمع را می‌توان عضو سازه‌ای چوبی، بتنی یا فولادی دانست که برای انتقال بارهای سطحی به ترازهای پایین‌تر توده خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد. از منظر نوع انتقال بار، شمع‌ها به دو دسته اصطکاکی و مقاومت پاشنه تقسیم می‌شوند. اگر فاصله لایه باربر از سطح زمین به حدی زیاد باشد که نتوان بخشی از طول شمع را در لایه باربر قرار داد، در این صورت ظرفیت باربری شمع تنها منوط به تشکیل پوسته اصطکاکی منفی در جداره شمع است که به این شمع‌ها، شمع‌های اصطکاکی می‌گویند. اگر شمع اجرا شده فرورفتگی

مناسبی در لایه باربر داشته باشد، در این صورت بخش اعظم بار وارد بر شمع توسط پاشنه شمع تحمل می‌شود که این نوع از شمع‌ها را شمع مقاومت پاشنه می‌خوانند.

برخی از کاربردهای عمده و اساسی شمع عبارت‌اند از: انتقال بارهای متمرکز و بسیار سنگین به خاک، انتقال بار در نقاطی که خاک سطحی دارای ضعف‌های اساسی است؛ کاهش دامنه ارتعاش پی ماشین‌آلات صنعتی، احداث بنا در خاک‌های متورم شونده، متراکم کردن خاک‌های سست.

ازنقطه‌نظر اجرا، شمع‌ها را می‌توان به سه دسته عمده تقسیم‌بندی کرد:

- شمع با تغییر مکان بزرگ: این دسته شامل شمع‌های توپر و توخالی با نوک بسته است که به وسیله ضربه یا جک به داخل خاک رانده می‌شوند. با توجه به سطح مقطع بزرگی که این شمع‌ها دارند، سبب ایجاد جابجایی زیادی در لایه‌های خاک اطراف شمع می‌شوند.
- شمع با تغییر مکان کوچک: این شمع‌ها نیز به وسیله ضربه و جک به داخل زمین رانده می‌شوند اما به دلیل سطح مقطع کوچک‌تر جابجایی کمتری در خاک اطراف به وجود می‌آورند.
- شمع بدون جابجایی: شمع‌هایی هستند که ابتدا گمانه یا چاهی در زمین حفر و سپس توسط بتن پر می‌شوند. بتن ممکن است درون غلاف ریخته شود تا حداقل تغییرات در لایه‌های خاک اطراف حاصل گردد (فخاریان، ۱۳۸۴).

## ۲-۵-۲- ظرفیت باربری محوری شمع

ظرفیت باربری (مقاومت نهایی یا توان باربری یا ظرفیت باربری نهایی) محوری یک شمع، برابر مجموع مقاومت اصطکاکی (مقاومت جداری) و مقاومت نوک (مقاومت کف یا مقاومت انتهایی) آن است که در اثر اعمال اصطکاک، چسبندگی و بارمحوری از طرف خاک اطراف و کف شمع بسیج می‌شوند. بار مجاز از حاصل

تقسیم ظرفیت باربری بر ضریب اطمینان به دست می‌آید (فاخر، ۱۳۹۲). ظرفیت باربری محوری شمع به‌طور کلی تابع فرم زیر است:

$$Q_u = Q_p + Q_s = q_p A_p + f_s A_s \quad \text{رابطه (۱-۲)}$$

$$q_p = S_u N_c + \bar{q} N_q + \frac{1}{2} D_p \gamma N_\gamma \quad \text{رابطه (۲-۲)}$$

در روابط بالا پارامترهای مورد استفاده عبارت‌اند از:  $Q_u$ : ظرفیت باربری نهایی،  $Q_p$ : ظرفیت باربری پاشنه،  $Q_s$ : ظرفیت باربری جداری،  $q_p$ : مقاومت پاشنه،  $f_s$ : مقاومت جلدی،  $A_p$ : سطح مقطع پاشنه شمع،  $A_s$ : محیط شمع،  $S_u$ : مقاومت برشی زهکشی نشده خاک،  $\gamma$ : وزن مخصوص خاک،  $\bar{q}$ : تنش موثر قائم در تراز پاشنه شمع،  $D_p$ : عرض یا قطر شمع،  $N_c$ ،  $N_q$  و  $N_\gamma$  فاکتورهای بی‌بعد ظرفیت باربری شمع هستند.

یکی از ویژگی‌های پی‌های عمیق در قیاس با پی‌های سطحی، قابل ملاحظه نبودن قطر شمع نسبت به طول آن است. لذا جمله  $\frac{1}{2} D_p \gamma N_\gamma$  قابل صرف نظر کردن است. همچنین در خاک‌های فاقد چسبندگی مانند خاک دانه‌ای، جمله  $c N_c$  حذف می‌شود. اسکمپتون<sup>۱</sup> (۱۹۵۹) بیان کرد که تئوری و آزمایش‌های انجام شده در خصوص ظرفیت باربری محوری شمع نشان داده است که در شرایط کوتاه مدت و خاک فقط چسبنده و اشباع مقاومت پاشنه شمع طبق رابطه (۲-۳) به دست می‌آید (هایلو<sup>۲</sup>، ۲۰۱۲).

$$q_p = 9. S_u \quad \text{رابطه (۳-۲)}$$

ظرفیت باربری طراحی یا به عبارت دیگر ظرفیت باربری مجاز برابر است با:

$$Q_a = Q_u / FS \quad \text{رابطه (۴-۲)}$$

$Q_u$ : ظرفیت باربری نهایی،  $Q_a$ : ظرفیت باربری مجاز و  $FS$ : ضریب ایمنی

<sup>۱</sup> Skempton

<sup>۲</sup> Hailu

## ۲-۵-۳- روش‌های تحلیل ظرفیت باربری محوری شمع

در دهه‌های اخیر روش‌های مختلفی برای تعیین ظرفیت باربری محوری شمع توسط محققان مختلف ارائه شده است. به‌طور کلی روش‌های رایج در تحلیل و تعیین ظرفیت باربری محوری را می‌توان سه دسته کلی دانست که عبارت‌اند از: روش تحلیل استاتیکی، آزمایش‌های بارگذاری و مدل‌سازی عددی.

## ۲-۵-۳-۱- روش تحلیل استاتیکی برای تعیین ظرفیت باربری محوری

در روش تحلیل استاتیکی، روابط تعیین مقاومت کف و جداره شمع متفاوت از یکدیگر بوده که بسته به نوع خاک، از زاویه اصطکاک داخلی خاک و یا مقاومت برشی زهکشی نشده خاک استفاده می‌شود. در خاک‌های مختلف، روابط مختلفی توسط محققان در تعیین مقاومت کف و جداره شمع با استفاده از نظریه‌های ظرفیت باربری ارائه شده است که عموماً مقاومت کف را با ضریب توان باربری ( $N_q$ ) به تنش موثر کف شمع مرتبط می‌سازد (هایلو، ۲۰۱۲). میرهوف<sup>۱</sup> (۱۹۵۰)، تاملینسون<sup>۲</sup> (۱۹۵۷)، فوچ<sup>۳</sup> (۱۹۷۲)، برولند<sup>۴</sup> (۱۹۷۳)، جانبو<sup>۵</sup> (۱۹۷۶)، کارلسرود<sup>۶</sup> (۱۹۹۲)، از جمله افرادی هستند که اقدام به ارائه روابطی برای تعیین ظرفیت باربری محوری شمع در زمین‌های رسی و ماسه‌ای کردند (فخاریان، ۱۳۸۴). همین‌طور انستیتو نفت آمریکا<sup>۷</sup> (۱۹۹۳) و وزارت راه و ترابری نروژ<sup>۸</sup> (۲۰۰۵)، هر یک روابطی برای تعیین ظرفیت باربری محوری شمع در زمین‌های رسی، ارائه کردند (هایلو، ۲۰۱۲). جدول (۱-۲) برخی از متداول‌ترین روابط ارائه شده به منظور تعیین ظرفیت باربری محوری شمع به روش تحلیل استاتیکی را نشان می‌دهد.

---

<sup>۱</sup> Meyerhof

<sup>۲</sup> Tomlinson

<sup>۳</sup> Focht

<sup>۴</sup> Broland

<sup>۵</sup> Janbu

<sup>۶</sup> Karlsrud

<sup>۷</sup> American Petroleum Institute

<sup>۸</sup> Ministry of transport and communication of Norway

جدول (۱-۲): متداول ترین روابط ارائه شده برای تعیین ظرفیت باربری محوری با روش تحلیل استاتیکی (فخاریان، ۱۳۸۴) و (هایلو، ۲۰۱۲).

نوع خاک	نام روش	نام ارائه دهنده	مقاومت جداره	مقاومت پاشنه
ماسه	میرهوف	میرهوف (۱۹۵۰)	---	$Q_p = A_p(cN_c + \bar{q}N_q)$ $1 < N_q < 40$ $1 < N_c < 40$
رس	آلفا	تاملینسون (۱۹۵۷)	$Q_s = f_s A_s,$ $f_s = \alpha c + P_0' K \tan \theta$ $f_s = \alpha S_u, \quad 0 < \alpha < 1$	$Q_p = A_p q_p$ $q_p = 9. S_u$
رس	لاندا	فوج (۱۹۷۲)	$f_s = \lambda(P_0' + 2S_u)$ $0 < \lambda < 0.5$	$Q_p = A_p q_p$ $q_p = 9. S_u$
رس	بتا	بورلند (۱۹۷۳)	$Q_s = f_s A_s, \quad f_s = \beta \bar{q}$ $\beta = (1 - \sin \varphi) \sqrt{OCR} \tan \varphi$	$Q_p = A_p q_p$ $q_p = 9. S_u$
ماسه	جانبو	جانبو (۱۹۷۶)	---	$Q_p = (cN_c + \bar{q}N_q)A_p$ $N_q =$ $(\tan \varphi$ $+ \sqrt{1 + (\tan \varphi)^2})^2 \cdot e^{2\eta \tan \varphi}$ $N_c = (N_q - 1) \cot \varphi$ $\eta < 105$
رس	API PR2A LRFD	انستیتو نفت آمریکا (۱۹۹۱)	$Q_s = f_s A_s, \quad f_s = \alpha S_u$ $\begin{cases} \alpha = 0.5 \omega^{-0.5} \\ \omega \leq 1.0 \\ \alpha = 0.5 \omega^{-0.25} \\ \omega > 0 \end{cases}$	$Q_p = A_p q_p$ $q_p = 9. S_u$
رس	NGI/API	کارلسرود (۱۹۹۲)	$Q_s = f_s A_s, \quad f_s = \alpha S_u$ $\begin{cases} \alpha = 0.5 \left(\frac{S_u}{\sigma_{v0}}\right)^{-0.5} \\ \text{for } \left(\frac{S_u}{\sigma_{v0}}\right) < 0.7 \\ \alpha = 0.56 \left(\frac{S_u}{\sigma_{v0}}\right)^{-0.2} \\ \text{for } \left(\frac{S_u}{\sigma_{v0}}\right) > 0.7 \end{cases}$	$Q_p = A_p q_p$ $q_p = 9. S_u$
رس	آیین نامه نروژی	وزارت راه نروژ (۲۰۰۵)	$Q_s = f_s A_s, \quad f_s \alpha S_u$ $f_s = \beta P_0' \quad 0.2 < \alpha < 1.2$ $\beta =$ $(0.4 \pm 0.1) * \frac{L_p + 20}{2L_p + 20} OCR^{0.5}$	$Q_p = A_p q_p$ $q_p = 9. S_u$

برخی از پارامترهای حاضر در جدول (۱-۲) به شرح زیر است:

$\omega$ : نسبت چسبندگی به تنش موثر، OCR: نرخ پیش تحکیمی،  $L_p$ : طول شمع،  $\sigma_{v0}$ : تنش موثر متوسط،  $P_0'$ : تنش موثر قائم،  $\theta$ : زاویه اصطکاک موثر بین شمع و خاک،  $\varphi$ : زاویه اصطکاک داخلی خاک،  $K$ : ضریب فشار جانبی زمین و  $\lambda$ ،  $\alpha$  و  $\eta$ : ضرایب مربوط به هر روش.

## ۲-۳-۵-۲- آزمایش‌های بارگذاری

آزمایش بارگذاری به عنوان یک روش قابل اعتماد می‌تواند در مرحله طراحی و قبل از اجرای شمع‌های اصلی به عنوان شمع آزمایشی و یا در حین عملیات اجرا و بر روی شمع‌های اصلی برای اطمینان از پیش‌بینی‌های انجام شده در مرحله طراحی و همچنین کنترل کیفیت اجرا با هدف به حداقل رساندن ریسک به وجود آمده ناشی از شرایط ناشناخته زمین، بهینه کردن پارامترهای طراحی شمع و بررسی عملکرد شمع در مقدار بار مورد نیاز، انجام پذیرد.

به‌طور کلی در آزمایش بارگذاری تا حد مورد نیاز با روش‌های مختلف (جک هیدرولیکی یا اجسام)، شمع تحت بارگذاری عمودی قرار می‌گیرد و توسط ابزارهایی مانند بارسنج و کرنش‌سنج، نشست شمع اندازه‌گیری می‌شود. در نهایت نتیجه آزمایش به‌صورت نمودار تنش - نشست یا بار - نشست منتشر می‌گردد (فخاریان، ۱۳۸۴). از جمله متداول‌ترین آزمایش‌های تعیین ظرفیت باربری محوری شمع عبارت‌اند از:

- آزمایش بارگذاری پیوسته<sup>۱</sup>: در آزمایش بارگذاری پیوسته، بار وارد بر شمع به‌صورت گسسته نمودار می‌کند و مقادیر نشست ناشی از بار ثبت می‌شود. افزایش بار در مرحله بعدی تنها زمانی اعمال می‌شود که دوره ۲۴ ساعته یا ۴۸ ساعته از اعمال بار قبلی گذشته باشد.

---

<sup>۱</sup> Maintained Load Test (MLT)

- آزمایش نرخ ثابت نفوذ<sup>۱</sup>: در این آزمایش بارهای اعمالی آن قدر باقی می‌مانند تا به ازای هر مرحله بار، نشست‌های یکسانی حاصل شود. نمو نشست برای هر مرحله بار در حدود یک درصد قطر راس شمع در نظر گرفته می‌شود.

- آزمایش بار سنج دو سر هدایت شونده<sup>۲</sup>: این روش در اصل از مشتقات روش آزمایش بارگذاری پیوسته است که در آن از یک بار سنج قرار داده شده در شالوده فلزی شمع، استفاده می‌شود. از این آزمایش تنها در شمع‌های برجایی که باربری محوری بالایی دارند استفاده می‌شود.

- آزمایش بارگذاری ناگهانی<sup>۳</sup>: در این روش از نوعی محفظه احتراق در بالای شمع استفاده می‌گردد تا بار ناگهانی بر شمع اعمال گردد (Federation of Piling Specialists, 2006).

عمده تحقیقات انجام شده با روش آزمایش‌های بارگذاری، در زمینه یافتن روابط تجربی برای تعیین ظرفیت باربری محوری شمع از روی منحنی بار-نشست یا تنش - نشست می‌باشد.

## ۲-۵-۳- روش مدل‌سازی عددی

یکی از بهترین روش‌ها برای تحقیق در مورد رفتار شمع‌ها، آزمایش بارگذاری شمع است که علی‌رغم اینکه یکی از قابل اعتمادترین روش‌هاست، محدودیت‌هایی نیز دارد. از جمله اینکه این آزمایش بسیار پرهزینه است و زمان زیادی برای دستیابی به نتایج واقعی آن نیاز است. از طرفی فرضیات و ساده‌سازی‌های بکار رفته در روش‌های تحلیل استاتیکی سبب ترویج روش مدل‌سازی عددی به‌منظور تعیین ظرفیت باربری محوری شمع شده است. این روش هرگز جایگزینی برای روش آزمایش بارگذاری شمع نیست بلکه تنها با هدف به حداقل رساندن آزمایش بارگذاری از آن استفاده می‌شود. نتایج حاصل از

---

<sup>۱</sup> Constant Rate of Penetration (CRP)

<sup>۲</sup> Bi-directional Load Cell

<sup>۳</sup> Rapid Load Test

روش‌های عددی نیز مانند روش آزمایش‌های بارگذاری، به صورت نمودارهای بار- تنشست یا تنش - نشست نشان داده می‌شود.

عمده تحقیقات انجام شده در مقوله باربری محوری شمع، مربوط به روش تحلیل استاتیکی و یافتن روابط تجربی جهت تعیین ظرفیت باربری محوری شمع از روی منحنی بار- نشست است و تحقیقات محدودتری در حوزه تعیین ظرفیت باربری محوری به کمک روش عددی صورت پذیرفته. در این قسمت به شرح مختصری از تاریخچه و سوابق روش‌های تجربی و سپس روش‌های عددی پرداخته می‌شود.

ترزاقی<sup>۱</sup> در سال ۱۹۴۲ روش خود را تحت عنوان روش پیشنهاد استاندارد مطرح نمود. طبق این روش ظرفیت باربری شمع، معادل باری است که نشست برابر با ده درصد از قطر شمع را در نوک شمع پدید آورد. این روش بسیار ساده بوده و معمولاً مقداری کمتری برای ظرفیت باربری محوری شمع نسبت به سایر روش‌های تفسیر منحنی بار- نشست پیشنهاد می‌دهد. البته ترزاقی پیشنهاد می‌دهد که نشست شمع به اندازه یک و نیم اینچ محدود شود. این روش اثرات کوتاه شدگی الاستیک شمع را که در شمع‌های بلند محسوس‌تر است در نظر نمی‌گیرد (فلنیوس، ۲۰۱۵).

هنسن<sup>۲</sup> در سال ۱۹۶۳ پس از مطالعه موارد آزمایشگاهی و نمونه آزمایش‌های بارگذاری شمع، روشی برای تعیین ظرفیت باربری محوری شمع به شرح زیر ارائه کرد. طبق این روش اگر در منحنی بار- نشست بتوان دو نقطه مجزا یافت که بار یک نقطه، معادل هشتاد درصد بار متناظر نقطه دیگر بوده و از سوی دیگر تغییر مکان متناظر با بار بزرگ‌تر، چهار برابر تغییر مکان ایجاد شده توسط بار کوچک‌تر باشد، بار بزرگ‌تر ظرفیت باربری محوری شمع خواهد بود (فلنیوس، ۲۰۱۵).

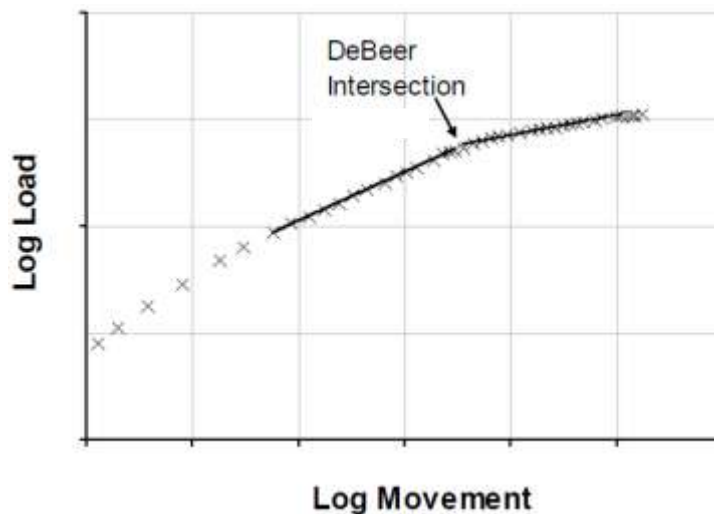
---

<sup>۱</sup> Terzaghi

<sup>۲</sup> Hansen



دبیر<sup>۱</sup> در سال ۱۹۶۸ بر اساس استفاده از نتایج حاصل از ترسیم لگاریتمی برای داده‌های بار-نشست دریافت که اگر داده‌های بار-نشست رفتار متمایزی قبل و بعد از حالت تسلیم داشته و نیز نقاطی وجود داشته باشند که منجر به روند خطی شوند، دو خط راست به وجود خواهد آمد که نقطه تقاطع آن‌ها توسط دبیر، بار حدی یا تسلیم نامیده می‌شود. شکل (۶-۲) مثالی از روش دبیر را نشان می‌دهد (فلنیوس<sup>۲</sup>، ۲۰۱۵).



شکل (۶-۲): مثالی از تخمین بار نهایی شمع به روش دبیر (فلنیوس، ۲۰۱۵)

چین و کوندنر<sup>۳</sup> در سال ۱۹۷۱ با همکاری یکدیگر روش خود برای تخمین ظرفیت باربری محوری را ارائه کردند که در آن، نسبت جابجایی سر شمع به بار مربوطه در محور قائم و مقدار جابجایی نظیر در محور افقی رسم می‌شوند. پس از تغییراتی در نقاط اولیه، نقاط به دست آمده امتداد یک خط راست را مشخص می‌سازند. بار حدی اعمال شده در آزمایش بارگذاری با رابطه ساده زیر به دست می‌آید (فلنیوس، ۲۰۱۵):

$$Q_u = \frac{1}{T_1} \quad \text{رابطه (۵-۲)}$$

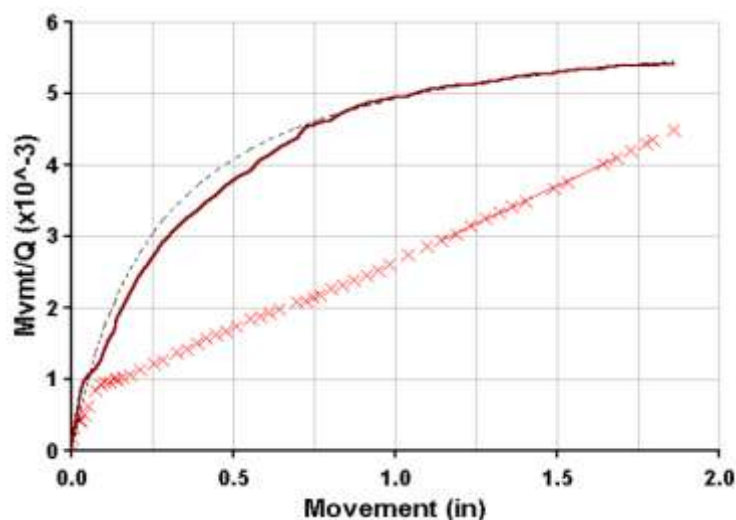
در رابطه (۵-۲)،  $Q_u$ : بار تسلیم و  $T_1$  شیب خط مستقیم به دست آمده از دیاگرام پیشنهادی است.

<sup>۱</sup> DeBeer

<sup>۲</sup> Fellenius

<sup>۳</sup> Chin&Kondner

بار تسلیم روش برون‌یابی چین-کوندنر به طریقی به مجانب شدن حاصل می‌شود. بنابراین مقدار حاصله همیشه یک برون‌یابی است. با توجه به اینکه نتایج به‌دست آمده از آزمایش را نباید به‌گونه‌ای تفسیر کرد که بار حدی، بزرگ‌تر از بار اعمال شده بر آزمایش به دست آید. به همین دلیل بار مجاز در نظر گرفته شده برای شمع نمی‌تواند و نباید بر اساس تقسیم بار حدی به‌دست آمده از روش برون‌یابی چین - کوندنر بر ضریب اطمینان تقسیم گردد. به عنوان یک قاعده تقریبی می‌توان ذکر کرد که بار حدی به‌دست آمده از روش برون‌یابی چین - کوندنر تقریباً ۲۰٪ تا ۴۰٪ بزرگ‌تر از مقدار تعیین شده توسط روش دیویسون است که در ادامه شرح داده شده است. روش برون‌یابی چین - کوندنر قابل استفاده برای بارگذاری‌های سریع و آهسته با دوره‌های زمانی ثابت است (فلنیوس، ۲۰۱۵).



شکل (۷-۲): مثالی از تخمین بار نهایی شمع به روش برون‌یابی چین - کوندنر (فلنیوس، ۲۰۱۵)

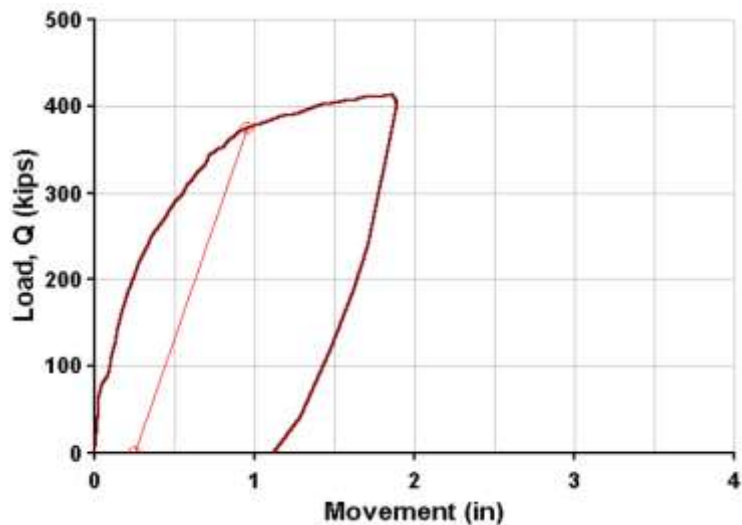
دیویسون<sup>۱</sup> در سال ۱۹۷۲ روشی را جهت یافتن بار خرابی پیشنهاد کرد که بر اساس اطلاعات منحنی بار-نشست آزمایش بارگذاری انجام شده روی یک شمع بتنی پیش ساخته ۱۲ اینچی بود. این روش سعی در لحاظ کردن کوتاه شدگی الاستیک شمع تحت اثر بار محوری دارد. طبق روش حدی دیویسون بار حدی به

<sup>۱</sup> Davisson

باری اطلاق می‌شود که جابجایی کل نظیر آن بار به میزان یک مقدار اضافی، بیش از فشردگی الاستیکی شمع است (فلنیوس، ۲۰۱۵). این مقدار طبق رابطه (۶-۲) محاسبه می‌شود:

$$\text{Offset} = 4 + \frac{D_p}{120} \quad \text{رابطه (۶-۲)}$$

که در این رابطه (۶-۲)،  $D_p$  برابر با قطر شمع بر حسب میلی‌متر است.



شکل (۸-۲): مثالی از تخمین بار نهایی شمع به روش حدی دیویسون (فلنیوس، ۲۰۱۵)

نتایج تمامی تحقیقات ارائه شده در خصوص تعیین ظرفیت باربری محوری شمع، بر منحنی بار-نشست حاصله از آزمایش‌های بارگذاری استوار است. در روش‌های عددی که در ادامه به بررسی مواردی از مطالعات انجام شده با این روش پرداخته می‌شود، سعی بر آن است که اطلاعات لازم جهت تفسیر منحنی بار-نشست با استفاده از روش‌های مناسب مدل‌سازی، ایجاد شود.

پیتروفسکی<sup>۱</sup> (۲۰۱۵) به بررسی و مقایسه نتایج ظرفیت باربری محوری حاصل از آزمایش بارگذاری پیوسته شمع بتنی به طول ۱۲ متر در زمین ماسه‌ای با نتایج حاصل از روش مدل‌سازی عددی پرداخت. برای این منظور با استفاده از روش المان محدود و نرم‌افزار آباکوس ظرفیت باربری محوری شمع را مورد

<sup>۱</sup> Piotrowski

بررسی قرار داد. وی از مدل رفتاری الاستیک برای شمع و مدل رفتاری موهر-کلمب برای خاک استفاده کرد. نتایج نشان دهنده تطابق بسیار مناسب دو روش آزمایش بارگذاری و مدل سازی عددی است (پیتروفسکی، ۲۰۱۵).

منجقچی (۱۳۸۸) ظرفیت باربری شمع ها را با استفاده از مدل سازی عددی و آزمایش بارگذاری شمع مورد بررسی قرار داد. وی سعی کرد تا با استفاده از روشی سیستماتیک، طراحی مناسبی برای نحوه تغییر تمامی پارامترهای تاثیر گذار بر مدل عددی ارائه کند. در این بررسی پنج فاکتور عمده موثر در تحلیل نتایج عددی آزمایش بارگذاری شمع در نظر گرفته شد که از بین آن ها چسبندگی خاک، زاویه اصطکاک و پارامتر مقاومتی فصل مشترک از بیشترین اهمیت نسبی و همچنین نسبت پواسون و زاویه اتساع دارای کمترین تاثیر هستند (منجقچی، ۱۳۸۸).

## ۲-۵-۴ - ظرفیت باربری جانبی شمع

اگرچه باربری پی های عمیقی همچون شمع، در اکثر موارد برای تحمل بارهای قائم در نظر گرفته شده است، اما بارهای جانبی همانند زلزله و ... شمع را تحت الشعاع قرار می دهد. به طور کلی می توان شمع ها را در مواجهه با نیروی جانبی، به دو گروه شمع های صلب یا کوتاه و انعطاف پذیر یا بلند تقسیم بندی نمود. تخمین ظرفیت باربری شمع تحت اثر بار جانبی برای شمع های صلب بر اساس حداکثر ظرفیت باربری و برای شمع های انعطاف پذیر بر اساس تغییر مکان افقی مجاز می باشد (علمی، ۱۳۷۷).

## ۲-۵-۴-۱- معیار کوتاه و بلند بودن شمع

برومز<sup>۱</sup> (۱۹۶۴) با تعریف ضریب سختی شمع طبق رابطه (۷-۲) و مقایسه این ضریب با طول شمع، حد کوتاه و بلند بودن شمع را معرفی کرد. اگر نسبت سختی شمع به طول شمع کوچکتر مساوی ۲ باشد ( $\frac{R}{L_p} \leq 2$ )، شمع را کوتاه و صلب می‌نامیم و در غیر این صورت شمع بلند و انعطاف‌پذیر است (جودی<sup>۲</sup> و موئید<sup>۳</sup>، ۲۰۰۸).

$$R = \sqrt[4]{\left(\frac{E_p I_p}{K_H}\right)} \quad \text{رابطه (۷-۲)}$$

در رابطه (۷-۲)،  $R$ : ضریب سختی شمع،  $E_p$ : مدول الاستیک شمع،  $I_p$ : گشتاور ماند مقطع شمع و  $K_H$ : مدول عکس‌العمل افقی بستر است.

مقدار مدول عکس‌العمل افقی خاک طبق پژوهش و سیک<sup>۴</sup> (۱۹۶۱) طبق رابطه (۸-۲) قابل محاسبه است (علمی، ۱۳۷۷):

$$K_H = \frac{0.65 E_s}{(1-\nu_s^2)} \left[ \frac{E_s D_p^4}{E_p I_p} \right]^{1/12} \quad \text{رابطه (۸-۲)}$$

که در رابطه (۸-۲)،  $\nu_s$ : ضریب پواسون خاک،  $E_s$ : مدول الاستیک خاک می‌باشد.

بنا بر گزارشات آزمایشگاهی، مقدار عددی رابطه  $\left[ \frac{E_s D_p^4}{E_p I_p} \right]^{1/12}$  0.65 در بیشتر موارد تقریباً برابر با ۱ است. لذا

برای محاسبه مدول عکس‌العمل افقی بستر شمع رابطه (۹-۲) پیشنهاد شده است (علمی، ۱۳۷۷):

$$K_H = \frac{E_s}{(1-\nu_s^2)} \quad \text{رابطه (۹-۲)}$$

<sup>۱</sup> Broms

<sup>۲</sup> Judi

<sup>۳</sup> Moayed

<sup>۴</sup> Vesic

## ۲-۵-۴-۲ - محاسبه ظرفیت باربری جانبی شمع‌های کوتاه

تخمین ظرفیت باربری شمع تحت اثر بار جانبی برای شمع‌های کوتاه، با در نظر گرفتن حالت الاستیک برای شمع، بر اساس حداکثر ظرفیت باربری انجام می‌گیرد. در این روش، شمع تحت نیروی جانبی  $F$  و لنگر  $M$  در نظر گرفته می‌شود و فشار نهایی خاک در عمق  $z$ ، برابر با  $P_u$  است. ترکیب حدی  $F$  و  $H$  عامل شکست می‌باشد. در این روش تعادل نیروهای افقی و لنگرها در نظر گرفته می‌شود و از حل هم‌زمان معادلات به دست آمده در عمق دوران  $Z_r$  بار نهایی افقی مجهول،  $F_u$  به دست می‌آید. لنگر نهایی  $M_u = F_u \cdot e$  است که  $e$  خروج از مرکز بارگذاری است.

$$F_u = \left( \int_0^{Z_r} P_u d dz - \int_{Z_r}^L P_u d dz \right) \quad \text{رابطه (۲-۱۰)}$$

روش‌های برینچ هانسن<sup>۱</sup> و برامز را می‌توان از مهم‌ترین روش‌های تخمین ظرفیت باربری جانبی شمع به صورت استاتیکی نام برد. در روش برینچ هانسن (۱۹۶۱) با استفاده از سعی و خطا مرکز دوران را تعیین و سپس به کمک تعادل افقی، مقاومت جانبی را محاسبه می‌کند. روش برامز (۱۹۶۴) نیز اساساً مانند روش برینچ هانسن است. تنها تفاوت آن را می‌توان در ساده‌سازی‌های صورت پذیرفته در توزیع مقاومت نهایی خاک در طول شمع و نیز توجه کامل به گیرداری یا آزاد بودن نوک شمع دانست (جودی و موئید، ۲۰۰۸).

## ۲-۵-۴-۳ - ظرفیت باربری شمع‌های بلند

ظرفیت باربری جانبی شمع‌های بلند برخلاف شمع‌های کوتاه با بررسی جابجایی نوک شمع تعیین می‌شود. برآورد حرکت جانبی شمع‌های بلند قالباً به دو روش تقسیم می‌شوند (علمی، ۱۳۷۷):

---

<sup>۱</sup> Brinch Hansen

- روش اول که قدیمی‌ترین و ساده‌ترین روش نیز محسوب می‌گردد توسط وینکلر<sup>۱</sup> (۱۸۶۷) تحت عنوان روش عکس‌العمل بستر معرفی شد. در این روش خاک به صورت فنرهای ارتجاعی خطی مجزا در نظر گرفته می‌شود؛ به طوری که تغییر مکان فقط در بخش‌هایی که بارگذاری وجود دارد رخ می‌دهد. عیب آشکار این روش، فقدان پیوستگی خاک است.
- روش دوم استفاده از تحلیل غیرخطی یا منحنی‌های P-y است. در این روش یک سری فنر غیرخطی جایگزین فنرهای خطی شده و راه‌حل، منتج به نمودارهایی تحت عنوان بار-جابجایی افقی در نقاط مختلف شمع می‌گردد.

به منظور به دست آوردن منحنی‌های P-y از هر سه روش تحلیلی، عددی و بارگذاری جانبی شمع می‌توان استفاده کرد. به عنوان نمونه می‌توان به دودز و مارتین<sup>۲</sup> (۲۰۰۷) اشاره کرد. در این مطالعه، به بررسی ظرفیت باربری گروه شمع تحت بار جانبی و مقایسه منحنی‌های P-y حاصل از مدل‌سازی به روش تفاضل محدود و با استفاده از نرم‌افزار  $FLAC^{3D}$ ، با نتایج حاصل از آزمایش بارگذاری جانبی در خاک‌های چسبنده پرداخته است. شرایط خاک، هندسه شمع، تنش‌های زمین و فاصله شمع‌ها از یکدیگر پارامترهای مورد بحث این مطالعه است. بررسی نشان می‌دهد نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی از تطابق بالایی با روش آزمایش بارگذاری دارد. علاوه بر این هندسه شمع و شرایط خاک بستر بیش‌ترین تاثیر بر ظرفیت باربری شمع را دارند. افزایش قطر و طول شمع، همین‌طور مقاومت خاک اطراف، منجر به افزایش ظرفیت باربری جانبی شمع می‌شود (دودز و مارتین، ۲۰۰۷). ضمن اینکه مطالعات سلینی و گیریش<sup>۳</sup> (۲۰۰۸) در خاک‌های غیر چسبنده نیز نتایج کار دودز و مارتین (۲۰۰۷) را تأیید می‌کند (سلینی و گیریش، ۲۰۰۸).

---

<sup>۱</sup> Winkler

<sup>۲</sup> Dodds & Martin

<sup>۳</sup> Salini & Girish

## ۲-۶- اندرکنش شمع-تونل

یکی از پیچیده‌ترین بارهای ایجاد شده به واسطه جابجایی خاک، ناشی از عملیات حفر تونل می‌باشد. عملیات تونل سازی به روش مکانیزه به واسطه مراحل مختلف این روش نظیر کاربرد فشار سینه کار، نیروهای ترک و تراست، عملیات سگمنت گذاری و تزریق در فضای خالی پشت سگمنت، باعث پیچیدگی‌های زیادی خصوصاً در چگونگی توزیع تنش برشی در خاک محدود اطراف تونل (در طول پیشروی سپر ماشین حفار)، بارگذاری (در اثر وارد آمدن فشار سینه کار و تزریق به جبهه کار و دیواره‌های تونل) و مکانیزم باربرداری از خاک (آزادسازی تنش در خاک در اثر حفر) می‌شود. حفر تونل در نزدیکی شمع‌ها می‌تواند منجر به تغییر واکنش شمع گردد. اولین تحقیقات در مورد اندرکنش شمع و تونل در سال ۱۹۷۹ توسط مورتون و کینگ<sup>۱</sup> انجام شد. اندرکنش شمع و تونل به‌طور کلی با استفاده از چهار روش مطالعات تحلیلی، میدانی، آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی قرار گرفته است. این مطالعات مواردی از قبیل تعیین محدوده تاثیر تونل بر شمع‌های مجاور و نیز بررسی رفتار شمع شامل تغییر شکل‌پذیری، تغییرات در بارمحوری و مقاومت جداری، گشتاور ایجاد شده در شمع و افت ظرفیت باربری شمع را در بر می‌گیرد.

چن<sup>۲</sup> و همکارانش (۱۹۹۹) پاسخ‌های محوری و جانبی شمع پس از عبور تونل را به‌طور تحلیلی و با استفاده از یک روش دو مرحله‌ای مورد بررسی قرار دادند. در اولین گام، با استفاده از روش‌های تحلیلی به بررسی حرکات زمین در منطقه‌ای به‌دور از تونل حفر شده پرداختند. در گام دوم با تحمیل جابجایی‌های آنالیز شده در مرحله اول بر شمع، به کمک روش المان مرزی و نرم‌افزار پالاس<sup>۳</sup>، مقادیر گشتاور خمشی و نیروهای فشاری و کششی تحمیل شده بر شمع را به دست آوردند. نتایج حاصل از این بررسی نشان داد

---

<sup>۱</sup> Morton & King

<sup>۲</sup> Chen & etal

<sup>۳</sup> PALLAS



هندسۀ تونل، نرخ نشست زمین، سختی و مقاومت خاک، قطر شمع و نسبت طول تونل به مقادیر پوشان سنگ عمده‌ترین عوامل موثر بر چگونگی بارپذیری شمع در حضور تونل است (چن و همکاران، ۱۹۹۹).

تمرکز محققانی همچون مورتون و کینگ (۱۹۷۹)، سلمتاس و استندینگ (۲۰۰۵)، کالبرگ<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۰۵)، جاکوبز و همکاران (۲۰۰۲) و لی و باست (۲۰۰۷) در مورد تاثیر حفاری تونل بر رفتار شمع مجاور محدوده حفاری، بر مفهوم محدوده تاثیر قرار گرفته است. در اکثر مطالعات، این محدوده توسط خطی که با محور تونل نسبت به راستای افق زاویه  $\varphi = 45 - 0.5\beta$  را تشکیل می‌دهد، نمایش داده شده است. این خط از مرز دیواره تونل شروع شده و تا سطح زمین ادامه یافته است. در این رابطه  $\varphi$  زاویه اصطکاک داخلی خاک است. در ادامه به بررسی مختصری از برخی مطالعات انجام شده پیرامون اندرکنش شمع و تونل پرداخته شده است.

یکی از اولین گزارش‌های موجود در خصوص بررسی اندرکنش شمع و تونل و محدوده تاثیر تونل متعلق به مورتون و کینگ (۱۹۷۹) است. در تحقیق آن‌ها که به روش مدل‌سازی فیزیکی انجام شد، از شمع‌های چوبی و آلومینیومی روی سقف تونل به جای شمع‌های اصطکاکی و مقاومت پاشنه استفاده شده است. مورتون و کینگ به این نتیجه رسیدند که هر چه پاشنه شمع در محدوده نزدیک‌تری نسبت به تونل قرار داشته باشد، نشست شمع‌های اصطکاکی و شمع‌های مقاومت پاشنه به یک اندازه بزرگ خواهد بود. علاوه بر این، عامل اصلی شکست شمع را اتساع خاک در محدوده‌ای تقریبی بالای تاج تونل قلمداد کردند (خیا، ۲۰۰۴).

تمرکز مطالعه جاکوبز و همکاران (۲۰۰۲) بر توزیع نشست و بار بر شمع‌های کوبشی در خاک همگن ماسه‌ای است. وی با استفاده از آزمایش سانتریفیوژ و شمع‌هایی با طول یکسان که در فواصل جانبی ۰، ۱، ۲ و ۳ برابر قطر تونل قرار گرفته‌اند، محدوده تاثیر تونل بر شمع‌های مجاور را تعریف کرد که در شکل (۲-۹)

---

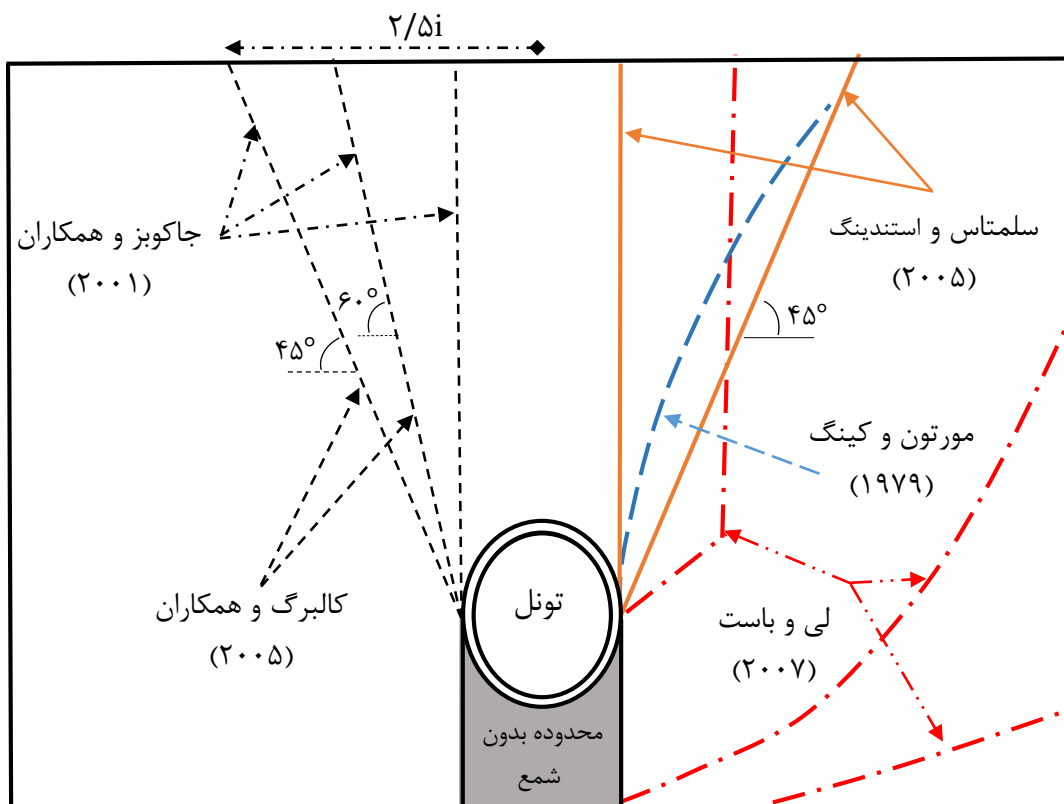
<sup>۱</sup> Kaalberg & etal

قابل مشاهده است. وی تاکید کرد شمع‌هایی که روی تاج تونل قرار گرفته‌اند دچار نشست بیش از نشست زمین می‌شوند. در این آزمایش تمامی شمع‌ها طولی کمتر از عمق قرارگیری تاج تونل دارند. جاکوبز و همکاران گسترش محدوده تاثیر تونل بر شمع را تا سطح زمین و فاصله عرضی  $\pm 2/5i$  از محور تونل (که  $i$  فاصله بین محور تونل تا نقطه انحنای نمودار نشست سطح زمین می‌باشد) و همین‌طور خط تاثیر بحرانی (خطی با زاویه  $60^\circ$  درجه نسبت به افق) و همین‌طور خط نرمال (خطی با زاویه  $45^\circ$  نسبت به افق) را معرفی کردند. بررسی وی نشان می‌دهد بارمحوری شمع در بخش پاشنه در محدوده بالای تونل با گذر تونل تا  $60\%$  افت را متحمل می‌شود (جاکوبز و همکاران، ۲۰۰۲).

سلمتاس و استندینگ (۲۰۰۵) و کالبرگ و همکاران (۲۰۰۵) هر دو از مطالعات میدانی به‌منظور تعیین محدوده تاثیر تونل روی شمع‌های مجاور استفاده کردند. سلمتاس و استندینگ (۲۰۰۵) از تحقیق و بررسی روی دو شمع مقاومت پاشنه و دو شمع اصطکاکی در مجاورت تونل اوکراین و کالبرگ و همکاران (۲۰۰۵) با بررسی ۴۳ شمع چوبی و ۲۰ شمع بتنی واقع در مسیر تونل شمال به جنوب آمستردام، محدوده تاثیر خود با سه زون مطابق شکل (۲-۹)، ارائه دادند. در زون اول که در آن شمع بلافاصله روی تونل قرار می‌گیرد و تا عرض نیم برابر قطر از محور تونل ادامه دارد نشست شمع بیش از نشست خاک است و در محدوده میانی، نشست شمع و خاک تقریباً یکسان و در آخرین محدوده، نشست شمع اندکی کمتر از نشست خاک است (سلمتاس و استندینگ، ۲۰۰۵) و (کالبرگ و همکاران، ۲۰۰۵).

لی و باست (۲۰۰۷) به‌صورت دوبعدی و با استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی و آنالیز عددی به روش اجزای محدود و با هدف بررسی اندرکنش شمع - خاک - تونل و نشست نوک شمع طی عملیات حفاری، یک ردیف شمع بارگذاری شده در مجاورت تونل را مورد بررسی قرار دادند. لی و باست به‌طور کلی ۲۱ آزمون آزمایشگاهی انجام دادند که در هر بار آزمایش با در نظر گرفتن  $18/6\%$  درصد به عنوان افت زمین، مقدار نشست شمع و

زمین مورد بررسی قرار گرفت. در مرحله بعدی نتایج حاصل از آزمایش با نتایج مدل سازی عددی نرم افزار کریسپ<sup>۱</sup>، مقایسه گردید. مقادیر نشست و جابجایی جانبی شمع در هر دو روش تطابق مناسبی را نشان می دهند. به علاوه بیان داشتند که نیروی محوری شمع وابستگی شدیدی به محل قرارگیری تونل دارد. محدوده تاثیر ارائه شده توسط لی و باست نسبت به محدوده ارائه شده توسط سایر محققان، محدوده ای عریض تر و عمیق تر است (لی و باست، ۲۰۰۷).



شکل (۲-۹): محدوده تاثیر عبور تونل بر شمع های مجاور از دیدگاه محققان مختلف (جمع آوری شده از منابع مذکور)

<sup>۱</sup> CRISP

لیو<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۱) در یک بررسی عددی، ظرفیت باربری محوری پی‌های شمعی تحت اثر تونل زنی را با استفاده از روش اجزای محدود و مدل الاستوپلاستیک در نرم‌افزار انسیس<sup>۲</sup> مورد بررسی قرار دادند. مدل‌سازی با استفاده از مدل رفتاری دراگر - پراگر الاستوپلاستیک بر اساس معیار گسیختگی موهر - کلمب انجام شده است. از روش پیشنهاد استاندارد ترزاقی به منظور تفسیر منحنی‌های تنش - نشست خروجی از نرم افزار استفاده شد تا تاثیر حفر تونل بر ظرفیت باربری محوری شمع و همچنین کارایی شمع در فواصل عرضی ۰، ۱/۵ و ۳ برابر قطر تونل از مرکز تونل مورد بررسی قرار گیرد. در نتایج تحقیقات به تاثیر طول شمع بر افزایش ظرفیت باربری آن تاکید شده است. علاوه بر این در تمامی حالات مختلف قرارگیری شمع، با طول‌های مختلف، عبور تونل منجر به کاهش ظرفیت باربری محوری شمع گردیده است. طبق نتایج افت ظرفیت باربری محوری شمع، وابستگی شدیدی به محل قرارگیری پاشنه شمع و طول آن دارد. بحرانی‌ترین حالت در مورد افت ظرفیت باربری محوری زمانی رخ می‌دهد که طول شمع ( $L_p$ ) برابر با فاصله مرکز تونل تا سطح زمین ( $H_T$ ) باشد. در این حالت شمع‌های که در فاصله عرضی نیم تا یک برابر قطر تونل از مرکز تونل قرار گرفته‌اند، میزان افتی در حدود ۲۶ درصد در ظرفیت باربری محوری از خود نشان می‌دهند. در ترازهای پایین‌تر از محور افقی تونل، جابجایی عمودی خاک تحت اثر تونل سازی باعث افزایش ظرفیت باربری محوری شمع می‌شود. بررسی تاثیر فاصله جانبی قرارگیری شمع با محور تونل نشان دهنده کاهش افت ظرفیت باربری محوری با افزایش فاصله جانبی شمع از تونل است (لیو و همکاران، ۲۰۱۱).

رامین ولی (۱۳۸۸) با استفاده از مدل‌سازی عددی به روش اجزا محدود و نرم‌افزار پلکسیس<sup>۳</sup> به بررسی تاثیر تونل سازی بر کاهش ظرفیت باربری گروه شمع در مجاورت منطقه حفاری شده پرداخت. در این مطالعه

---

<sup>۱</sup> Liu & etal

<sup>۲</sup> ANSYS

<sup>۳</sup> PLAXSIS

تاثیر تغییر در پارامترهای ژئوتکنیکی خاک، مشخصات گروه شمع و مشخصات حفاری بر کاهش ظرفیت باربری محوری شمع مورد بررسی قرار گرفته است. طبق مطالعه انجام شده، تغییرات طول شمع و نیز فاصله جانبی شمع تا مرکز تونل، سبب تغییرات پراکنده در ظرفیت باربری محوری می‌شود. زمانی که شمع‌هایی با طول‌های مختلف در فاصله جانبی یک برابر قطر نسبت به محور تونل قرار می‌گیرند تا ۴۳ درصد افت در ظرفیت باربری دیده می‌شود. این در حالی است که شمع‌های خارج از محدوده جانبی دو و نیم برابر قطر تونل تغییرات بسیار اندکی در ظرفیت باربری محوری را نشان می‌دهند. از بین پارامترهای مورد بحث در مطالعه رامین ولی ضخامت پوشش تونل و نیز زاویه اصطکاک خاک کمترین تاثیر را بر ظرفیت باربری محوری شمع نشان می‌دهند (ولی، ۱۳۸۸).

لی و جاکوبز<sup>۱</sup> (۲۰۰۶) تاثیر حفر تونل بر تک شمع مجاور را با استفاده از مدل‌سازی عددی و بهره‌گیری از نرم‌افزار فلک سه‌بعدی به منظور بررسی تغییرات نشست، بار محوری پاشنه و انتقال تنش برشی در حد فاصل شمع و خاک را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه مدل الاستیک و همسانگرد برای شمع و پوشش تونل و همین‌طور معیار گسیختگی موهر-کلمب برای خاک در نظر گرفته شد. مرحله اول تحقیق شامل مدل‌سازی شمع و بررسی ظرفیت باربری محوری با توجه به تفسیر منحنی تنش - نشست و با استفاده از روش حدی دیویسون است. در مرحله دوم، مدل‌سازی شمع و تونل صورت پذیرفته و با اعمال ضریب ایمنی ۳، بار کاری وارد بر شمع محاسبه و اعمال گردید. طبق نتایج، نشست شمع در حضور فرآیند تونل‌سازی تا ۳ برابر نشست مجاز افزایش یافته است که منجر به افزایش تنش برشی در اکثر طول شمع شده است (لی و جاکوبز، ۲۰۰۶).

---

<sup>۱</sup> Lee & jacobs

لی و یو (۲۰۰۷) نیز به بررسی مشابهی با لی و جاکوبز (۲۰۰۶) پرداختند. نتایج حاصل از این تحقیق که روی تاثیر تونل سازی بر شمع‌های موجود در خاک‌های رسوبی و هوازده و با اعمال ضریب اطمینان ۳ برای محاسبه بار کاری، انجام شد، نشان می‌دهد که تونل سازی باعث افزایش نشست نوک شمع تا حدود ۲/۵ برابر نشست شمع تحت بار مجاز می‌شود. این نشست در نوک شمع زمانی آغاز می‌گردد که جبهه‌کار به اندازه ۲/۵ برابر قطر تونل در راستای پیشروی تونل با شمع فاصله دارد و تا عبور جبهه‌کار به اندازه ۲ برابر قطر تونل ادامه دارد (لی و یو، ۲۰۰۷).

یو (۲۰۱۳) تاثیر حفر تونل به روش سنتی را بر شمع‌های پل را از نظر نشست، انتقال بار به پاشنه و تغییرات تنش برشی در جداره شمع مورد بررسی قرار دارد. در این تحقیق از مدل‌سازی به روش المان محدود و نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. طبق نتایج این مطالعه، مقدار بار محوری در پاشنه شمع‌هایی که بلافاصله روی تاج تونل قرار دارند به شدت افت می‌کند. همین‌طور بار پاشنه شمع‌های واقع در بخش‌های دورتر از تونل افزایش می‌یابد. بررسی تغییرات تنش برشی در طول شمع نشان می‌دهد، هر چه فاصله بین پاشنه شمع با تاج تونل کاهش یابد، شدت تغییرات تنش برشی در طول بدنه شمع بیشتر می‌شود (یو، ۲۰۱۳).

چنگ و لونگ (۲۰۰۴) با استفاده از آنالیز برگشتی نتایج آزمایش سانتریفیوژ و مدل‌سازی عددی با استفاده از روش المان محدود و نرم‌افزار آباکوس، به بررسی رفتار جانبی شمع در حضور تونل پرداختند. روش مورد استفاده در این تحقیق، روش کنترل جابجایی نام دارد. در روش کنترل جابجایی گره‌های مرز تونل به نحوی کشیده می‌شوند که تاثیرات آزادسازی تنش را به شکلی از پیش تعیین شده شبیه‌سازی نمایند. در این روش به گره‌های حاضر در مرز تونل یک مقدار از پیش تعیین شده جابجایی اعمال می‌شود تا بتوان تاثیرات آزادسازی تنش را به وسیله آن بررسی کرد. نتایج نشان می‌دهند فاصله جانبی شمع و همین‌طور فاصله محدوده قرارگیری شمع از تاج تونل، اهمیت بالایی در منحنی جابجایی جانبی شمع و

نشست زمین دارد. بیشترین تغییر شکل جانبی شمع مربوط به تغییر شکل آن در جهت عمود بر راستای حفاری است. مقادیر تغییر شکل در راستای حفاری بسیار اندک و قابل اغماض می‌باشند (چنگ و لونگ، ۲۰۰۴). در میان بررسی‌های انجام شده در مورد اندرکنش شمع و تونل می‌توان به مواردی همچون جاکوبز و همکاران (۲۰۰۵) و ناکاجیما<sup>۱</sup> و همکاران (۱۹۹۲) اشاره کرد که با استفاده از روش تجربی و فرضیاتی روش خود به منظور بررسی نشست شمع و ظرفیت باربری محوری شمع در مجاورت تونل را ارائه کردند.

ناکاجیما و همکاران (۱۹۹۲) نیز روش تجربی را با توجه به بررسی‌های انجام شده روی داده‌های ابزار دقیق پل توکیو و تونل مترو برای بررسی پایداری شمع ارائه کردند. این روش بر پایه نسبت حاصل جمع نیروهای واکنشی در پاشنه شمع با فشار جانبی خاک در محدوده‌ای به عرض یک سگمنت ( $\sum P$ ) با حاصل جمع فشار سینه‌کار و مقاومت جداری شمع  $P_r$  و مقایسه آن با ضریب ایمنی (پیشنهاد شده ضریب ایمنی معادل ۳ در نظر گرفته شود) استوار است. در این روش اگر  $FOS > (\sum P) / P_r$ ، می‌توان پایداری شمع را نتیجه گرفت. در غیر این صورت نیاز به روش‌های تحکیمی برای خاک مجاور محدوده می‌باشد (ناکاجیما و همکاران، ۱۹۹۲).

جاکوبز و همکاران (۲۰۰۵) بر اساس مدل فیزیکی و آزمایش‌های سانتریفیوژ صورت گرفته توسط جاکوبز و همکاران (۲۰۰۲)، همین‌طور بررسی نتایج ابزار دقیق نشست پل و زمین‌های لندن تحت عبور تونل سراسری راه‌آهن و همین‌طور نتایج تحقیقات سلامتاس و استندینگ (۲۰۰۵) روش تجربی را به منظور بررسی نشست شمع و همین‌طور پایداری شمع تحت بارهای وارده بر آن ارائه کرد. این روش وابسته به فرضیاتی است که از جمله آن‌ها می‌توان به کاهش بار پاشنه در حضور فرآیند تونل‌سازی، صرف نظر کردن از جابجایی الاستیک شمع و عدم وجود اصطکاک در حد فاصل شمع و خاک محصورکننده اشاره کرد. به این ترتیب

---

<sup>۱</sup> Nakajima & etal

می‌توان از روش‌های رایج بررسی منحنی نشست عرضی زمین برای جابجایی شمع و نیز بررسی نشست‌های عمودی و افقی زیرسطحی و تبدیل آن به کرنش کششی و مقایسه با کرنش بحرانی مواد تشکیل‌دهنده شمع برای پایداری شمع استفاده کرد. یکی از معایب اصلی این روش قابلیت استفاده از آن تنها برای شمع‌هایی است که پاشنه آن‌ها با فاصله اندکی روی تاج تونل قرار گرفته باشند (جاکوبز و همکاران، ۲۰۰۵).

## ۲-۷- جمع‌بندی

در این فصل به بررسی کلیاتی در مورد شمع‌ها و ظرفیت باربری آن‌ها پرداخته شد. همین‌طور برای دستیابی به درک صحیح از اندرکنش میان شمع و تونل موارد مطالعاتی که شامل آزمون‌های آزمایشگاهی، بررسی‌های تحلیلی، عددی و مطالعات میدانی است، مورد بحث قرار گرفت. به‌طور کلی نتایج مطالعات حاکی از تاثیر عمده تونل‌سازی بر نشست، تغییر شکل‌پذیری، بارها و تنش‌های وارد بر بدنه و ظرفیت باربری محوری شمع است. محل قرارگیری پاشنه شمع نسبت به تونل تعیین‌کننده چگونگی تغییر پارامترهای بیان شده است. با توجه به همین مهم برخی از پژوهشگران توجه خود را به تعیین محدوده تاثیر تونل‌سازی بر شمع‌های مجاور متمرکز کردند. در فصل آتی پایان‌نامه، به بررسی و معرفی روش تحقیق و نرم‌افزار مورد استفاده در مطالعه حاضر و همین‌طور چگونگی مدل‌سازی پرداخته شده است.



## ۳- فصل سوم

### روش تحقیق

### ۳-۱- مقدمه

روش مطالعات میدانی را می‌توان مطمئن‌ترین روش بررسی اندرکنش شمع و تونل دانست. استفاده از این روش کاربرد اندکی دارد، چرا که با توجه به اینکه در اکثر موارد ساخت و سازهای سطحی قبل از حفر تونل به اتمام رسیده‌اند و نیز اینکه نمی‌توان احتمالی مبنی بر مطالعات در مورد اندرکنش شمع با هر فضای زیرزمینی دیگری داد، نصب تجهیزات مانیتورینگ و ابزار دقیق در شمع‌ها صورت نمی‌پذیرد. مطالعات آزمایشگاهی و مدل‌های فیزیکی به منظور تجزیه و تحلیل جنبه‌های کنترلی خاک از قبیل شرایط زهکشی، بارگذاری و مقادیر نشست بسیار مناسب است. با این حال صحت مدل ساخته شده چه از نظر سازگاری مدل با شرایط طبیعی و چه از نظر سازگاری مدل با شرایط حفر و نگهداری تونل مورد تردید است. نکته دیگر در مورد روش‌های آزمایشگاهی و مدل‌های فیزیکی، اتساع خاک در مقیاس‌های کوچک است که می‌تواند تاثیرات مخربی بر مقاومت شمع در مقایسه با مقیاس‌های واقعی داشته باشد. روش‌های تئوری و تجربی به دلیل محدودیت‌هایی مانند حساسیت به موقعیت قرارگیری شمع و محدودیت در بررسی همه جانبه اندرکنش شمع و تونل قادر به بررسی دقیق اندرکنش شمع و تونل نمی‌باشند.

### ۳-۲- روش‌های عددی

روش‌های عددی به واسطه پیشرفت فن‌آوری و علوم وابسته مانند کامپیوتر و قابلیت کاربرد زیاد آن در رشته‌های مختلف، در سال‌های اخیر رواج زیادی داشته است. این روش‌ها در مواجهه با هندسه‌ها و شرایط مرزی و اولیه پیچیده، عملکرد بسیار مناسبی را از خود نشان می‌دهد. مشخصه اصلی روش عددی این است که یک سازه بزرگ را به المان‌های نسبتاً کوچکی تقسیم می‌کند و سپس معادلات مشخصه المان‌های منفرد و اندرکنشی بر آن‌ها برقرار می‌شود. سرانجام این معادلات که از لحاظ عدد و رقم بزرگ می‌باشند، به‌طور

همزمان و اندرکنشی با استفاده از کامپیوترها حل می‌شوند. نتایج حاصل از این روش، شامل توزیع تنش و الگوی تغییر مکان در داخل سازه است. به‌طور کلی روش‌های عددی بر اساس نوع محیط کاربرد به سه دسته اصلی که در جدول (۱-۳) فهرست شده‌اند، طبقه‌بندی می‌شوند (جینگ و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۰۳).

جدول (۱-۳): طبقه‌بندی روش‌های عددی بر اساس محیط کاربرد (جینگ، ۲۰۰۳)

روش‌های عددی				
مدل ناپیوسته		مدل پیوسته		
مدل عکس‌العمل بستر	مدل ناپیوسته	روش المان مرزی	روش المان محدود	روش تفاضل محدود
روش المان تیر با پوشش پلاستیک	روش المان مجزا			

### ۳-۲-۱- روش تفاضل محدود

روش تفاضل محدود که در تحقیق حاضر نیز مورد استفاده قرار گرفته است، یکی از قدیمی‌ترین روش‌های عددی برای حل تقریبی دستگاه‌های معادلات دیفرانسیلی است که در آن مشتق توابع با تفاضل‌های معادل آن‌ها تقریب زده می‌شوند. در روش تفاضل محدود هر مشتق در معادلات حاکم، به‌طور مستقیم توسط یک عبارت جبری که تابع متغیرهای میدان (تنش یا تغییر مکان در نقاط دلخواه از فضا) است، جایگزین می‌شود. این روش از کاربرد گسترده‌ای در حل مسائل هندسی برخوردار است. برتری روش تفاضل محدود نسبت به سایر روش‌ها این است که به توان محاسباتی زیادی برای پردازش نیاز ندارد و برخلاف روش‌های المان محدود که ماتریس المان‌ها را ترکیب کرده و یک ماتریس سختی سراسری بزرگ را می‌سازند، هیچ ماتریسی تشکیل نمی‌شود و قابلیت نسبی برای تولید مجدد معادله‌های تفاضل محدود در هر گام وجود دارد، لذا محدودیت‌های کم‌تری ایجاد می‌شود و همچنین اجازه آنالیز جابه‌جایی‌های بزرگ را می‌دهد. در این روش تجدید مختصات در وضعیت کرنش‌های بزرگ به سادگی امکان‌پذیر است. تغییر مکان‌های جزئی گره‌ها به

<sup>۱</sup> Jing & etal

مختصات گره‌ها اضافه می‌شوند به نحوی که شبکه با مصالح ارائه شده آن حرکت می‌کند و تغییر مکان می‌دهد. این عمل، فرمول‌بندی لاگرانژی می‌باشد که در این روش به کار گرفته می‌شود (جینگ، ۲۰۰۳).

### ۲-۲-۳- آشنایی با نرم‌افزار فلک سه‌بعدی

فلک سه‌بعدی نرم‌افزاری بر پایه تفاضل محدود است که برای مدل‌سازی و تحلیل مسائل مهندسی معدن و ژئوتکنیک در محیط‌های پیوسته بکار می‌رود.

این برنامه رفتار سازه‌های تشکیل یافته از خاک، سنگ و سایر مواد که در اثر رسیدن به حد تسلیم خود، دچار تغییر شکل‌های پلاستیک می‌گردند را مدل‌سازی می‌نماید. در این نرم‌افزار هر المان بر اساس قانون تنش - کرنش اختصاص یافته به آن، تحت اثر شرایط مرزی و بارهای اعمالی به آن رفتار می‌کند. روش محاسباتی لاگرانژی و تکنیک‌های ناحیه‌بندی مورد استفاده، نرم‌افزار *FLAC* را در مدل‌سازی بهتر تغییر شکل‌های پلاستیک و جریان خمیری در مصالح، یاری می‌دهد. به دلیل اینکه در حین محاسبات از هیچ ماتریسی استفاده نمی‌شود، در نتیجه محاسبات طولانی سه‌بعدی به حجم زیادی از حافظه کامپیوتری نیاز نخواهد داشت (Itasca, 2012).

### ۳-۳- شرح پروژه

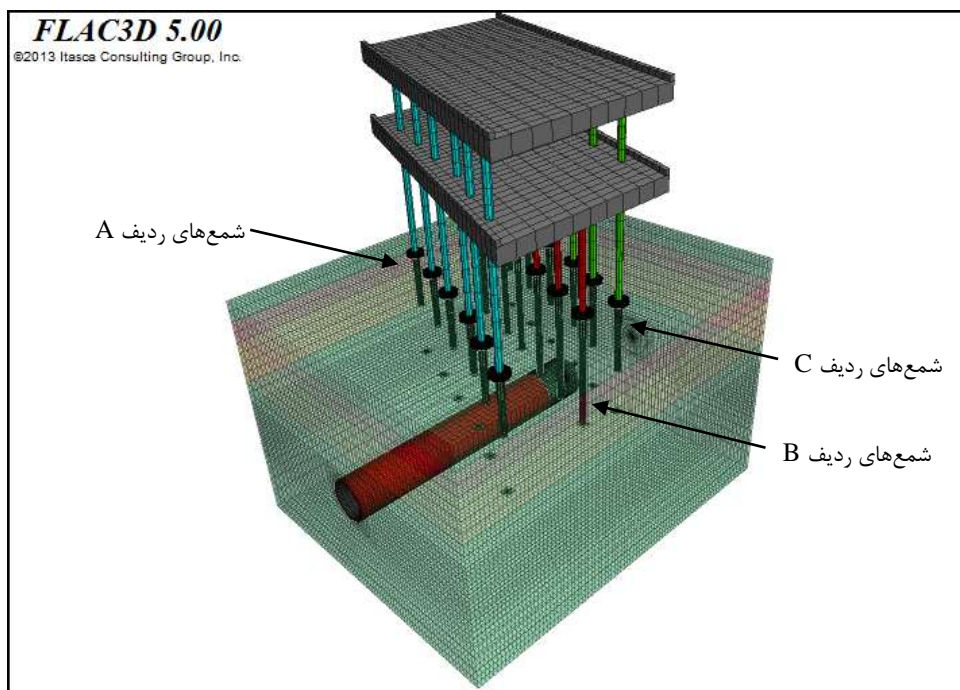
مسیر خط هفت متروی تهران پس از شروع از ورزشگاه تختی در بزرگراه بسیج (افسریه) با عبور از بزرگراه شهید محلاتی به خیابان ۱۷ شهریور می‌رسد و پس از عبور از محور جنوبی بازار اصلی در مرکز شهر تهران و خیابان‌های ری، مولوی و هلال‌احمر، به بزرگراه شهید نواب صفوی می‌رسد. سپس با عبور از تقاطع خیابان‌های کمیل، امام خمینی (ره)، آذربایجان، آزادی، باقرخان، پل نصر و گیشا و در پایان در محله سعادت‌آباد در شمال غرب تهران پایان می‌یابد. طول کلی خط ۷ متروی تهران برابر با ۲۷ کیلومتر است که

عملیات حفاری آن با استفاده از دو دستگاه TBM متعادل کننده فشار زمین انجام می‌شود. تونل خط هفت متروی تهران پس از عبور از خیابان مولوی، بلوار قیام و بلوار سعیدی مسیر خود به سمت تقاطع محلاتی را ادامه می‌دهد. با رسیدن به متر ۸+۰۰۰ از محل شروع حفاری قطعه شرقی - غربی (کلیومتر ۴+۲۲۰ تا ۴+۲۶۰) تونل از زیر تقاطع غیر هم‌سطح بزرگراه امام علی (ع) با بزرگراه شهید محلاتی عبور می‌کند. بزرگراه شهید محلاتی از شرق به غرب و بزرگراه امام علی (ع) از شمال به جنوب شهر تهران در این مکان تلاقی دارند. به منظور رفع مشکل معارضات ملکی در محدوده میدان محلاتی به جای تقاطع شبدری که می‌توانست شمار زیادی از املاک موجود در این محدوده را در پوسته طرح قرار دهد، از تقاطع غیر هم‌سطح در این بخش استفاده شده است. تقاطع غیر هم‌سطح بزرگراه امام علی (ع) با بزرگراه شهید محلاتی شامل یک پل در مسیر غرب به شرق و شرق به غرب بزرگراه شهید محلاتی، دو پل در امتداد مسیر جنوب به شمال و شمال به جنوب بزرگراه امام علی (ع) است (مشاور ساحل، ۱۳۹۳).

مجموعه این پل‌ها بر روی یکدیگر قرار گرفته‌اند؛ به طوری که پل‌های شرق به غرب و غرب به شرق بزرگراه شهید محلاتی در تراز صفر احداث شده‌اند، مسیر شمال به جنوب بزرگراه امام علی (ع) در تراز منهای یک قرار گرفته است و مسیر جنوب به شمال این بزرگراه نیز در تراز مثبت یک واقع شده است. ستون‌های پل تقاطع غیر هم‌سطح بزرگراه امام علی (ع) با بزرگراه شهید محلاتی در سه ردیف قرار گرفته که فاصله ردیف اول با دوم ۲۰ متر و ردیف دوم با سوم ۱۰ متر است. ستون‌های پل توسط شمع‌هایی با قطر ۱/۵ متر نگهداری می‌شوند. عمق شمع‌های هر ردیف از ستون‌ها با یکدیگر متفاوت است. شمع‌های ستون‌های ردیف اول (شمع‌های A) طولی معادل ۱۲ متر دارند. شمع‌های نگه‌دارنده ستون‌های ردیف دوم (شمع‌های B) ۲۵ متر و شمع‌های نگه‌دارنده ستون‌های ردیف سوم (شمع‌های C) ۱۵ متر می‌باشند (مشاور ساحل، ۱۳۹۳).



(الف)



(ب)

شکل (۱-۳): (الف) نمایی از محل قرارگیری پل و مسیر تونل (مشاور ساحل، ۹۳)، (ب) نمای شماتیک از محدوده مدل سازی

### ۳-۳-۱- تفکیک و توصیف واحدهای زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل

با توجه به نتایج به‌دست آمده از مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی، لایه‌های خاکی دربرگیرنده مسیر تونل در قطعه شرقی - غربی به پنج واحد (گونه) زمین‌شناسی مهندسی تفکیک شده‌اند که این واحدهای در جدول (۲-۳) معرفی گردیده‌اند و نوع خاک بر حسب استاندارد USCS مشخص شده است.

جدول (۲-۳): معرفی واحدهای لایه‌های خاک مسیر تونل (مشاور ساحل، ۱۳۹۴).

ET-5	ET-4	ET-3	ET-2	ET-1	واحد زمین‌شناسی مهندسی
سیلت و رس ماسه‌ای و رس به همراه ماسه	ماسه رسی به همراه گراول	ماسه رسی همراه گراول، رس و سیلت ماسه‌ای	ماسه گراولی همراه سیلت و رس	گراول ماسه‌ای و ماسه گراولی	توصیف خاک
بیش از ۶۰	۲۲ - ۳۴	۳۰ - ۶۰	۱۲ - ۳۰	۳ - ۱۲	درصد رد شده از الک ۲۰۰
CL-ML CL, ML	SC SM	SC, SM CL	SC-SM SC,GC	GW-GM GP-GC	نوع خاک

خصوصیات فیزیکی و مکانیکی واحدهای مختلف زمین‌شناسی مهندسی، با بررسی و تحلیل آماری نتایج حاصل از مطالعات صحرایی (گمانه‌ها و آزمایش‌های صحرایی) و آزمون‌های آزمایشگاهی تعیین شده و مقادیر پارامترهای ژئوتکنیکی پیشنهادی برای واحدهای زمین‌شناسی مهندسی مختلف در جدول (۳-۳) قید شده است.

با توجه به بررسی‌های زمین‌شناسی انجام شده در محدوده تقاطع غیر هم‌سطح بزرگراه امام علی (ع) با بزرگراه شهید محلاتی، سه واحد زمین‌شناسی ET-1، ET-2 و ET-3 شناسایی شدند. از سطح زمین تا عمق ۴ متری ET-2، از عمق ۴ تا ۹ متری زمین ET-3، از عمق ۹ تا ۲۰ متری واحد ET-1 و از عمق ۲۰ متری به پایین ET-2 خاک محدوده را تشکیل داده‌اند. سطح آب زیرزمینی در این محدوده در ۲۷ متری از سطح زمین است (مشاور ساحل، ۱۳۹۴).

جدول (۳-۳) : مقادیر پارامترهای ژئوتکنیکی واحدهای زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل (مشاور ساحل، ۱۳۹۴).

واحد زمین‌شناسی مهندسی	چسبندگی C (kPa)	زاویه اصطکاک داخلی $\varphi(^{\circ})$	مدول الاستیسیته E (MPa)	ضریب پواسون ( $\nu$ )	وزن مخصوص خشک $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )
ET-1	۱۴	۳۴	۸۰	۰/۳	۱۸/۶
ET-2	۱۵	۳۳	۷۵	۰/۳	۱۸/۴
ET-3	۳۰	۳۳	۵۰	۰/۳۲	۱۹/۰۲
ET-4	۲۲	۳۲	۵۰	۰/۳	۱۸/۲
ET-5	۳۱	۲۸	۳۵	۰/۳۵	۱۷

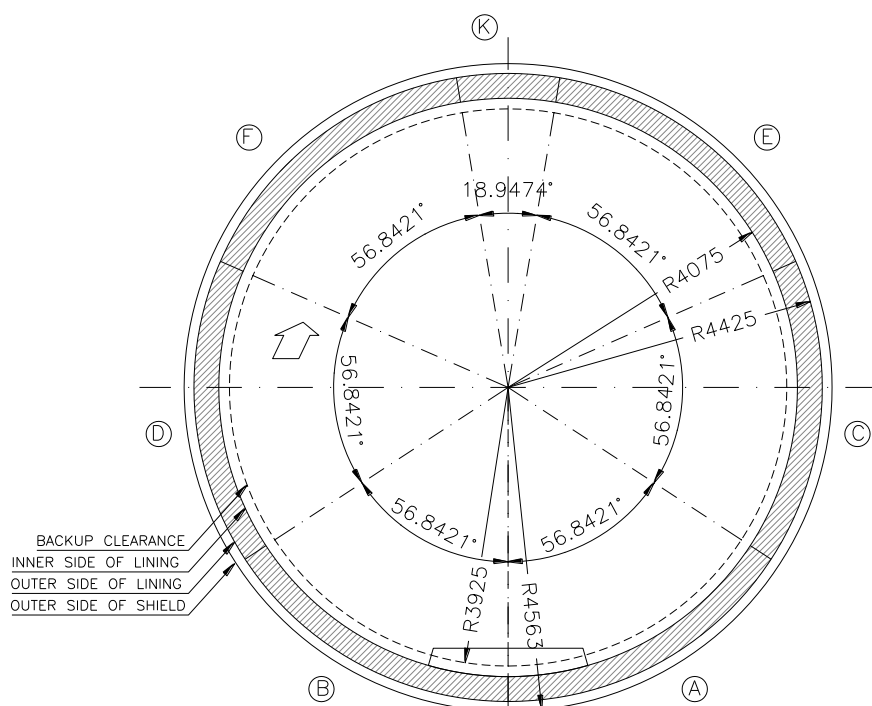
### ۳-۳-۲- مشخصات هندسی تونل خط هفت

سازه خط هفت متروی تهران یک حلقه دایره‌ای شکل از بتن پیش‌ساخته به قطر تمام شده ۸/۱۵ متر است که مرکز این سازه در محدوده کیلومتر ۲۲۰+۴ تا ۲۶۰+۴، در عمق ۳۲ متری از سطح زمین واقع شده است. حفاری در این تونل به روش مکانیزه و با استفاده از ماشین TBM متعادل کننده فشار زمین به قطر ۹/۲ متر انجام می‌شود که طول و ضخامت سپر ماشین حفار به ترتیب برابر با ۱۰ متر و ۱۴ سانتی‌متر است. عملیات نگهداری تونل با استفاده از نصب هفت قطعه سگمنت در هر حلقه کامل، به ضخامت ۳۵ سانتی‌متر و طول ۱٫۵ متر انجام می‌شود (مشاور ساحل، ۱۳۸۹). شکل (۳-۲) هندسه خط هفت متروی تهران را نشان می‌دهد.

### ۳-۱- مدل‌سازی عددی

اولین گام به‌منظور مدل‌سازی و انجام تحلیل‌ها در نرم‌افزار فلک سه‌بعدی ساخت هندسه مسئله مورد نظر است. فرآیند مدل‌سازی برای مسئله مورد بحث در دو مرحله انجام گرفته است. مدل ساخته شده در مرحله اول ظرفیت باربری محوری و جانبی شمع را مورد بررسی قرار داده و مدل ساخته شده در مرحله دوم به بررسی اندرکنش تونل و شمع می‌پردازد.



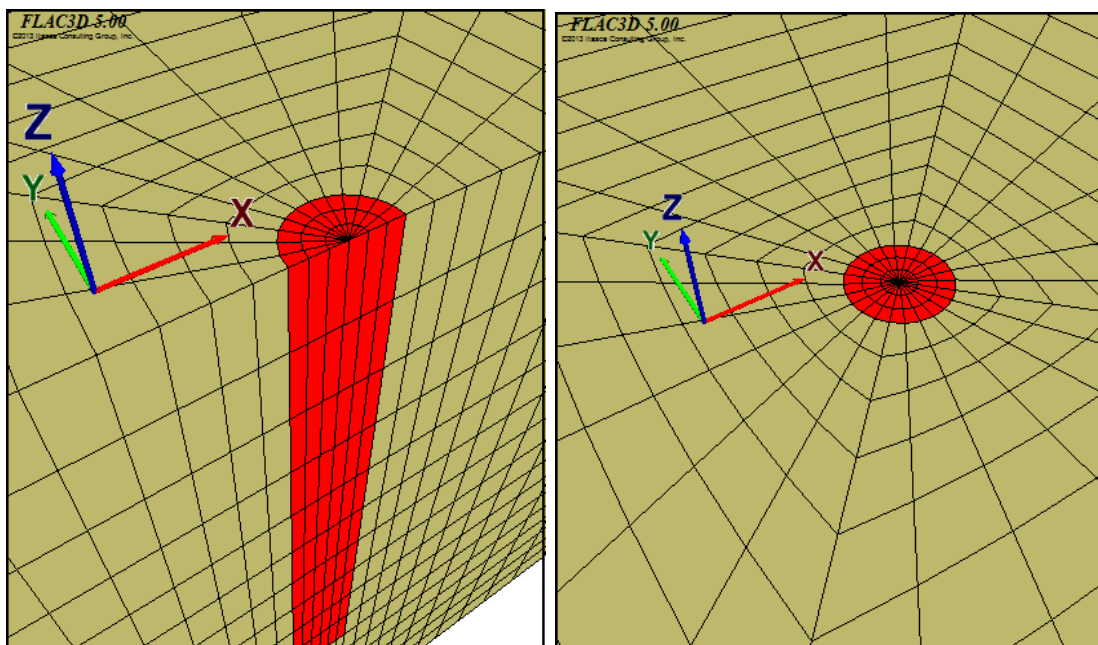


شکل (۳-۲): هندسه تونل خط هفت متروی تهران (مشاور ساحل، ۱۳۹۱).

### ۳-۱-۱- مدل سازی مرحله اول

در مدل سازی مرحله اول، یک شمع منفرد به نمایندگی از شمع های ردیف های A، B و C به منظور بررسی ظرفیت باربری محوری و جانبی مورد بررسی قرار گرفته اند. هندسه این سه شمع، استوانه ای به قطر ۱/۵ متر است که طول آن برای هر یک از شمع ها به ترتیب برابر با ۱۲، ۲۵ و ۱۵ متر است. از آنجا که مسئله شمع منفرد تحت اثر بار محوری و جانبی، دارای تقارن محوری کامل است، می توان با استفاده از تقارن های موجود در مسئله و امکان ایجاد تکیه گاهی مجازی، اقدام به کوچک سازی محدوده سه بعدی مورد نظر کرد. بنا به همین مطلب، در اولین اقدام به منظور کاهش حجم هندسه مدل، از نیمی از هندسه که حول محور X ( راستای عرض مدل) دارای تقارن است صرف نظر شده است.

به‌طور کلی دو دسته مرز طبیعی و مصنوعی برای نرم‌افزار فلک قابل تعریف است. بخش‌هایی مانند سطح تونل یا سطح زمین جز مرزهای طبیعی هستند. مرزهای مصنوعی در واقع وجود ندارند و تنها به دلیل محدود کردن ناحیه انتخابی به مدل القا می‌شوند. از آنجا که در مدل شمع منفرد پس از حذف نیمی از هندسه حول محور  $X$ ، عدم پیچش مدل حول محور  $Z$  (راستای ارتفاع مدل) بدیهی است، لذا محل برش مدل یا همان صفحه  $XZ$ ، هیچ‌گونه تغییر مکان عمود بر این صفحه وجود ندارد و نقاط واقع بر این صفحه تنها می‌تواند در راستای محور  $Z$  جابجا شوند. لذا در محل این صفحه، می‌توان با بکار بردن تکیه‌گاه مناسب که امکان حرکت تنها در راستای محور  $Z$  را فراهم می‌آورد، با تعریف مرز مصنوعی ابعاد مدل را به نصف کاهش داد. شکل (۳-۳) مدلی قبل و بعد از حذف نیمی از مدل شمع و خاک را نشان می‌دهد.



شکل (۳-۳): مدلی از محیط کامل شمع و خاک در نرم‌افزار و حذف نیمی از هندسه به دلیل تقارن

### ۳-۱-۱-۱- المان حد فاصل<sup>۱</sup>

جهت جداسازی محیط بدنه شمع و محیط جسم خاک از یکدیگر و فراهم آوردن امکان لغزش بین دو محیط، نیازمند المان‌های حد فاصل هستیم. در صورت حذف چنین المانی، رفتار شمع از حالت واقعی که امکان لغزش در محیط خاک است فاصله گرفته و همواره تغییر مکان شمع و خاک در محل اتصال این دو جسم مجزا، مقداری مساوی خواهند داشت، که فرضی غلط است. در نرم‌افزار  $FLAC^{3D}$  این المان‌ها به صورت سطحی مثلثی شکل در نظر گرفته می‌شوند که رئوس این مثلث روی گره‌های هندسه تولید شده قرار می‌گیرند. با قرار گرفتن جسم دیگری بر روی المان حد فاصل برخورد صورت گرفته و محاسبات بر اساس خواص افزایشی المان انجام می‌شود.

در هر گام محاسباتی، میزان مطلق نفوذ و برش متناظر با نفوذ در محل گره‌های المان حد فاصل محاسبه شده و بر مبنای این دو مقدار، مقادیر نیروی عمود بر سطح و نیروی برشی محاسبه می‌شوند. رفتار این المان‌های مثلثی مبتنی بر معیار برشی موهر-کلمب خطی تعیین می‌گردد. این معیار، محدودکننده نیروی برشی وارد بر المان سطح است. معیار برشی موهر-کلمب در المان حد فاصل شمع و خاک توسط مقادیری تعریف می‌شود که عبارت‌اند از: سختی‌های نرمال و برشی که در راستای عمود و موازات حد فاصل عمل می‌نمایند، مقدار چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی حد فاصل شمع با خاک (Itasca, 2012).

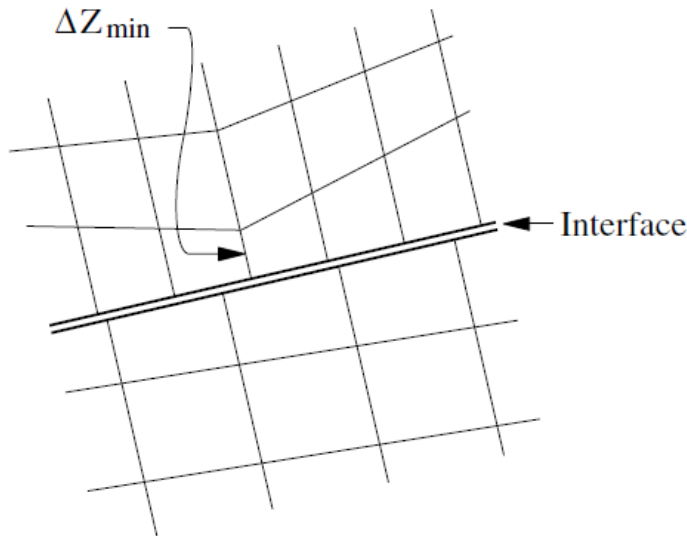
مقدار سختی نرمال و برشی بر اساس مدول بالک و برشی خاک که جسم نرم‌تر در مقایسه با شمع است محاسبه می‌گردد. مقدار عددی این دو متغیر بر حسب رابطه (۳-۱) محاسبه می‌شوند (Itasca, 2012):

$$k_n = k_s = \frac{K + \left(\frac{4G}{3}\right)}{\Delta z_{min}} \quad \text{رابطه (۳-۱)}$$

---

<sup>۱</sup> Interface

در رابطه (۱-۳)  $k_s$  و  $k_n$  نشانگر سختی نرمال و برشی المان حد فاصل هستند،  $K$  برابر با مدول بالک خاک،  $G$  مدول برشی خاک است.  $\Delta z_{min}$  کوچکترین بعد هندسی المان در راستای عمود بر حد فاصل است که در شکل (۳-۴) نمایش داده شده است.



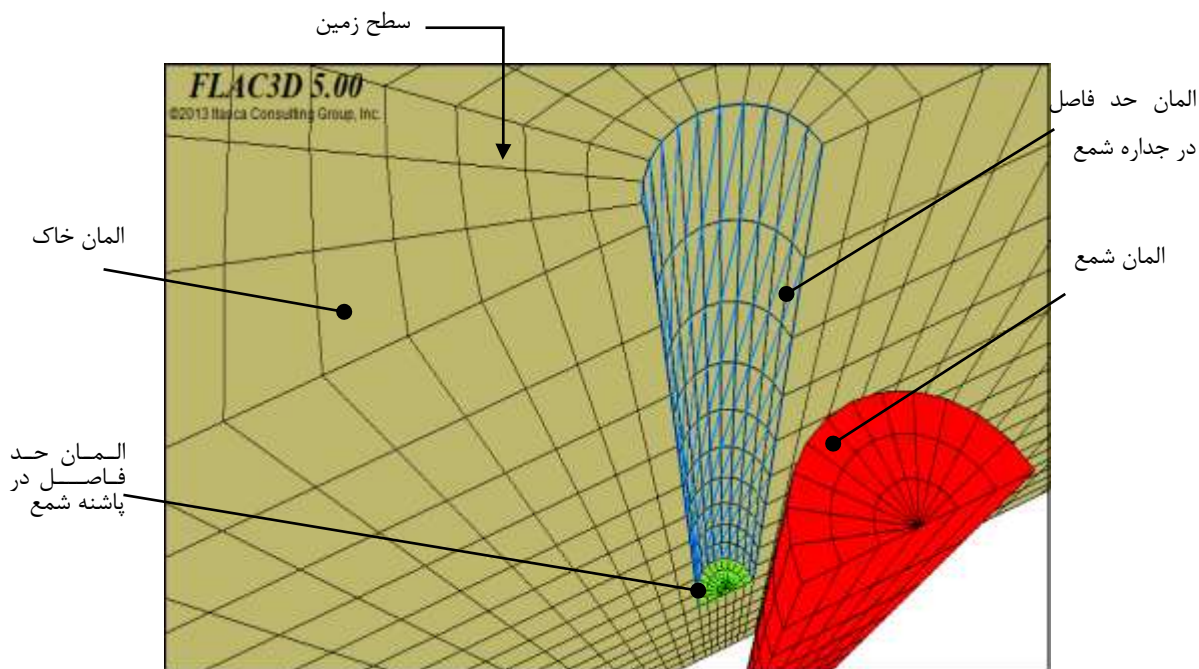
شکل (۳-۴): ابعاد المان در راستای حد فاصل (Itasca, 2012).

مقدار مدول بالک و مدول برشی بر اساس مدول الاستیک ( $E$ ) و ضریب پواسون ( $\nu$ ) طبق روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$K = E/3(1 - 2\nu) \quad \text{رابطه (۲-۳)}$$

$$G = E/2(1 + \nu) \quad \text{رابطه (۳-۳)}$$

در بررسی ظرفیت باربری شمع نیازمند به تعریف دو حد فاصل مجزا برای شمع هستیم. حد فاصل اول در جداره شمع و به منظور شبیه سازی مقاومت جداری شمع در اثر اصطکاک میان شمع و خاک و سطح دوم در محل تماس پاشنه شمع با خاک، به منظور جلوگیری از خطاهایی نظیر تغییر شکل در گره‌های این ناحیه و یا تمرکز تنش‌های سنگین. شکل (۳-۵) نمایی از المان‌های مورد استفاده در مدل سازی شمع - خاک را نشان می‌دهد.



شکل (۳-۵): نمایی از المان‌های مورد استفاده در مدل شمع - خاک

### ۳-۱-۱-۲- انتخاب مدل رفتاری

برنامه فلک سه‌بعدی دارای ۱۱ مدل رفتاری از پیش طراحی شده است که شامل مدل‌های تپی، سه نوع مدل الاستیسیته (ایزوتروپ، ایزوتروپ متقاطع (آنیزوتروپ) و الاستیک اورتوتروپ) و هفت مدل پلاستیسیته (دراگر-پراگر، موهر-کلمب، کرنش سخت شونده و نرم شونده، درزه سراسری، کرنش نرم شونده و سخت شونده غیرخطی، تسلیم دوگانه و مدل اصلاح شده Cam-Clay) می‌باشد. هر مدل برای ارائه حالت خاصی از رفتار مصالح به کار می‌رود که معمولاً مرتبط با مصالح زمین‌شناسی هستند (Itasca, 2012).

با توجه به نتایج حاصل از آزمایش‌های خاک محدوده مورد بررسی و تطابق آن با معیار موهر-کلمب و همچنین نتایج قابل قبول ارائه شده در تحقیقات انجام شده توسط پژوهشگران مختلف، این مدل رفتاری برای خاک و نیز مدل الاستیک برای شمع انتخاب شد.

### ۳-۱-۱-۳- اعمال شرایط اولیه

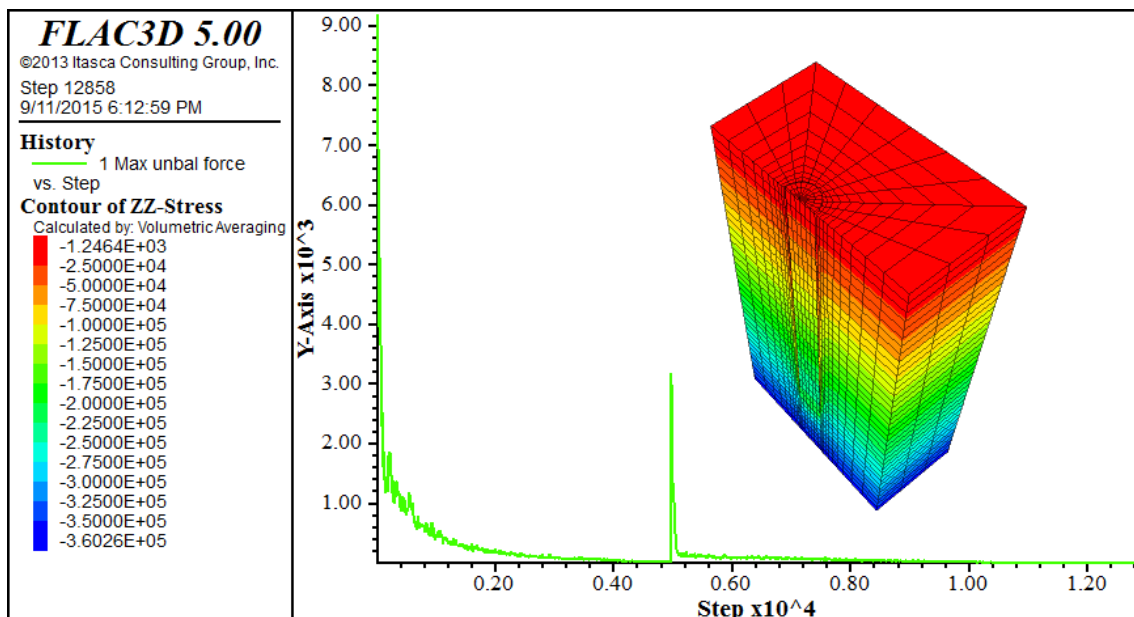
پس از انتخاب مدل رفتاری، با اعمال شرایط اولیه، تنش‌های برجای موجود در زمین شبیه‌سازی و امکان تحلیل مدل تحت اثر نیروی وزن فراهم خواهد آمد. برای این منظور با استفاده از عمق سازه و پارامترهای ژئوتکنیکی زمین که در جدول (۳-۳) قابل مشاهده هستند، تنش‌ها را تخمین و با اعمال مشخصات الاستیک شمع و نیز مقدار  $3 \text{ GPa/m}$  برای پارامترهای سختی برشی و نرمال حد فاصل شمع با خاک اطراف، اقدام به اجرای برنامه شده است. لازم به ذکر است، چگونگی تعیین ابعاد مدل و پارامترهای بکار رفته در حد فاصل شمع و خاک در بخش‌های (۳-۴-۱) و (۳-۵-۱) مورد بحث قرار گرفته است. در لایه‌های یکنواخت با سطح آزاد، تنش‌های قائم بر اساس شتاب ثقل ( $g$ )، چگالی مواد ( $\rho$ ) و عمق نقطه مورد نظر ( $h$ ) برابر با  $\rho gh$  است. نسبت تنش افقی به قائم با توجه به جنس خاک تعیین می‌گردد. برای خاک دانه‌ای با تراکم متوسط، طبق پیشنهاد جکی<sup>۱</sup> (۱۹۴۸) ضریب تنش فشار خاک در حالت افقی، طبق رابطه  $K_a = 1 - \sin \varphi$  در نظر گرفته شده است.

جدول (۳-۴): خصوصیات الاستیک بتن شمع‌های پل (مشاور ساحل، ۱۳۹۳)

وزن مخصوص ( $\text{KN/m}^3$ )	نسبت پواسون	مدول الاستیسیته ( $\text{GPa}$ )
۲۵	۰/۲	۲۳/۹

پس از ایجاد هندسه و تخصیص مشخصات به مدل عددی، تحلیل مدل برای رسیدن به تعادل اولیه آغاز می‌شود. نمونه‌ای از نتایج خروجی تعادل اولیه مدل سازی مرحله اول در شکل (۳-۶) نشان داده شده است.

<sup>۱</sup> Jacky

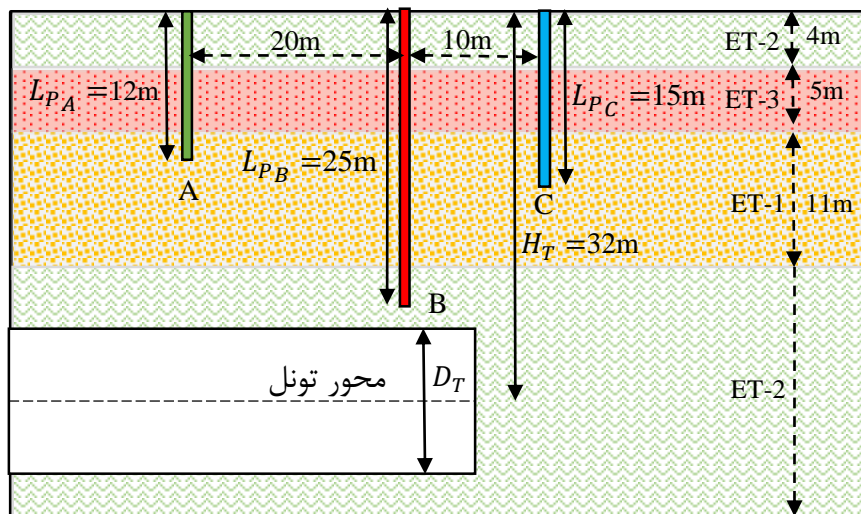


شکل (۳-۶): نمودار حداکثر نیروی نامتعادل کننده و شرایط تنش در راستای قائم پس از تحلیل وزن مدل ساخته شده در مرحله اول

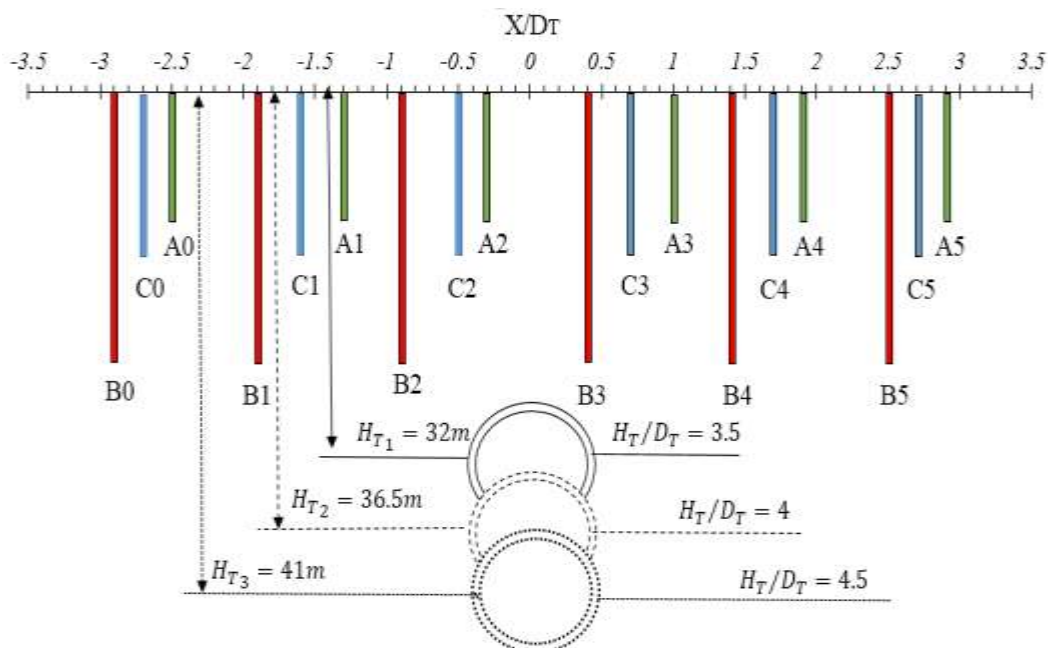
### ۳-۱-۲- مدل سازی مرحله دوم

مرحله دوم به مدل سازی فرآیند حفر تونل در مجاورت شمع و بررسی اندرکنش شمع و تونل اختصاص دارد. شکل (۳-۷) مقطع طولی از هندسه طرح، به همراه واحدهای زمین شناسی شناسایی شده در منطقه مورد بررسی را نشان می دهد. پارامترهای  $L_p$ ،  $H_T$  و  $D_T$  در شکل (۳-۷) به ترتیب نشان دهنده طول شمع، عمق قرارگیری و قطر تونل است. در اولین گام مدل سازی تونل، در حالت  $H_T/D_T = 3/5$  و عمق ۳۲ متری از سطح زمین در مجاورت شمع های پل انجام گردید. در مرحله بعد به منظور بررسی تاثیر عمق قرارگیری تونل بر پایداری شمع های مجاور، مدل سازی تونل در دو حالت دیگر و با نسبت های  $H_T/D_T = 4$  و  $H_T/D_T = 4/5$ ، در عمق های  $36/5$  و ۴۱ متری از سطح زمین انجام شد. شکل (۳-۸) موقعیت قرارگیری تونل خط هفت متروی تهران در مجاورت شمع های تقاطع غیر هم سطح بزرگراه امام علی با بزرگراه شهید محلاتی را در سه

حالت مختلف مورد بررسی، نشان می‌دهد. در این شکل فاصله جانبی قرارگیری محور شمع از مرکز تونل (X) بر حسب قطر تونل ( $D_T$ ) نرمالایز شده است.



شکل (۷-۳): مقطع طولی از هندسه تونل ( $H_T/D_T = 3/5$ ) در مجاورت شمع‌های محدوده به همراه واحدهای زمین‌شناسی (مشاور ساحل، ۱۳۹۳)



شکل (۸-۳): موقعیت قرارگیری تونل در سه حالت مختلف در حضور شمع‌های محدوده



بونیر و همکاران<sup>۱</sup> در سال ۲۰۰۲ تاثیرات اندازه و نوع مش‌بندی را بر میزان نیروهای نرمال و ممات‌های خمشی وارد بر سیستم نگهداری تونل‌ها، مورد بررسی قرار داده و مشاهده کردند که استفاده از مش‌بندی ریزتر موجب می‌شود تا مقادیر نیروهای نرمال تا ۴۰٪ و ممات‌های خمشی تا ۱۰٪ بیشتر از حالتی که مش‌بندی درشت باشد، تخمین زده شود. این تخمین بیش‌تر از یک طرف در اثر انعطاف‌پذیری بیش‌تر مش‌بندی ریز است که منجر به تغییر شکل خمشی زیادی می‌شود و از طرف دیگر بر اساس این واقعیت است که تمرکز تنش در مش‌بندی ریزتر نزدیک به لبه‌های هر المان صورت می‌پذیرد. این بدان معنی است که در حالت مش‌بندی ریزتر، مقادیر تنش، بیشتر به مقادیر واقعی تنش‌های بیشینه و کمینه در گوشه‌های المان نزدیک است؛ بنابراین در مدل‌سازی‌ها باید از مش‌بندی ریز استفاده کرد که این امر منجر به افزایش زمان اجرای مدل می‌شود (بونیر و همکاران، ۲۰۰۲).

بونیر و همکاران بیان کردند که استفاده از مش‌بندی با عرض کمتر منجر به عدم تطبیق گودی نشست عرضی با هندسه انتخابی می‌شود. لذا نتایج حاصله به‌واسطه جابجایی در شرایط مرزی تحت تاثیر قرار می‌گیرد. از آنجا که مرزهای قائم به نحوی آزادند که امکان حرکت در جهت قائم محیاست، انتخاب نامناسب ابعاد مدل منجر به افزایش نشست می‌شود. بر همین اساس، بونیر و همکاران مطالعات پارامتری فراوانی بر مقادیر مختلف قطر تونل و نسبت‌های عمق روباره به قطر تونل در حالت‌های دو و سه‌بعدی انجام دادند تا ابعاد مناسب ارتفاع و نیز حداقل عرض بین مرزهای جانبی را به‌دست آورند. نتایج حاصل از این مطالعات برای مدل‌سازی سه‌بعدی به‌صورت زیر ارائه شده است:

فاصله مرز پایینی از کف تونل:

$$h = (1.1 - 1.55) \times D_T \quad \text{رابطه (۳-۴)}$$

---

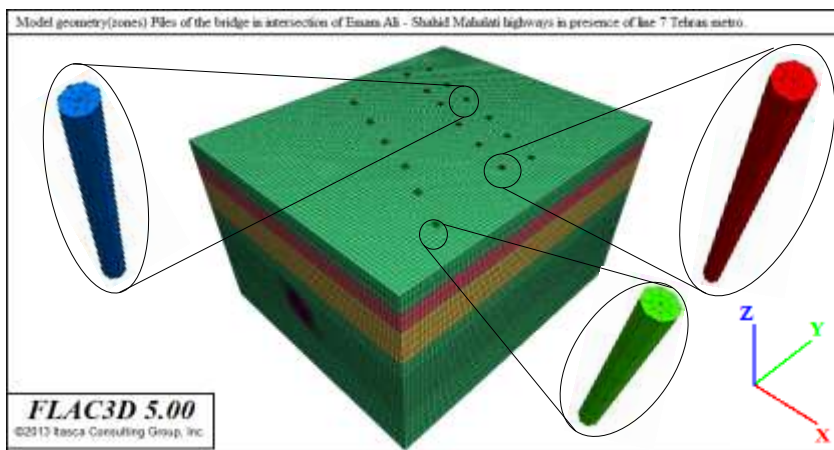
<sup>۱</sup> Bonnier & etal

فاصله مرزهای جانبی مدل (عرض مدل):

$$w = 2D(1 + \frac{H}{D_T}) \quad \text{رابطه (۵-۳)}$$

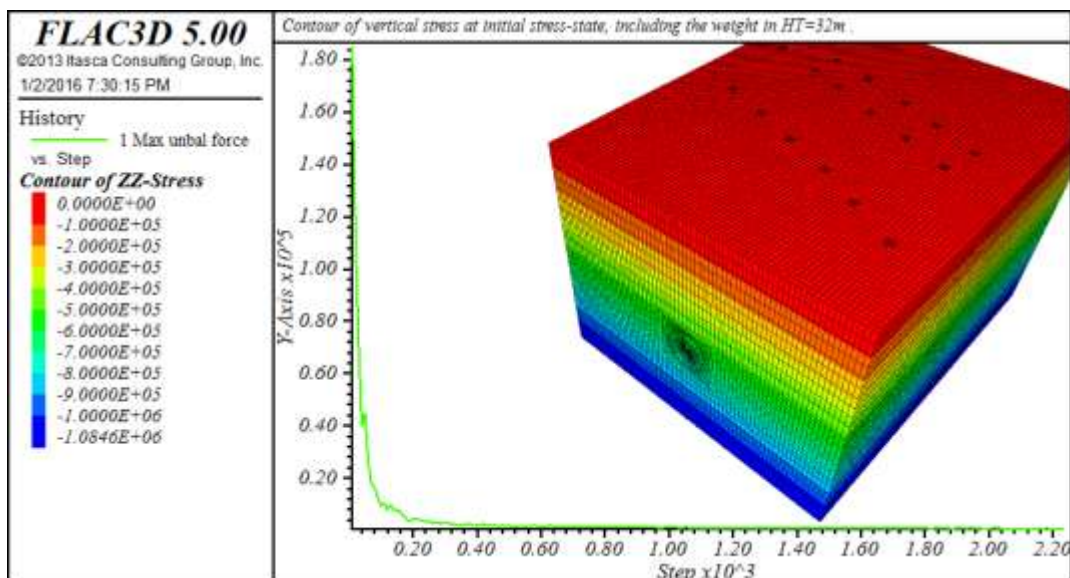
در روابط (۴-۳) و (۵-۳)،  $H$  نشان دهنده عمق قرارگیری تاج تونل است.

با توجه به نتایج تحقیقات بونیر و همکاران و به منظور جلوگیری از تاثیر شرایط مرزی در نتایج مدل سازی و نزدیکی شرایط تنش در مرزهای مدل به تنش اولیه، مدل ساخته شده دارای عرض ۷۲ متر (راستای محور  $X$ )، ارتفاع ۵۵ متر (راستای محور  $Z$ ) و طول ۸۷ متر (راستای محور  $Y$ ) است. جهت جداسازی محیط بدنه شمع و محیط جسم خاک از یکدیگر و فراهم آوردن امکان لغزش بین دو محیط از المانهای حد فاصل که در پیش تر توضیح داده شد، استفاده گردید. شکل (۹-۳) مدل ساخته شده برای بررسی اندرکنش شمع و تونل در حالت  $H_T/D_T = ۳/۵$  نشان می دهد.



شکل (۹-۳): هندسه مدل ساخته شده از تقاطع تونل خط هفت با شمعهای محدوده کیلومتر ۴+۲۲۰ در  $H_T/D_T = ۳/۵$  همانند مدل سازی در مرحله اول، مدل رفتاری موهر-کلمب برای خاک و مدل رفتاری الاستیک برای شمع و پوشش بتنی انتخاب گردید. از مقادیر موجود در جدولهای (۳-۳) و (۴-۳) به منظور تخصیص خصوصیات خاک و شمع به مدل استفاده شد و پس از اعمال شرایط تنش اولیه به مدل، تحلیل مدل به منظور حصول تعادل اولیه صورت پذیرفت. نمونه‌ای از به تعادل رسیدن حداکثر نیروی نامتعادل کننده و شرایط تنش‌ها پس از به تعادل رسیدن در شکل (۱۰-۳) قابل مشاهده است.

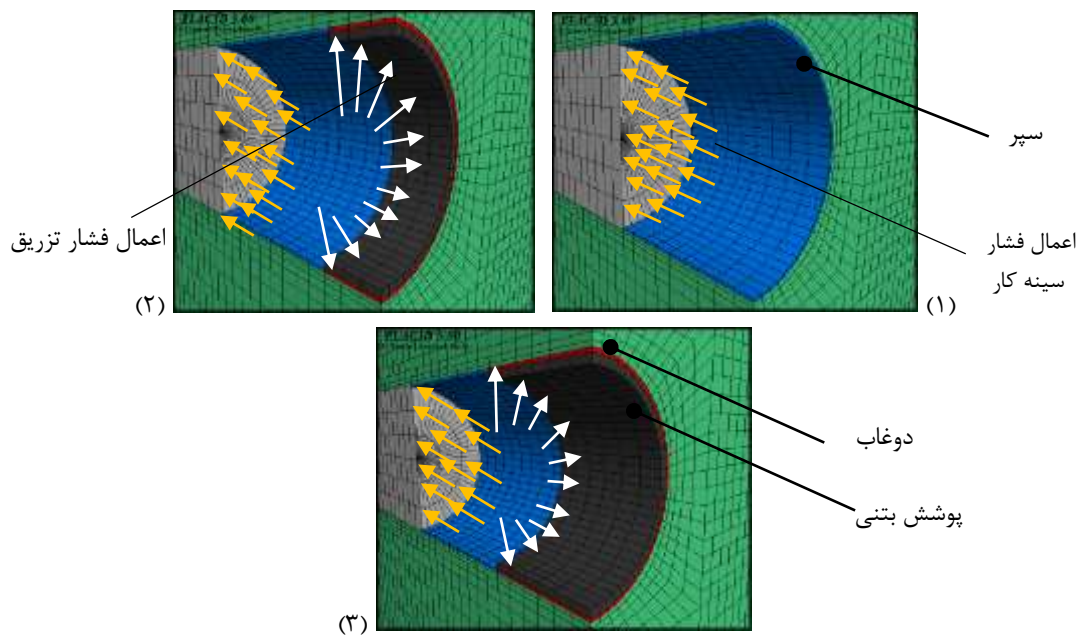
برای تطابق شبیه سازی فرآیند حفر تونل با شرایط واقعی، از روشی به نام مرحله به مرحله استفاده شده است. بدین صورت که به طور تدریجی در هر مرحله با اعمال فشار سینه کاری معادل ۲۸۰ کیلوپاسکال، برداشت مواد زمین با گام‌های ۱/۵ متری و اعمال شرایط سپر تا متر ۱۰ متری (طول سپر) ادامه می‌یابد. سپس با عبور متر ۱۰ متری و حرکت دستگاه حفاری در امتداد حفاری، در هر گام حفاری هم‌زمان با اعمال فشار سینه کار و مدل‌سازی سپر در قسمت حفر شده، از ۱/۵ متر ابتدایی، المان سپر غیرفعال و المان پوشش بتنی و تزریق پشت پوشش بتنی با فشاری برابر با ۱۸۰ کیلوپاسکال، به مدل اعمال می‌گردد و تا انتهای متر ۱۰ متری حفاری این روند تکرار می‌گردد. مشخصات اختصاص یافته به المان سپر، دوغاب و پوشش بتنی تونل خط هفت متروی تهران در جدول (۳-۵) درج شده است.



شکل (۳-۱۰): نمونه‌ای از نمودار حداکثر نیروی نامتعادل کننده و شرایط تنش در راستای قائم پس از تحلیل وزن برای مدل مرحله دوم

جدول (۳-۵): مشخصات دوغاب و پوشش بتنی تونل خط هفت متروی تهران (مشاور ساحل، ۱۳۹۱)

...	ضخامت (cm)	مدول الاستیسیته (GPa)	نسبت پواسون (-)	دانسیته ( $KN/m^3$ )
پوشش بتنی	۳۵	۳۵	۰/۲	۲۴/۴۵
دوغاب	۱۵	۰/۰۴	۰/۲۵	۱۵
سپر	۱۰	۲۰۰	۰/۲۵	۷۹



شکل (۱-۳): فرآیند مدل‌سازی پیشروی تونل به روش مرحله‌به‌مرحله: (۱) قرارگیری شیلد و اعمال فشار سینه کار. (۲) پیشروی تونل به همراه اعمال فشار سینه کار، تزریق و نصب سیستم نگهداری (۳) پیشروی گام بعدی.

### ۳-۲- اعتبار سنجی

بر اساس نتایج به دست آمده از بارگذاری محوری و جانبی شمع‌ها در گزارش کومودروموس<sup>۱</sup> (۲۰۰۳) و ریسه<sup>۲</sup> (۱۹۷۴)، مدلی برای هریک از این آزمایش‌های انجام شده ساخته شد تا صحت روند مدل‌سازی در مرحله اول مورد بررسی قرار گیرد. علاوه بر این با مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی با نتایج آزمایش بارگذاری، ابعاد بهینه مدل و پارامتر زاویه اصطکاک داخلی المان حد فاصل نیز مورد بررسی قرار گرفت. همین‌طور با استفاده از نتایج ابزار دقیق (ترازیاب سطحی) سه مقطع ۱۰+۵۵۰، ۱۰+۵۰۰ و ۴+۷۰۰ تونل خط هفت متروی تهران، صحت مدل‌سازی فرآیند تونل‌سازی مورد بررسی قرار گرفت.

<sup>۱</sup> Comodromos

<sup>۲</sup> Reese

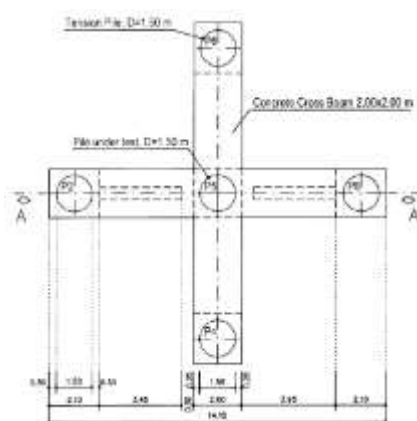
### ۳-۲-۱- آزمایش بارگذاری استاتیکی

کومودروموس (۲۰۰۳) از آزمایش بارگذاری استاتیکی برای تعیین ظرفیت باربری محوری شمع‌های پل بندرگاه تسالونیک<sup>۱</sup> واقع در کشور یونان استفاده کرد. آزمایش‌های انجام شده در محدوده مورد نظر، چهار لایه خاک را نشان می‌دهد که مشخصات خاک منطقه در جدول (۳-۶) قابل مشاهده است. به‌منظور بررسی ظرفیت باربری محوری شمع، آزمایش بارگذاری پیوسته با نرخ نفوذ ۰/۲۵ میلی‌متر بر ساعت، با استفاده از شش جک هیدرولیکی، هر کدام به ظرفیت ۵۰۰۰ کیلو نیوتون انجام شد. با توجه به اینکه طول شمع مورد آزمایش ۴۵ متر و قطر آن برابر با ۱/۵ متر است، چهار شمع به عنوان شمع اتکا، با طول و قطری مشابه با شمع مورد آزمایش، در فواصل ۴ متری از شمع مورد آزمایش نصب شد و از یک تیر بتنی برای اتصال شمع‌های اتکا به جک‌های هیدرولیکی استفاده شد. نحوه چیدمان شمع‌ها در آزمایش کومودروموس در شکل (۳-۱۲) قابل مشاهده است. جابجایی شمع تحت نیروی وارد از طرف جک‌ها با استفاده از ۱۰ کرنش‌سنج نصب شده در طول شمع مورد پایش قرار گرفت (کومودروموس، ۲۰۰۳).

جدول (۳-۶): مشخصات خاک در محدوده آزمایش بارگذاری استاتیکی (کومودروموس، ۲۰۰۳)

وزن مخصوص ( $KN/m^3$ )	چسبندگی ( $KPa$ )	زاویه اصطکاک داخلی ( $^{\circ}$ )	ضریب پواسون	مدول الاستیک ( $MPa$ )	محدوده لایه ( $m$ )	لایه
۲۰	۰	۳۰	۰/۳	۱۲/۹	۰ - ۶	A
۱۷	۲۵	۲۸	۰/۲۴	۱۲/۵	۶ - ۱۸	B
۲۱	۲۰	۲۷	۰/۱۵	۲۹/۲۵	۱۸ - ۴۲	C
۲۲	۰	۳۰	۰/۱۹	۸۳	۴۲ - ۵۰	D

<sup>۱</sup> Thessalonik



شکل (۳-۱۲): چیدمان شمع‌ها در آزمایش بارگذاری استاتیکی (کومودروموس، ۲۰۰۳)

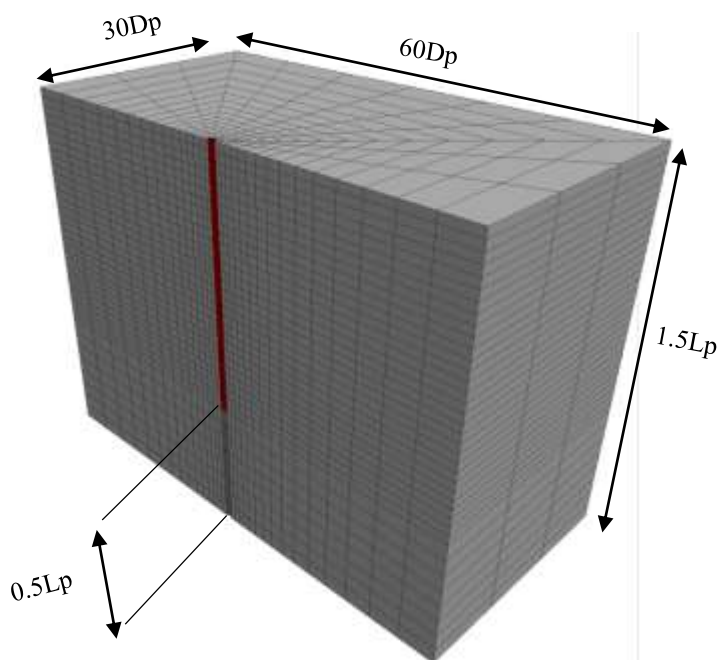
در این مرحله با توجه به پارامترهای موجود اقدام به ساخت مدل عددی و شبیه‌سازی آزمایش استاتیکی انجام شده توسط کومودروموس گردید. پارامترهای مدل‌سازی عددی شمع، در جدول (۳-۷) موجود است. از آنجا که در این آزمایش، اشاره‌ای به پارامتر چسبندگی و زاویه اصطکاک حد فاصل شمع و خاک نشده است، از مقادیر توصیه شده در سایر منابع برای رفع این مشکل استفاده می‌شود. طبق توصیه منوال نرم‌افزار  $FLAC^{3D}$ ، از چسبندگی خاک برای چسبندگی المان حد فاصل بین شمع و خاک استفاده شد. با بررسی منابع مختلف می‌توان دریافت، معمولاً مقدار زاویه اصطکاک داخلی حد فاصل شمع و خاک بین ۰/۵۵ تا ۰/۸ برابر زاویه اصطکاک خاک، وابسته به نوع و جنس خاک تغییر می‌کند. در این مرحله به منظور دستیابی به زاویه اصطکاک داخلی المان حد فاصل شمع و خاک، ابتدا طبق پیشنهاد ریب‌نیکوف<sup>۱</sup> (۱۹۹۰)، مدلی با عرض و طول ۶۰ و ۳۰ برابر قطر شمع ( $D_p$ ) ساخته شد. شکل (۳-۱۳) نمایی از هندسه مدل اولیه ساخته شده برای شبیه‌سازی آزمایش استاتیکی کومودروموس را نشان می‌دهد. هدف از حفظ این فاصله، اطمینان از استهلاک تنش در این محدوده است. برای ایجاد شرایط مرزی، در جهت عمق نیز، مرز مجازی در نظر گرفته شد. فاصله این مرز طبق پیشنهاد ریب‌نیکوف معادل نصف طول شمع ( $L_p$ ) لحاظ گردید.

<sup>۱</sup> Rybnikov

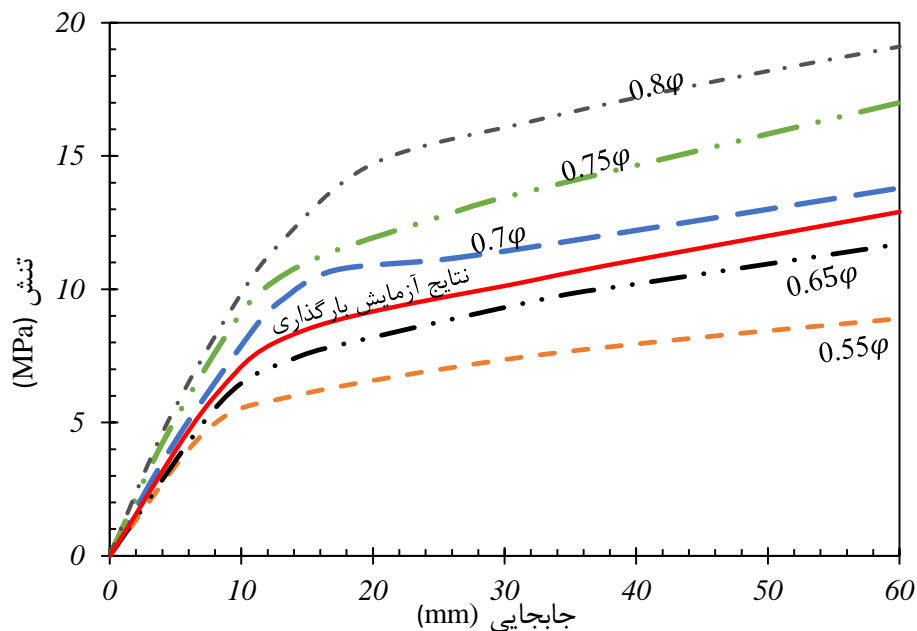
جدول (۷-۳): پارامترهای بکار رفته برای مدل‌سازی عددی شمع در آزمایش بارگذاری استاتیکی کومودروموس (کومودروموس، ۲۰۰۳)

خصوصیات المان حد فاصل ( $GP_a/m$ )		وزن مخصوص ( $KN/m^3$ )	نسبت پواسون	مدول الاستیسیته ( $GP_a$ )
سختی نرمال $K_n$	سختی برشی $K_s$			
۰/۸	۰/۸	۲۵	۰/۲۳	۴۰

برای یافتن نزدیک‌ترین مقدار زاویه اصطکاک حد فاصل بین شمع و خاک ( $\varphi_{int}$ ) با مقادیر واقعی، تغییرات ظرفیت باربری محوری شمع، با تحلیل ۵ مدل که برای هر یک زاویه اصطکاک حد فاصل متفاوتی در نظر گرفته شد، مورد بررسی و مقایسه با نتایج آزمایش کومودروموس قرار گرفت. محدوده تغییرات در نظر گرفته شده برای زاویه اصطکاک داخلی حد فاصل در تحلیل انجام شده برابر با ۰/۵۵ تا ۰/۸ برابر زاویه اصطکاک خاک ( $\varphi$ ) است. شکل (۱۴-۳) نتایج تحلیل ظرفیت باربری محوری شمع با در نظر گرفتن زوایای اصطکاک داخلی مختلف در المان حد فاصل را نشان می‌دهد.



شکل (۱۳-۳): هندسه مدل اولیه ساخته شده برای شبیه‌سازی آزمایش استاتیکی کومودروموس



شکل (۳-۱۴): مقایسه نتایج رفتار تنش-جابجایی حاصل از مدل‌هایی با زاویه اصطکاک داخلی حد فاصل مختلف

در گزارش کومودروموس ذکر شده است که برای یافتن ظرفیت باربری محوری از معیار حدی دیویسون استفاده شده است. بر همین اساس ظرفیت باربری محوری تمام مدل‌های تحلیل شده تعیین و دقت هر کدام در جدول (۳-۸) مشخص شده است.

جدول (۳-۸): مقایسه ظرفیت باربری محوری مدل‌هایی با زاویه اصطکاک داخلی مختلف با نتایج کومودروموس

نسبت ظرفیت باربری به نتیجه آزمایش کومودروموس	ظرفیت باربری محوری (MPa)	زاویه اصطکاک حد فاصل خاک و شمع
۱	۱۰/۱۲	آزمایش کومودروموس
۰/۷۲	۷/۲۸	۰/۵۵ φ
۰/۹۳	۹/۴۱	۰/۶۵ φ
۱/۱۴	۱۱/۵۳	۰/۷ φ
۱/۳۳	۱۳/۴۵	۰/۷۵ φ
۱/۶۱	۱۶/۲۹	۰/۸ φ



با توجه به شکل (۳-۱۴) و جدول (۳-۸)، مشخص است زاویه اصطکاک حد فاصل تاثیر فراوانی بر دقت تحلیل انجام شده دارد. بررسی تغییرات ظرفیت باربری شمع مورد آزمایش کومودروموس به روش عددی با در نظر گرفتن مقادیر  $0/8 \varphi < \varphi_{int} < 0/55 \varphi$ ، نشان می‌دهد قابل قبول‌ترین مقدار برای زاویه اصطکاک داخلی معادل  $0/65$  زاویه اصطکاک خاک است و دقتی در حدود  $93\%$  را برای مدل عددی ساخته شده فراهم می‌سازد. برای حالتی که  $0/65 \varphi < \varphi_{nt}$ ، ظرفیت باربری نهایی تخمین زده شده به روش عددی بیشتر از مقدار واقعی است. همین‌طور بررسی  $0/55 \varphi < \varphi_{int}$  نیز ظرفیت باربری کمتری را نسبت به نتایج آزمایش ارائه می‌کند.

با توجه به بررسی انجام شده مقدار زاویه اصطکاک حد فاصل جداره شمع با خاک، در تمام تحلیل‌های انجام شده در مطالعه حاضر  $0/65$  برابر زاویه اصطکاک خاک در نظر گرفته شد.

### ۳-۲-۱-۱- محاسبه ابعاد بهینه برای مدل

اگرچه در واقعیت محیط خاک به شکل محیطی با ابعاد بی‌نهایت در نظر گرفته می‌شود، اما با توجه به اینکه چنین امکانی در نرم‌افزار فلک سه‌بعدی وجود ندارد، لذا به اجبار بایستی ابعاد محدود و مشخصی از محیط برای نرم‌افزار تعیین و معرفی شود. بدیهی است که در نظر گرفتن مرزهای مجازی در فواصل نزدیک به شمع باعث می‌شود رفتار شمع تحت تاثیر این مرزها و ناپیوستگی‌ها قرار گیرد. از سویی استقرار مرزهای جانبی در فواصل دور نیز باعث گسترش مدل و افزایش زمان تحلیل می‌شود. پس مناسب‌تر این است که این مرزها را با فاصله‌ای از محور شمع در نظر بگیریم که در کمترین فاصله نسبت به محور شمع بوده و در عین حال کمترین اثر را در رفتار شمع داشته باشند.

به‌منظور یافتن ابعاد بهینه مدل شمع، دو دسته مدل ساخته و تحلیل لازم در مورد تغییرات ظرفیت باربری محوری با ابعاد مدل انجام شد. در دسته اول، عرض مدل (راستای محور  $X$ ) در حضور طولی (راستای

محور Y) برابر با نیمی از عرض و عمق ثابت ۶۸ متر (که در آن فاصله پاشنه شمع تا مرز مجازی طبق پیشنهاد رینوکوف برابر با نیمی از طول شمع است). بین ۵ تا ۶۰ برابر قطر شمع تغییر کرده و تاثیر ابعاد عرض و طول مدل، بر ظرفیت باربری شمع مورد بررسی قرار گرفت. منحنی تنش - نشست برای هر یک از مدل‌های ساخته شده ترسیم و سپس با استفاده از روش حدی دیویسون، ظرفیت باربری نهایی شمع محاسبه گردید. در جدول (۳-۹) مشخصات ابعاد مدل‌های دسته اول و ظرفیت باربری محوری تخمین زده شده توسط هر مدل قابل مشاهده است.

جدول (۳-۹): تغییرات ظرفیت باربری محوری با ابعاد طول و عرض مدل ساخته شده برای شبیه‌سازی آزمایش استاتیکی کومودروموس

...	عرض مدل	طول مدل	ظرفیت باربری محوری شمع (MPa)
مدل شماره ۱	$60D_p$	$30D_p$	۹/۴۱
مدل شماره ۲	$40D_p$	$20D_p$	۹/۴۱
مدل شماره ۳	$20D_p$	$10D_p$	۹/۴۱
مدل شماره ۴	$10D_p$	$5D_p$	۹/۴۱
مدل شماره ۵	$7/5D_p$	$3/75D_p$	۹/۱۲
مدل شماره ۶	$5D_p$	$2/5D_p$	۸/۷۱

با توجه به نتایج حاصل از تحلیل ظرفیت باربری محوری مدل‌های دسته اول، مشخص شد کاهش عرض مدل از ۶۰ به ۱۰ برابر قطر شمع و نیز کاهش طول مدل از ۳۰ به ۵ برابر قطر شمع، تاثیری بر ظرفیت باربری نهایی شمع ندارد. کاهش ابعاد مدل نسبت به مقادیر ذکر شده برای مدل شماره ۴ منجر به افت ظرفیت باربری تخمین زده شده می‌شود. لذا عرض و طولی معادل ۱۰ و ۵ برابر قطر شمع به عنوان عرض و طول بهینه مدل انتخاب شد.

در مرحله بعدی برای یافتن عمق بهینه مدل، با در نظر گرفتن عرض و طول ثابتی معادل ۱۰ و ۵ برابر قطر شمع، اقدام به ساخت مدل‌های دسته دوم با عمق‌های متغیر بین ۶۸ تا ۵۰ متر شد. بررسی تغییرات عمق نشان می‌دهد، فاصله پاشنه شمع تا مرز مجازی تعریف شده در راستای عمق، تاثیری در ظرفیت باربری تخمین زده شده نداشته است. جدول (۳-۱۰) ظرفیت باربری محوری تخمین زده شده توسط مدل‌های دسته دوم با عمق‌های مختلف را نشان می‌دهد. بنا به این بررسی فاصله پاشنه تا مرز مجازی تعریف شده در راستای عمق ۵ متر و عمق بهینه مدل ۵۰ متر در نظر گرفته شد.

جدول (۳-۱۰): تغییرات ظرفیت باربری محوری با ابعاد عمق مدل ساخته شده برای شبیه‌سازی آزمایش استاتیکی کومودروموس

...	عمق مدل (m)	فاصله پاشنه شمع تا مرز مجازی (m)	ظرفیت باربری نهایی شمع (MPa)
مدل شماره ۱	۶۸	۲۳	۹/۴۱
مدل شماره ۲	۵۹	۱۴	۹/۴۱
مدل شماره ۳	۵۰	۵	۹/۴۱

### ۳-۲-۲- آزمایش بارگذاری جانبی

به منظور حصول اطمینان از نتایج مدل‌سازی عددی در خصوص ظرفیت باربری جانبی شمع، از نتایج حاصل از آزمایش بارگذاری جانبی انجام شده توسط ریسه (۱۹۷۴) استفاده شد. ریسه تعدادی آزمایش بارگذاری جانبی در ایالات متحده آمریکا انجام داد. با توجه به اینکه جنس خاک منطقه آزمایش از نوع رس است، قبل از نصب شمع، محدوده‌ای به طول و عرض ۱۸ و ۱۲ متر تا عمق ۲۵ متری از سطح زمین حفاری و پس از تخلیه رس، ماسه یک‌دست و خشک به جای آن ریخته شد. سپس شمعی بتنی به قطر ۶۱ سانتی‌متر و طول ۲۱ متر انتخاب گردید و پس از نصب کرنش سنج در طول بدنه شمع و قرارگیری در زمین، با استفاده از یک جک هیدرولیکی به‌طور افقی مورد بارگذاری قرار داده شد (ریسه، ۱۹۷۴).

در مدل سازی عددی آزمایش ریشه، همانند آزمایش کومودروموس، از مدل رفتاری موهر-کلمب برای خاک و مدل رفتاری الاستیک برای شمع استفاده شد. نتایج بدست آمده از تحلیل حساسیت صورت گرفته برای آزمایش کومودروموس، برای آزمایش ریشه نیز مورد استفاده قرار گرفت. از آنجا که در گزارش ریشه اشاره‌ای به مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک بین شمع و خاک نشده است، با توجه به نتایج حاکی از مدل سازی عددی آزمایش کومودروموس، از چسبندگی خاک برای چسبندگی محل تماس شمع و خاک و نیز از مقدار  $0/65$  زاویه اصطکاک داخلی خاک، برای زاویه اصطکاک حد فاصل شمع و خاک استفاده شد. ابعاد مدل ساخته شده و پارامترهای مورد استفاده در مدل سازی عددی آزمایش بارگذاری جانبی ریشه، در شکل (۱۵-۳) و جدول های (۱۱-۳) و (۱۲-۳) قابل مشاهده است.

جدول (۱۱-۳): مشخصات خاک در محدوده آزمایش بارگذاری جانبی ریشه (ریشه، ۱۹۷۴)

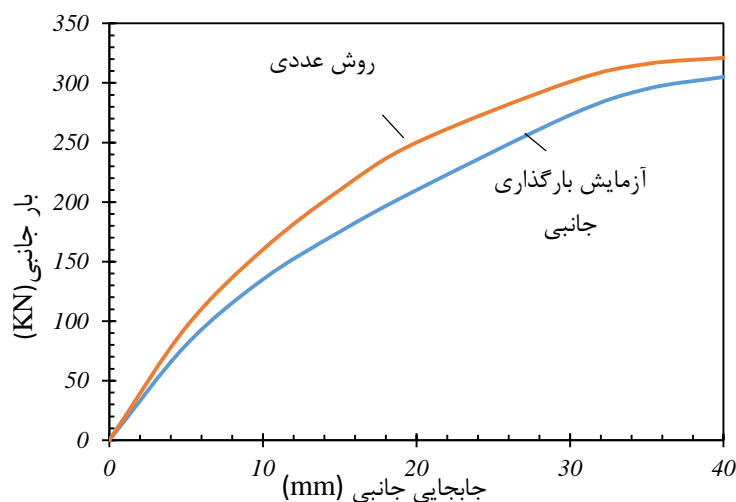
وزن مخصوص ( $Kg/m^3$ )	چسبندگی ( $KPa$ )	زاویه اصطکاک داخلی ( $^{\circ}$ )	ضریب پواسون	مدول الاستیک ( $MPa$ )
۴/۰۱	۰	۳۹	۰/۳	۲۵

جدول (۱۲-۳): پارامترهای بکار رفته برای مدل سازی عددی شمع در آزمایش بارگذاری جانبی ریشه (ریشه، ۱۹۷۴)

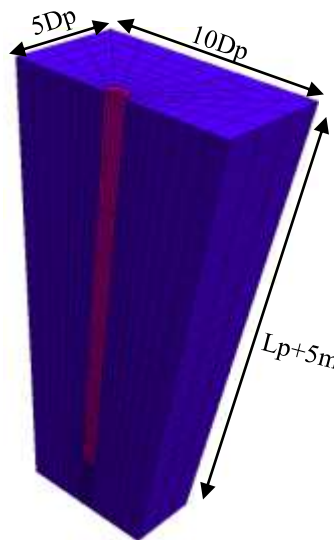
خصوصیات المان حد فاصل ( $GPa/m$ )		وزن مخصوص ( $KN/m^3$ )	نسبت پواسون	مدول الاستیسیته ( $GPa$ )
سختی نرمال $K_n$	سختی برشی $K_s$			
۲/۹	۲/۹	۲۵	۰/۲۵	۲۴

به منظور بررسی ظرفیت باربری جانبی، تغییرات جابجایی جانبی نوک شمع در حضور بار وارد بررسی و نمودار بار - جابجایی جانبی برای شمع ترسیم شد. شکل (۱۶-۳) نمودار بار - جابجایی جانبی حاصله از دو روش عددی و آزمایش بارگذاری جانبی را نشان می دهد. روش عددی مقدار ظرفیت باربری جانبی شمع را  $321$  کیلونیوتن و آزمایش بارگذاری جانبی، این مقدار را  $307$  کیلونیوتن تخمین زده است. به این ترتیب

ملاحظه می‌شود روش عددی تطابق مناسبی با روش آزمایش برجا در تخمین ظرفیت باربری جانبی شمع داشته و تا ۹۵٪ دقت را فراهم می‌کند.



شکل (۳-۱۶): مقایسه نتایج آزمایش ظرفیت باربری ریشه با نتایج مدل سازی عددی



شکل (۳-۱۵): ابعاد مدل هندسه ساخته شده به منظور شبیه سازی آزمایش بارگذاری جانبی

### ۳-۲-۳ - راستی آزمایشی مدل تونل

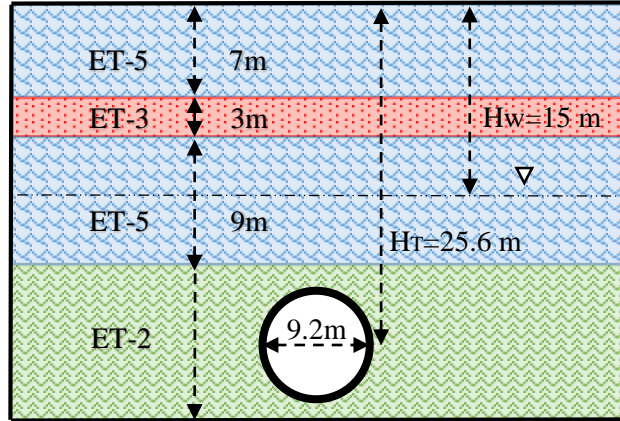
برای اعتبارسنجی و بررسی صحت روند مدل سازی تونل، از اطلاعات ابزار دقیق سه مقطع ۱۰+۵۰۰، ۱۰+۵۵۰ و ۴+۷۰۰ تونل متروی خط ۷ تهران استفاده شد که اطلاعات مربوط به هر مقطع به شرح زیر است (مشاور ساحل، ۱۳۸۹):

در مقطع ۱۰+۵۵۰، تونل در عمق ۲۵/۶ متری از سطح زمین قرار دارد و سطح آب زیرزمینی در عمق ۱۵ متری قرار گرفته است. حفاری در مقطع ۱۰+۵۵۰ با فشار سینه کار ۶۰ کیلوپاسکال و فشار تزریق ۱۱۰ کیلوپاسکال انجام گرفته است. مقادیر نشست ثبت شده توسط تراز یاب سطحی در این مقطع پس از عبور ماشین حفار و فاصله گرفتن آن به اندازه ۳۵ متر از مقطع مورد بحث، ۵/۵ میلی متر ثبت شده است. مقطع زمین شناسی کیلو متر ۱۰+۵۵۰ تونل خط هفت متروی تهران در شکل (۳-۱۷) نشان داده شده است.

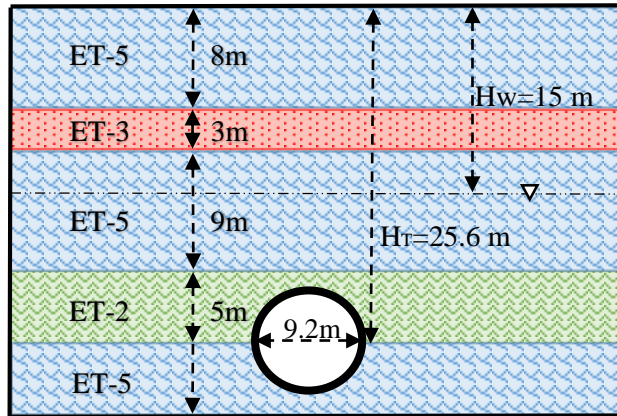
در مقطع ۱۰+۵۰۰ عمق قرارگیری تونل و سطح آب زیرزمینی همانند مقطع ۱۰+۵۵۰ بوده با این تفاوت که حفاری با اعمال فشار سینه کاری برابر با ۷۰ کیلوپاسکال و فشار تزریق ۱۲۰ کیلوپاسکال صورت گرفته است. در این مقطع پس از عبور ماشین حفار به اندازه ۳۰ متر از مقطع ابزاربندی شده، مقدار نشست ثبت شده توسط ترازیاب سطحی ۴/۵ میلی متر است. مقطع زمین شناسی کیلومتر ۱۰+۵۵۰ تونل خط هفت متروی تهران در شکل (۳-۱۸) قابل مشاهده است.

مقطع ۴+۷۰۰ زمین شناسی متفاوتی نسبت به دو مقطع قبلی دارد. علاوه بر این، در متر ۴+۷۰۰، تونل در عمق پایین تری نسبت به مترهای ۱۰+۵۵۰ و ۱۰+۵۰۰ قرار گرفته است. عمق تونل در این متر ۳۱ متر و سطح آب زیرزمینی در عمق ۲۸/۵ متر است. در این متر فشار سینه کار برابر با ۱۸۰ کیلوپاسکال و فشار تزریق دوغاب ۲۸۰ کیلوپاسکال بوده است. مقدار نشست سطح زمین در این متر در حالی توسط ترازیاب سطحی معادل ۶/۷ میلی متر ثبت شده است که ماشین حفار از مقطع عبور و ۲۶ متر از آن فاصله گرفته است. مقطع زمین شناسی کیلومتر ۴+۷۰۰ تونل خط هفت متروی تهران در شکل (۳-۱۹) نشان داده شده است.

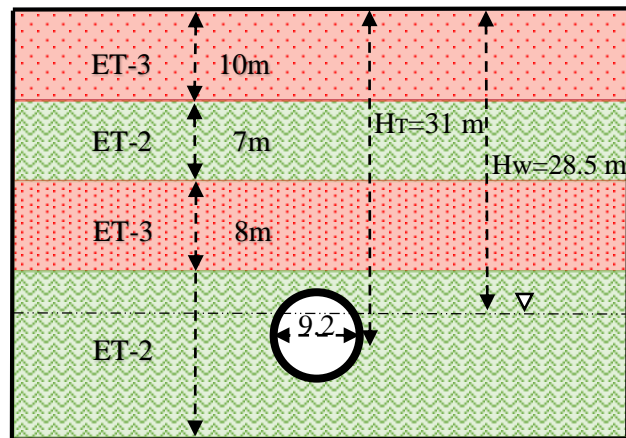
در مدل سازی عددی مقاطع مورد نظر، با توجه به وجود تقارن، تنها نیمی از تونل و فضای دربرگیرنده با عرضی معادل با پنج برابر شعاع تونل ( $5 r_T$ ) و طولی برابر با پنج برابر قطر تونل ( $5 D_T$ ) ساخته شد. ارتفاع مدل نیز پنج و نیم برابر قطر تونل ( $5/5 D_T$ ) در نظر گرفته شد. سه نقطه A، B و C به ترتیب برای مقاطع ۱۰+۵۵۰، ۱۰+۵۰۰ و ۴+۷۰۰ به عنوان نقاط پایش در سطح زمین در نظر گرفته شد. پس از اعمال شرایط مرزی و اولیه به مدل های ساخته شده، حفر تونل به اندازه ۳۵ متر برای مقطع ۱۰+۵۵۰، ۳۰ متر برای مقطع ۱۰+۵۰۰ و ۲۵ متر برای مقطع ۴+۷۰۰ صورت پذیرفت.



شکل (۳-۱۷): مقطع زمین‌شناسی کیلومتراژ ۱۰+۵۵۰ تونل خط هفت متروی تهران (مشاورساحل، ۱۳۹۴)

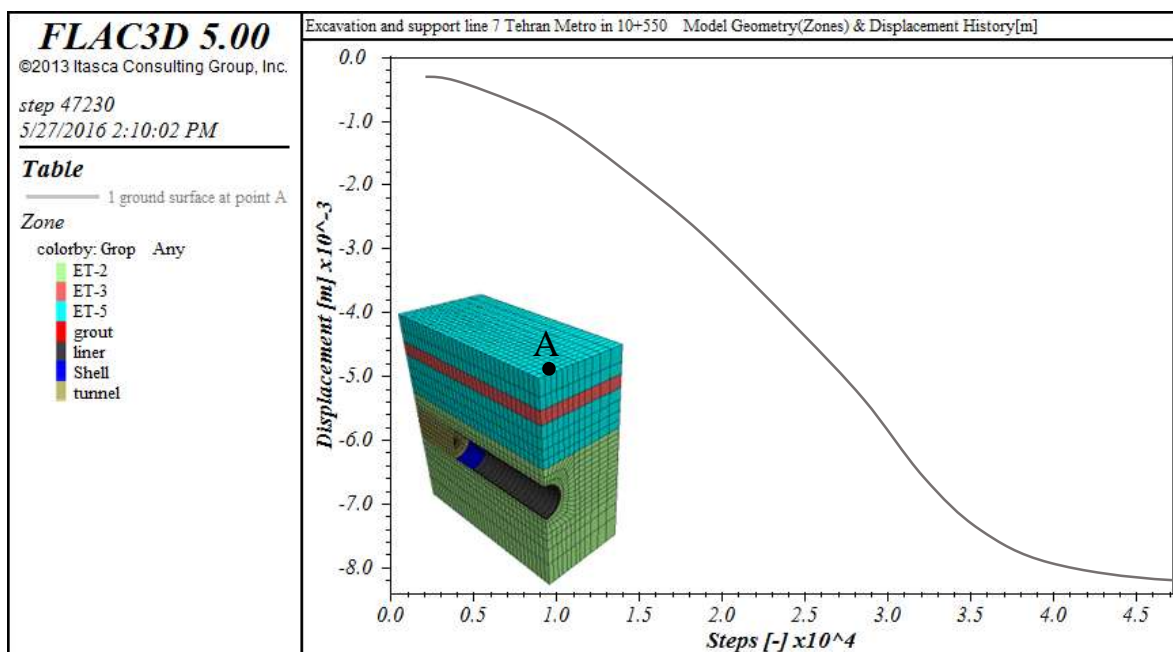


شکل (۳-۱۸): مقطع زمین‌شناسی کیلومتراژ ۱۰+۵۰۰ تونل خط هفت متروی تهران (مشاورساحل، ۱۳۹۴)



شکل (۳-۱۹): مقطع زمین‌شناسی کیلومتراژ ۴+۷۰۰ تونل خط هفت متروی تهران (مشاورساحل، ۱۳۹۴)

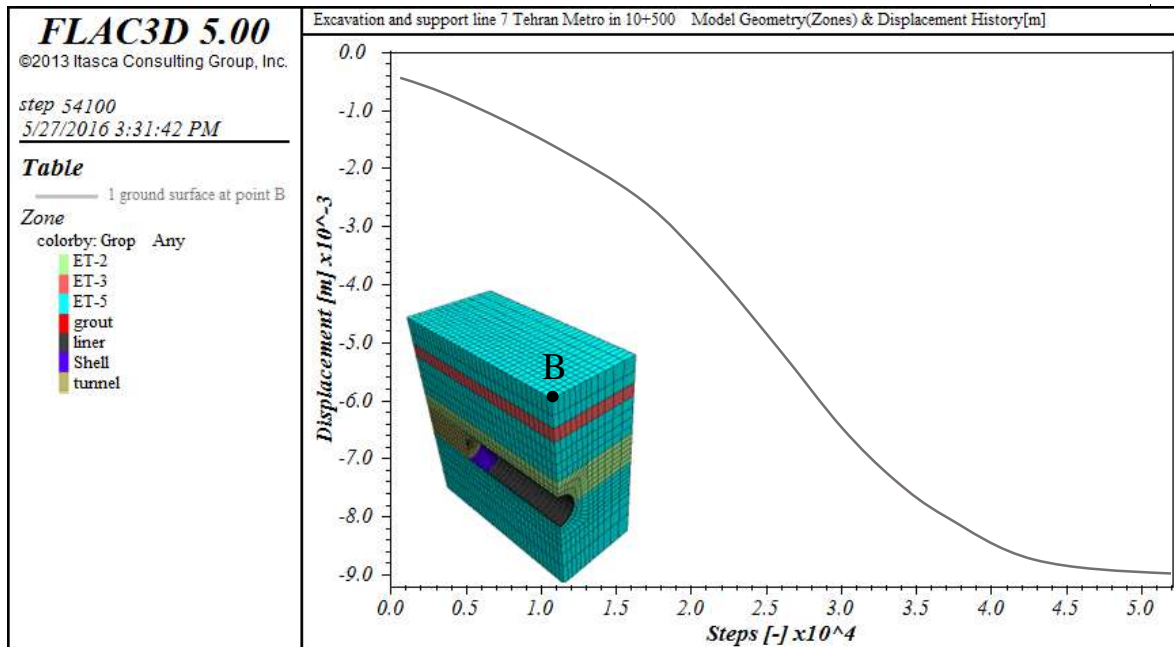
شکل (۳-۲۰) مدل ساخته شده و جابجایی نقطه A در برابر گام زمانی در کیلومترهای ۱۰+۵۵۰ را نشان می‌دهد. تغییرات نشست در نقطه A که دارای فاصله ۲/۴ متری از خط مرکزی تونل است، طبق مدل‌سازی عددی پس از عبور تونل به اندازه ۳۵ متری به ۸/۲ میلی‌متر رسیده است.



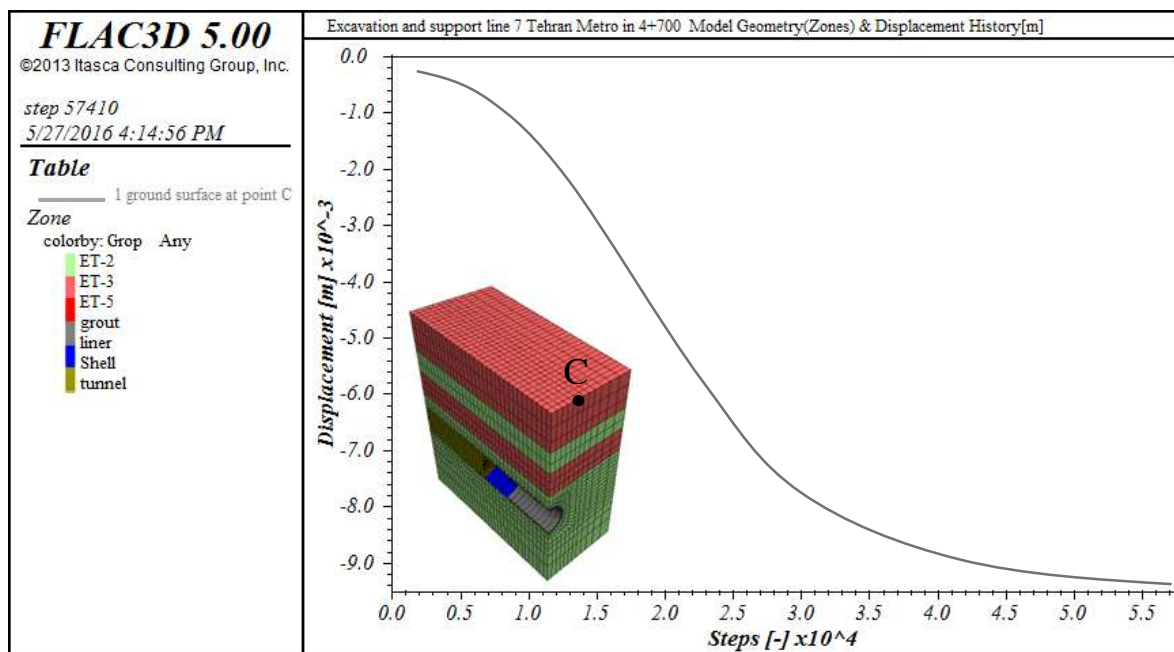
شکل (۳-۲۰): مدل ساخته شده از کیلومترهای ۱۰+۵۵۰ و تغییرات نشست نقطه A نسبت به گام زمانی پس از عبور تونل به اندازه ۳۵ متر

همین‌طور شکل‌های (۳-۲۱) و (۳-۲۲) مدل ساخته شده و تغییرات جابجایی نقاط B و C در کیلومترهای ۱۰+۵۰۰ و ۴+۷۰۰ را نسبت به گام زمانی نشان می‌دهند. مقدار جابجایی نقطه B که روی تاج تونل در سطح زمین واقع شده است و نقطه C که در فاصله جانبی ۴/۱ متری از خط مرکزی تونل روی سطح زمین قرار گرفته است، طبق مدل‌سازی عددی انجام شده پس از عبور تونل به اندازه ۳۰ متر از نقطه B و ۲۵ متر از نقطه C، به ترتیب معادل ۸/۹۵ و ۹/۱ میلی‌متر است. با توجه به جدول (۳-۱۳) و مقایسه نتایج حاصل از ابزار دقیق نصب شده در هر یک از مقاطع با نتایج مدل‌سازی عددی می‌توان از صحت روند مدل‌سازی و نتایج آن اطمینان حاصل نمود.





شکل (۳-۲۱): مدل ساخته شده از کیلومتر ۱۰+۵۰۰ و تغییرات نشست نقطه B نسبت به گام زمانی پس از عبور تونل به اندازه ۳۰ متر



شکل (۳-۲۲): مدل ساخته شده از کیلومتر ۴+۷۰۰ و تغییرات نشست نقطه A نسبت به گام زمانی پس از عبور تونل به اندازه ۲۵ متر

جدول (۳-۱۳): مقایسه نتایج حاصل از ابزاربندی و مدل‌سازی عددی کیلو مترهای ۱۰+۵۵۰، ۱۰+۵۰۰ و ۴+۷۰۰

مقدار نشست نقاط مبنا در سطح زمین (mm)		فشار تزریق (KPa)	فشار جبهه کار (KPa)	کیلو مترهاژ
مدل‌سازی عددی	ترازیاب سطحی			
۸/۲	۵/۵	۱۲۰	۷۰	۱۰+۵۵۰
۸/۹۵	۴/۵	۱۱۰	۶۰	۱۰+۵۰۰
۹/۱	۶/۷	۲۸۰	۱۸۰	۴+۷۰۰

### ۳-۳- جمع‌بندی

در این فصل ابتدا مقدمه‌ای راجع به روش‌های عددی بیان گردید و سپس نرم‌افزار مورد استفاده در مطالعه حاضر ( $FLAC^{3D}$ ) و روش عددی مربوط به آن (تفاضل محدود) توضیح داده شد. محدوده مطالعه حاضر، از نظر زمین‌شناسی و هندسی مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه روند طی شده در مدل‌سازی، شامل ساخت هندسه مدل، تعیین مدل رفتاری، اعمال تنش‌ها و شرایط اولیه مورد بحث قرار گرفت. در انتها به بررسی صحت روند مدل‌سازی شمع، با استفاده از مطالعه و شبیه‌سازی عددی آزمایش‌ها بارگذاری محوری انجام شده توسط کومودروموس و بارگذاری جانبی انجام شده توسط ریسه پرداخته شد. صحت روند مدل‌سازی تونل نیز با استفاده از داده‌های ابزار دقیق سه مقطع ۱۰+۵۵۰، ۱۰+۵۰۰ و ۴+۷۰۰ مورد بررسی قرار گرفت. در فصل آتی پایان نامه به تحلیل و بررسی تاثیر تونل بر رفتار شمع از نظر جابجایی و پایداری پرداخته شده است.

## ۴- فصل چهارم

### بحث و تحلیل نتایج

#### ۴-۱- مقدمه

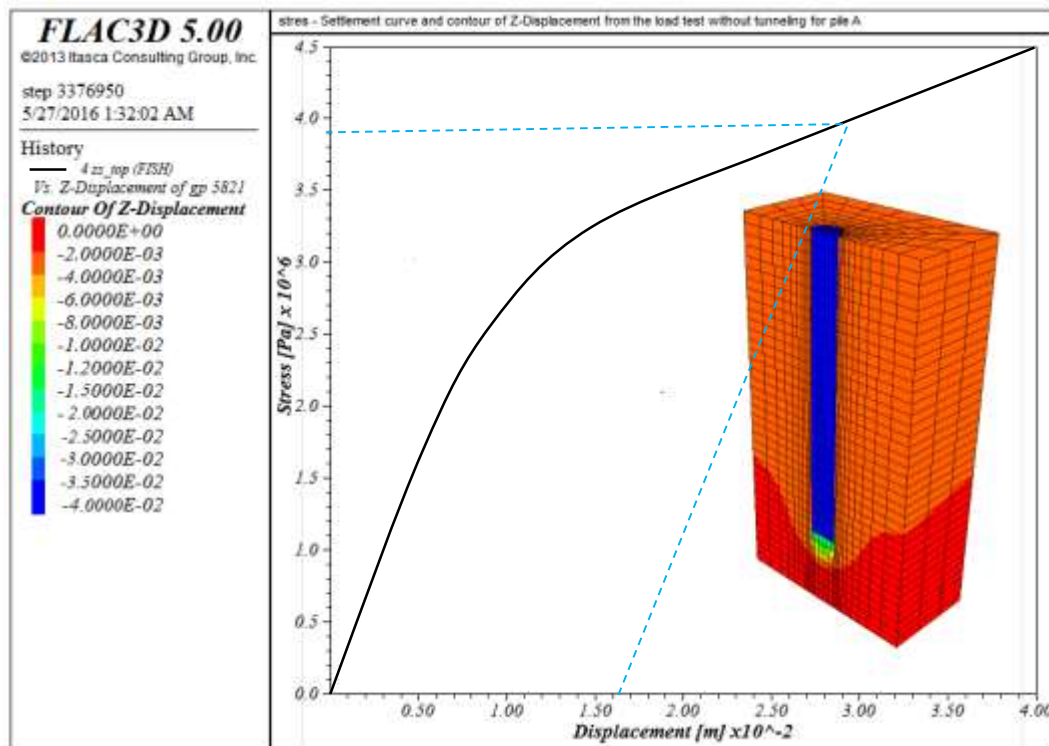
حفر تونل در مناطق شهری با توجه به عمق کم قرارگیری تونل، منجر به ایجاد تغییراتی در تنش و گسترش نشست تا سطح زمین می‌شود. آزادسازی تنش به واسطه عبور تونل در مجاورت شمع، در وهله اول منجر به ایجاد نشست می‌گردد. تغییر در مکانیزم انتقال بار و کاهش ظرفیت باربری شمع‌های مجاور تونل، از دیگر معضلات محتمل حفاری تونل در مجاورت شمع است. در این فصل تغییرات ایجاد شده در شمع، ضمن عبور تونل در چند مرحله مورد بررسی قرار گرفته است. در مرحله اول، ظرفیت باربری محوری و جانبی شمع‌های نگهدارنده پل، مورد ارزیابی قرار گرفت. در مرحله دوم تغییرات نشست، جابجایی جانبی، بار پاشنه و مقاومت جداری شمع، ضمن فرآیند تونل سازی و با اعمال بارکاری بر شمع‌های مجاور تونل مورد بررسی قرار گرفت. در مرحله سوم تحلیل تغییرات ظرفیت باربری شمع‌های مجاور پس از حفر تونل بررسی شد. به منظور بررسی تاثیرات ناشی از تغییر عمق قرارگیری تونل بر موارد مورد تحلیل، عمق تونل دو مرتبه و در هر بار به اندازه نیم برابر قطر تونل افزایش داده شد. به نحوی که  $H_T/D_T$  در حالت اول  $3/5$ ، در حالت دوم  $4/5$  است و مراحل دوم و سوم بار دیگر مورد بررسی قرار گرفتند.

#### ۴-۲- مرحله اول تحلیل

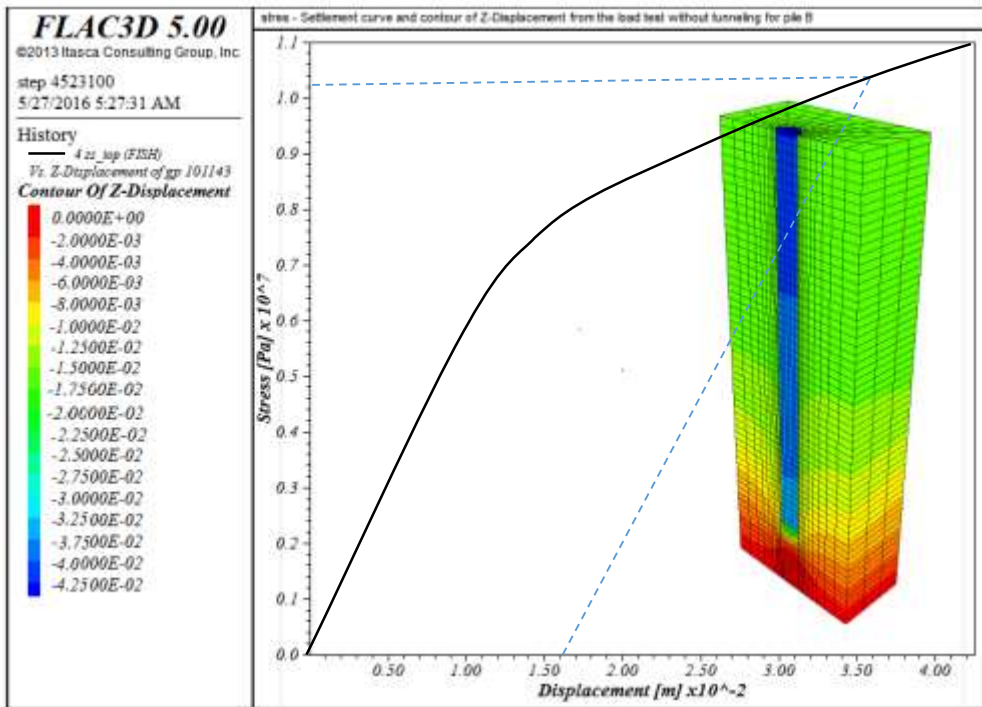
مرحله اول تحلیل به بررسی ظرفیت باربری جانبی و محوری شمع‌های حاضر در محدوده اختصاص دارد. برای مقایسه ظرفیت باربری شمع قبل و بعد از حفر تونل، لازم است تا ظرفیت باربری محوری و جانبی شمع‌های محدوده تعیین گردند. برای این منظور با ساخت سه مدل مجزا برای شمع‌های ۱۲ متری، ۲۵ متری و ۱۵ متری که هر کدام نماینده یکی از شمع‌های ردیف‌های A، B و C محسوب می‌شوند، اقدام به بررسی ظرفیت باربری محوری و جانبی شمع‌های حاضر در محدوده مورد بحث گردید و با استفاده از مقادیر ظرفیت باربری مجاز، نشست و جابجایی جانبی مجاز شمع‌ها مورد بررسی قرار گرفت.

#### ۴-۲-۱- بررسی ظرفیت باربری محوری شمع

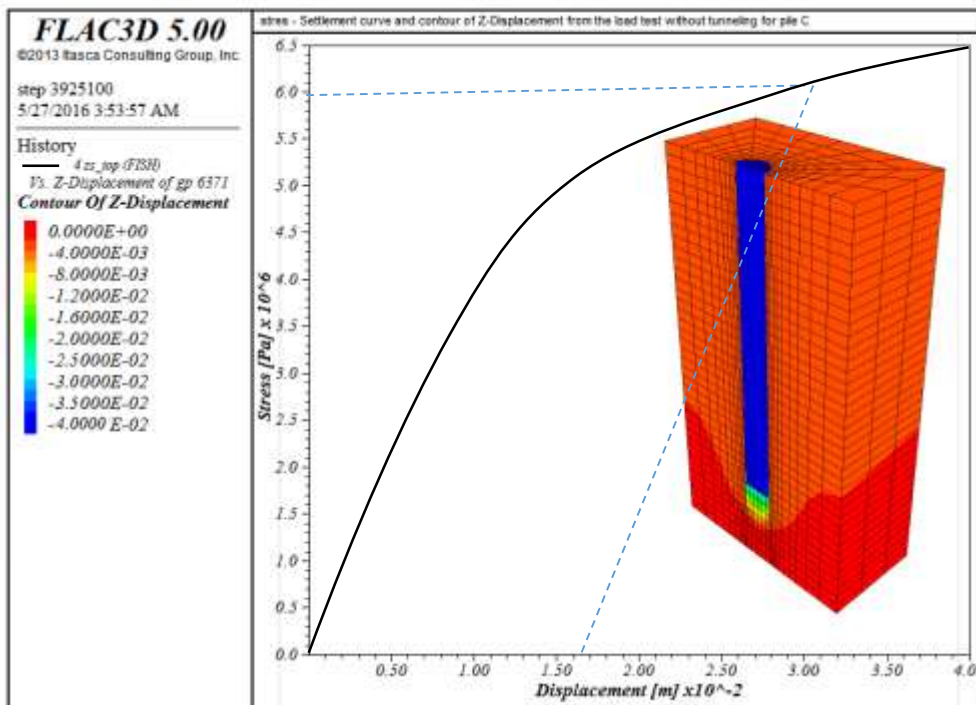
برای محاسبه ظرفیت باربری محوری، مقادیر تنش بطور تدریجی در نوک شمع افزایش داده شده و بصورت نمودارهای تنش - نشست در شکل های (۱-۴)، (۲-۴) و (۳-۴) برای شمع های معرف ردیف های A، B و C قابل مشاهده است. از روش حدی دیویسون (۱۹۷۲) برای محاسبه ظرفیت باربری محوری استفاده شده است. همان طور که پیش تر در بخش ۲-۵-۳ روش های برآورد ظرفیت باربری محوری از روی منحنی تنش - نشست شرح داده شد، در روش حدی دیویسون، ظرفیت باربری محوری شمع، متناظر با میزان تنش یا باری است که از محل برخورد خطی که از مبدا مختصات به فاصله ۰/۱۵ اینچ (۴ میلی متر) بعلاوه قطر شمع (برحسب میلی متر) تقسیم بر ۱۲۰ و با شیبی برابر با قسمت الاستیک اولیه نمودار تنش - نشست شمع، رسم می شود. شکل های (۱-۴) تا (۳-۴) منحنی تنش - نشست و خط حدی دیویسون را نشان می دهد.



شکل (۱-۴): منحنی تنش - نشست و کنتور جابجایی عمودی برای شمع معرف شمع های ردیف A



شکل (۲-۴): منحنی تنش - نشست و کنتور جابجایی عمودی برای شمع معرف شمع‌های ردیف B



شکل (۳-۴): منحنی تنش - نشست و کنتور جابجایی عمودی برای شمع معرف شمع‌های ردیف C

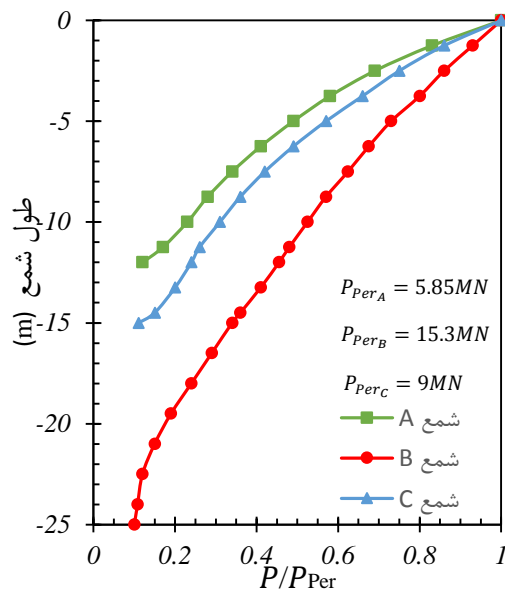
با توجه به منحنی‌های تنش - نشست به دست آمده و طبق روش حدی دیویسون ظرفیت باربری محوری برای هر یک از شمع‌ها محاسبه و با توجه به رابطه (۲-۴) و اعمال ضریب ایمنی ۳ (آشتو<sup>۱</sup> ۲۰۰۲) تنش مجاز و مقادیر جابجایی متناظر تنش مجاز که آن را جابجایی مجاز می‌نامیم، برای هر یک از شمع‌های معرف ردیف‌های A، B و C در جدول (۴-۱) قابل مشاهده است.

جدول (۴-۱): ظرفیت باربری محوری، تنش و جابجایی مجاز شمع‌های هر ردیف

شمع	ظرفیت باربری محوری (MPa)	تنش مجاز (MPa)	جابجایی مجاز (mm)
A	۳/۹	۱/۳	$\delta_{i_A}=3/9$
B	۱۰/۲	۳/۴	$\delta_{i_B}=5/8$
C	۶	۲	$\delta_{i_C}=4/7$

با اعمال تنشی به اندازه ظرفیت باربری هر یک از شمع‌ها، نیروی محوری در طول شمع مورد بررسی قرار گرفت که نتایج حاصل از آن برای هر سه شمع معرف ردیف شمع‌های موجود در شکل (۴-۱۴) قابل مشاهده است. تغییرات نیروی محوری در طول شمع بر حسب نسبت نیروی محوری اعمال شده بر نوک شمع ( $P_{Per}$ ) بر نیروی محوری در طول شمع (P) نرمالایز گردیده است. بررسی تغییرات نشان می‌دهد قبل از حفر تونل، بخش اعظم نیروی محوری بر نیمه بالایی بدنه شمع وارد شده و بخش بسیار اندکی از نیروی محوری به پاشنه شمع می‌رسد. این مقادیر برای شمع‌های معرف ردیف‌های شمع A، B و C به ترتیب برابر با ۰/۱۲، ۰/۱ و ۰/۱۱ نیروی محوری نوک شمع است که حاکی از انتقال کمتر از ۱۵٪ نیروی وارده بر نوک شمع به پاشنه آن و اصطکاکی بودن شمع‌های محدوده می‌باشد.

<sup>۱</sup> ASHTOO

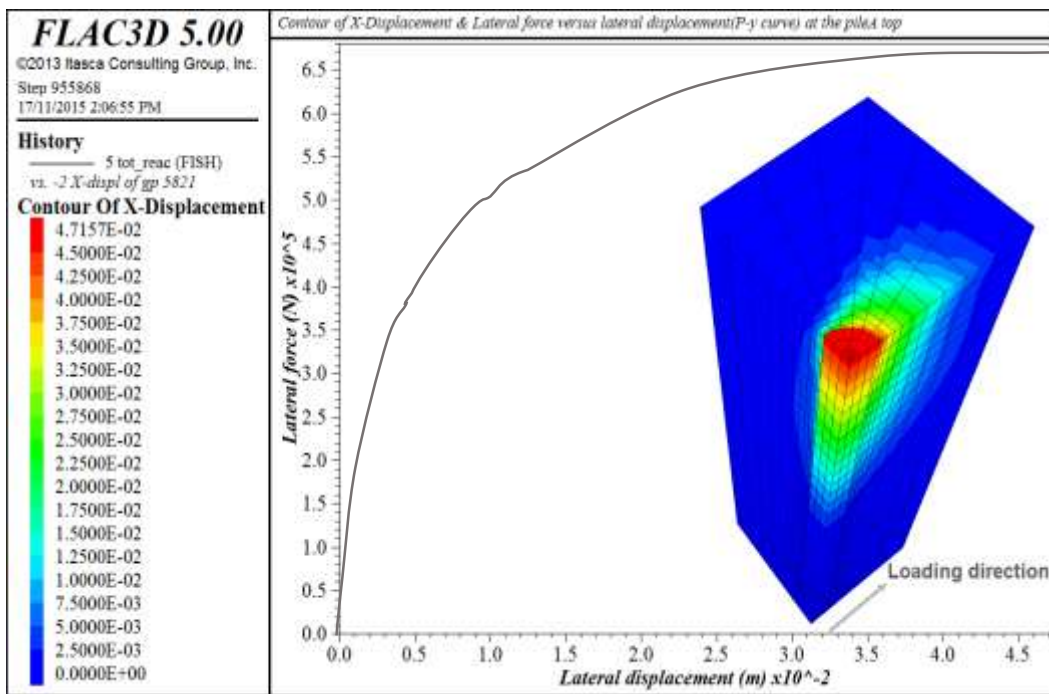


شکل (۴-۴): تغییرات نیروی محوری در طول شمع‌های محدوده مورد بررسی در تحلیل مرحله اول

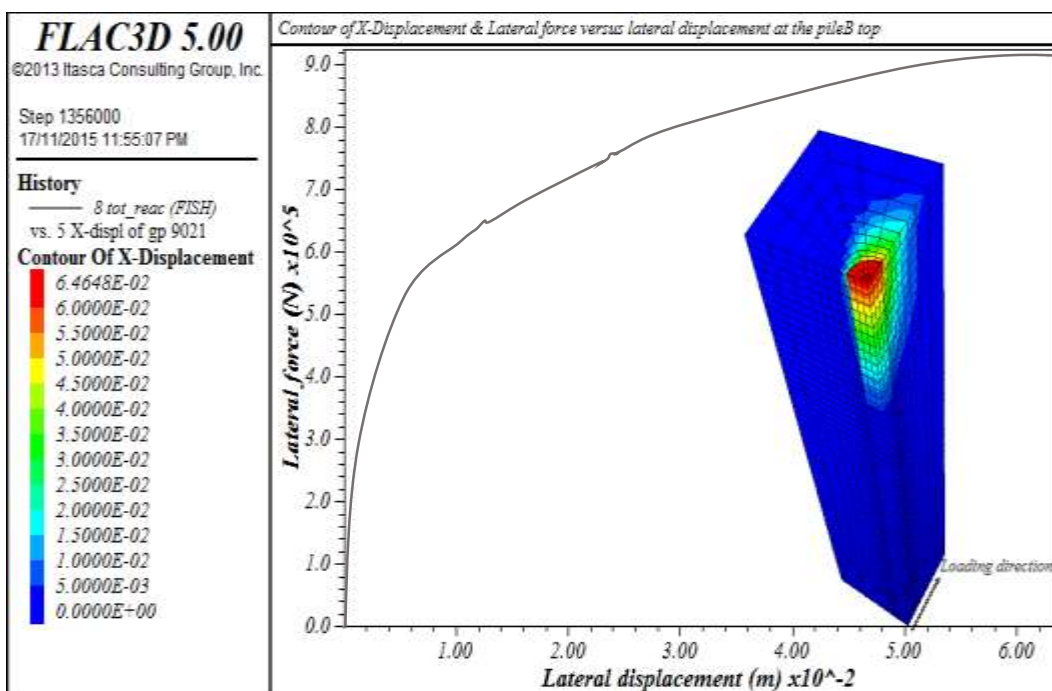
#### ۴-۲-۲- بررسی ظرفیت باربری جانبی

عبور تونل علاوه بر جابجایی در جهت عمودی، منجر به ایجاد جابجایی افقی در خاک می‌شود. همین امر سبب وارد آمدن نیروهای جانبی به شمع و تغییر شکل جانبی می‌شود. طبق معیار برامز که در بخش ۲-۴-۵-۱ به آن پرداخته شد، شمع‌های محدوده، از نوع شمع‌های بلند محسوب می‌گردند و می‌توان از روش منحنی P-y (منحنی نیروی جانبی- تغییر مکان جانبی شمع) برای تعیین ظرفیت باربری جانبی شمع‌ها استفاده کرد. طبق آیین‌نامه آشتو (۲۰۰۲) ظرفیت باربری جانبی شمع، حدی از بار است که با افزایش آن، جابجایی به سرعت و بدون افزایش بار، افزایش می‌یابد. به این ترتیب با استفاده از روش منحنی P-y و افزایش تدریجی بار افقی و پایش جابجایی جانبی نوک شمع، می‌توان محدوده مجاز جابجایی جانبی شمع را نیز تعیین کرد. شکل‌های (۴-۵) تا (۴-۷) نمودارهای P-y برای هر یک از شمع‌های معرف ردیف‌های شمع محدوده را نشان می‌دهد. جدول (۴-۲) ظرفیت باربری جانبی و مقدار جابجایی جانبی متناظر با ظرفیت باربری جانبی را نشان می‌دهد که کمترین مقدار آن‌ها به عنوان جابجایی مجاز جانبی در نظر گرفته شده.

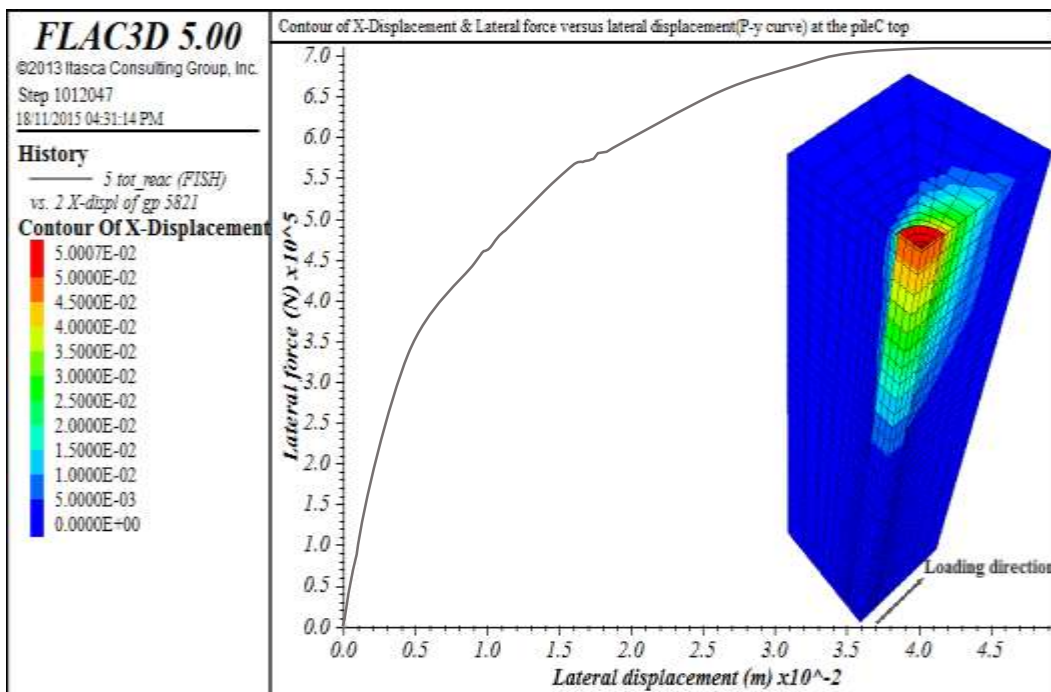




شکل (۴-۵): کنتور جابجایی در جهت نیروی وارده و منحنی نیروی جانبی - جابجایی جانبی در نوک شمع معرف شمع‌های ردیف A



شکل (۴-۶): کنتور جابجایی در جهت نیروی وارده و منحنی نیروی جانبی - جابجایی جانبی در نوک شمع معرف شمع‌های ردیف B



شکل (۴-۷): کنتور جابجایی در جهت نیروی وارده و منحنی نیروی جانبی - جابجایی جانبی در نوک شمع معرف شمع‌های ردیف C

جدول (۴-۲): ظرفیت باربری جانبی و مقدار مجاز جابجایی شمع‌های معرف ردیف‌های شمع محدوده

C	B	A	شمع معرف ردیف
۷/۱	۹/۲۲	۶/۷	ظرفیت باربری مجاز (KN)
۳/۹	۶	۳/۶	مقدار جابجایی متناظر (cm)

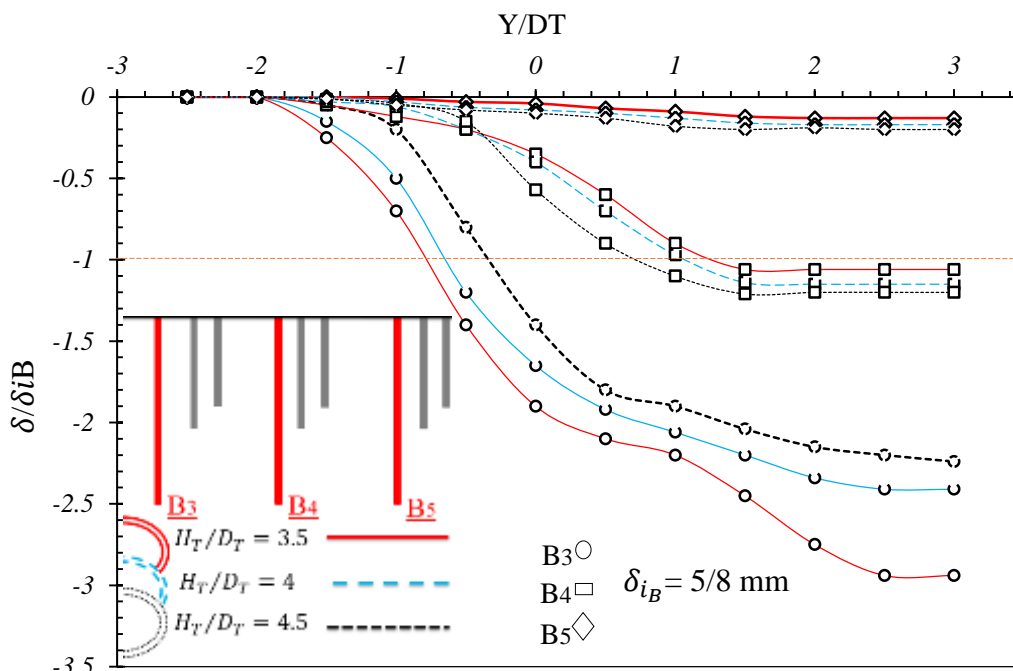
### ۴-۳ - مرحله دوم تحلیل

مرحله دوم تحلیل به بررسی تغییرات حاصل از فرآیند حفر و عبور تونل بر روی نشست، جابجایی جانبی، تغییرات بارمحوری پاشنه و مقاومت جداری شمع اختصاص دارد. در این مرحله با اعمال مقدار بارمحوری مجاز به دست آمده از تحلیل مرحله اول بر شمع‌های مجاور تونل، تغییرات حاصل در اثر عبور تونل در سه نسبت مختلف  $H_T/D_T$  مورد بررسی قرار گرفته است.

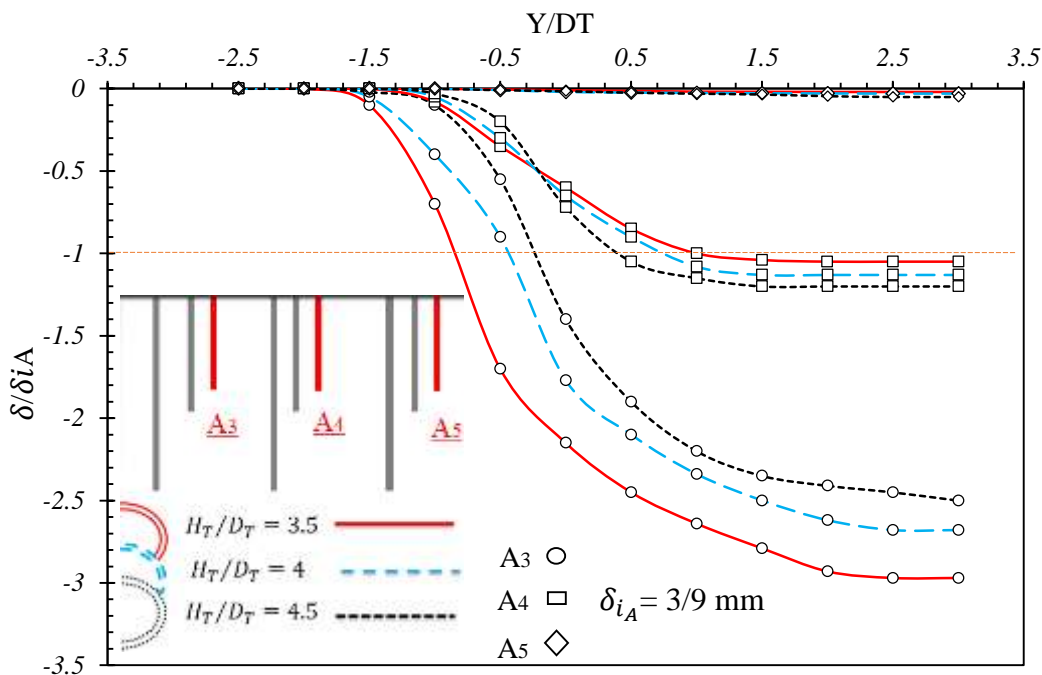
#### ۴-۳-۱- تغییرات نشست نوک شمع ضمن عبور تونل

حفر تونل در عمق نزدیک به سطح زمین می‌تواند منجر به نشست سطح و سازه‌های قرار گرفته روی سطح زمین گردد. با توجه به تعداد زیاد شمع‌های حاضر در منطقه مورد بحث و نیز هم‌پوشانی شمع‌ها از لحاظ طول و فاصله جانبی با مرکز تونل، سه شمع  $B_3, B_4, B_5$  و با فاصله جانبی  $0.4, 0.6$  و  $0.7$  برابر قطر تونل از مرکز تونل، از ردیف B و سه شمع  $A_3, A_4, A_5$  با فاصله جانبی  $1, 2$  و  $3/2$  برابر قطر تونل از مرکز تونل، از ردیف A به‌منظور بررسی تغییرات نشست در نوک شمع ضمن پیشروی تونل در سه حالت مختلف، انتخاب شد.

شکل (۴-۸) و (۴-۹) تغییرات نشست نوک شمع‌های ردیف‌های A و B را ضمن پیشروی تونل در سه حالت مختلف نشان می‌دهد. مقادیر نشست نوک شمع ( $\delta$ ) نسبت به نشست مجاز شمع ( $\delta_i$ ) و فاصله جبهه حفاری تونل تا شمع در راستای پیشروی تونل ( $Y$ ) با قطر تونل ( $D_T$ ) نرمالیز شده است.



شکل (۴-۸): تغییرات نشست نوک شمع‌های  $B_3, B_4, B_5$  ضمن عبور تونل از سه حالت مختلف



شکل (۴-۹): تغییرات نشست نوک شمع‌های  $A_5$  و  $A_4$ ,  $A_3$  ضمن پیشروی تونل از سه عمق مختلف

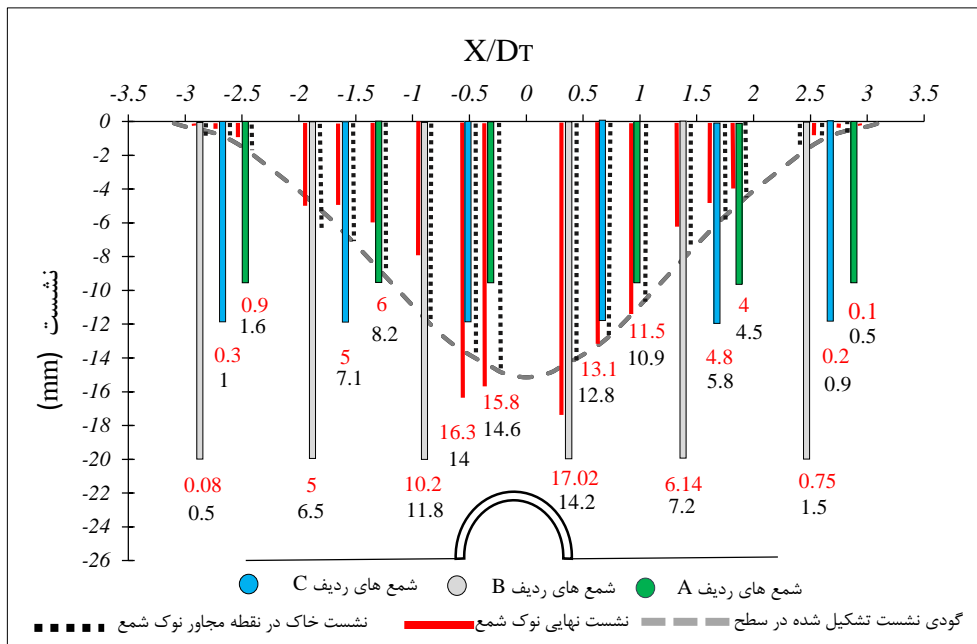
با بررسی شمع‌های ردیف B در حالت اول، می‌توان دریافت، زمانی که جبهه کار تونل در فاصله‌ای دورتر از شمع‌ها و به اندازه  $2/5 D_T$  قرار دارد، مقادیر نشست برای تمامی شمع‌های ردیف، بسیار اندک و قابل اغماض است. شمع  $B_3$  که در نزدیک‌ترین فاصله جانبی نسبت به مرکز تونل واقع است، بیش‌ترین نشست، نسبت به مقدار مجاز ( $\delta_{iB}$ ) را در میان شمع‌های این ردیف نشان می‌دهد. با پیشروی تونل و قرارگیری در فاصله  $2 D_T$  از شمع، نشست روندی افزایشی را آغاز می‌کند و با عبور تونل به اندازه  $2/5 D_T$  از زیر شمع  $B_3$ ، نشست به مقدار ثابتی ( $2/94 \delta_{iB}$ ) می‌رسد. افزایش فاصله جانبی شمع از مرکز تونل منجر به کوتاه‌تر شدن محدوده تاثیر تونل در راستای طولی و کاهش مقدار نشست نوک شمع شده است. طول محدوده اثر تونل‌سازی برای شمع  $B_4$ ،  $1/5 D_T < Y < 1/5 D_T$  و مقدار نشست نهایی شمع  $1/06 \delta_{iB}$  است. شمع  $B_5$  که در دورترین فاصله جانبی نسبت به مرکز تونل قرار دارد، در مقایسه با دو شمع  $B_3$  و  $B_4$  در محدوده کوچک‌تری از تونل تاثیر می‌پذیرد. این محدوده برابر با  $1/5 D_T < Y < 1/5 D_T$  است و پس از عبور تونل، شمع  $B_5$  به اندازه  $0.22 \delta_{iB}$

نشست می‌کند. افزایش  $H_T/D_T$  به ۴ و ۴/۵ منجر به تغییرات اندک در جهت کوتاه شدن محدوده تاثیر تونل در تمامی شمع‌های ردیف B با فواصل جانبی مختلف نسبت به مرکز تونل می‌شود.

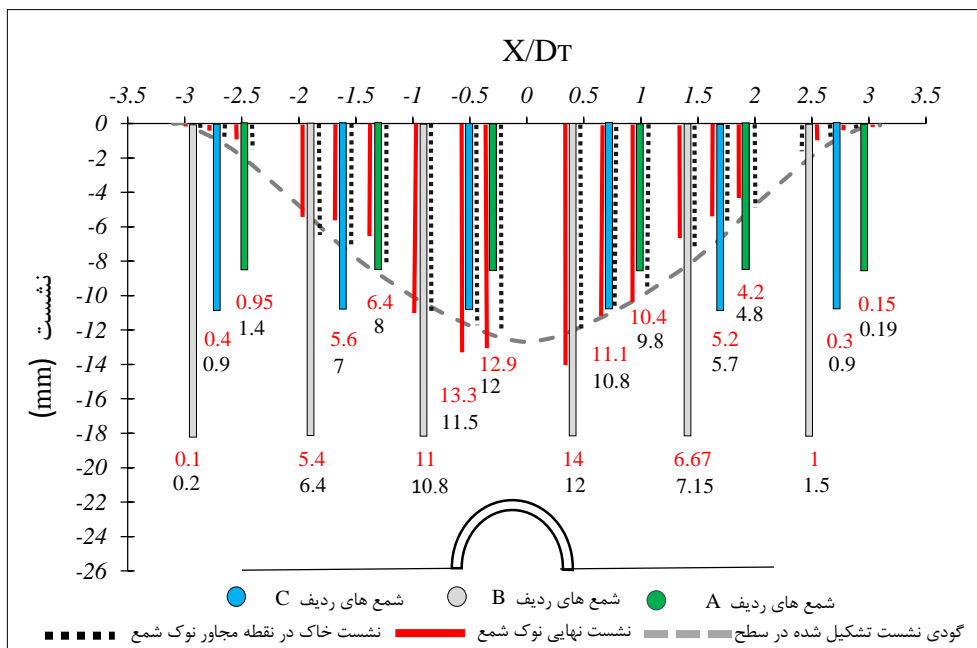
تغییرات نشست شمع‌های ردیف A، ضمن عبور تونل روندی مشابه شمع‌های ردیف B را نشان می‌دهد. شمع‌های ردیف A که نسبت  $L_p/H_T$  کوچکتری در مقایسه با شمع‌های ردیف B دارند، در تمامی حالت‌های مورد بررسی، در محدوده کوچک‌تری نسبت به شمع‌های ردیف B، از عبور تونل تاثیر می‌پذیرند. ضمن اینکه شمع  $A_5$  که در فاصله جانبی ۳/۲ برابر قطر تونل از مرکز تونل قرار دارد، متحمل کمترین نشست ( $0.03\delta_{iA}$ ) در هر سه حالت عبور تونل می‌شود که این مقدار از نشست مجاز شمع‌های ردیف A کمتر است.

با توجه به بررسی مقادیر نشست شمع‌های ردیف A و B در سه حالت مختلف، می‌توان نتیجه گرفت پس از عبور تونل به اندازه ۲/۵ برابر قطر تونل در مسیر پیشروی از زیر شمع، تغییرات نشست نوک شمع‌ها به مقدار ثابتی می‌رسد. از این‌رو، مقادیر نشست نوک شمع‌های مورد بررسی پس از عبور تونل به اندازه ۲/۵ برابر قطر به عنوان نشست نهایی نوک شمع در نظر گرفته شده و با مقدار نشست سطح زمین در نقطه مجاور شمع، مورد مقایسه قرار گرفت است. شکل‌های (۴-۱۰) تا (۴-۱۲) نشست نهایی نوک شمع و نشست خاک در مجاورت شمع را نشان می‌دهد. در این شکل‌ها فاصله جانبی قرارگیری شمع نسبت به مرکز تونل (X)، با قطر تونل ( $D_T$ ) نرمالایز شده است.

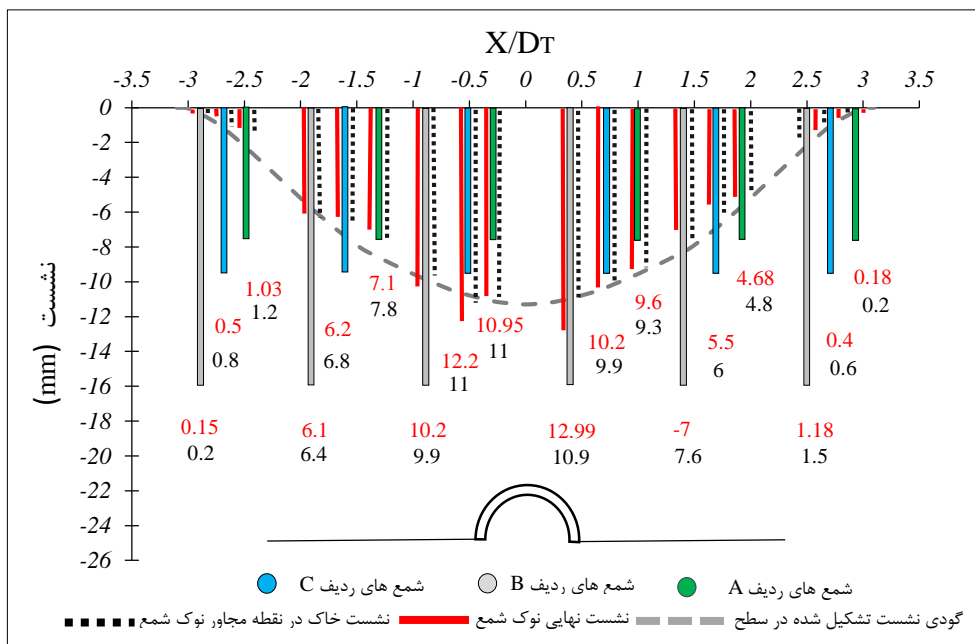
شمع‌های مجاور تونل از منظر نشست، نسبت به افزایش عمق قرارگیری تونل، دو رفتار کلی را از خود نشان داده‌اند. از میان شمع‌های واقع در محدوده  $-1D_T < X < 1D_T$ ، به جز شمع  $B_2$  که در  $X=0.19D_T$  واقع شده است، با افزایش  $H_T/D_T$ ، از میزان نشست نهایی نوک شمع کاسته شده است. در حالی که نشست نهایی نوک شمع‌های خارج از محدوده  $-1D_T < X < 1D_T$ ، با افزایش  $H_T/D_T$ ، افزایش یافته است.



شکل (۴-۱۰): نشست نوک شمع‌های محدوده و خاک مجاور شمع، پس از عبور تونل به اندازه  $2/5 D_T$  در راستای پیشروی در  $H_T/D_T = 3/5$



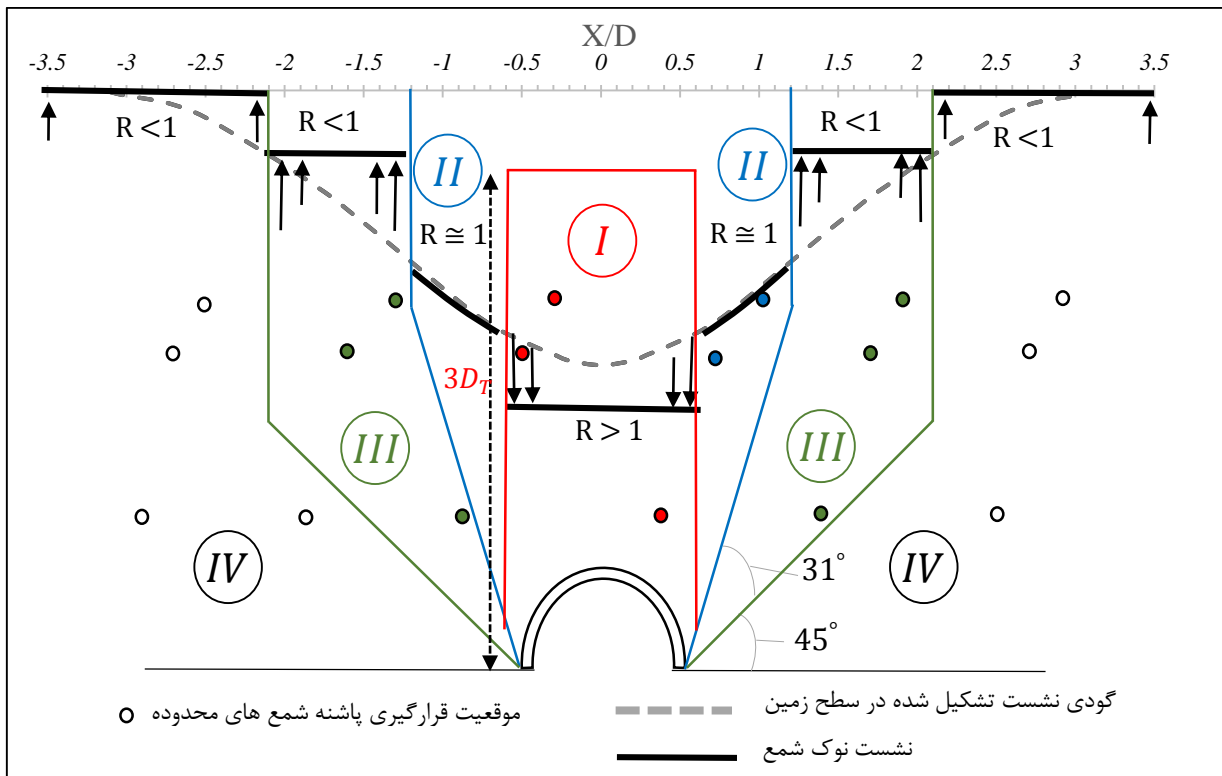
شکل (۴-۱۱): نشست نوک شمع‌های محدوده و خاک مجاور شمع، پس از عبور تونل به اندازه  $2/5 D_T$  در راستای پیشروی در  $H_T/D_T = 4$



شکل (۴-۱۲): نشست نوک شمع‌های محدوده و خاک مجاور شمع، پس از عبور تونل به اندازه  $2/5 D_T$  در راستای پیشروی در  $H_T/D_T = 4/5$

در صورتی که نسبت مقدار نشست نهایی نوک شمع را به مقدار نشست خاک مجاور با ضریب  $R$  تعریف شود، می‌توان با توجه به موقعیت قرارگیری پاشنه شمع‌های مجاور تونل، چهار محدوده را از نظر تاثیر عبور تونل بر نشست نوک شمع و خاک در نقطه مجاور نوک شمع مشخص کرد. چهار محدوده تاثیر مشخص شده در شکل (۴-۱۳) قابل مشاهده است.

محدوده اول (I) روی تاج تونل ( $0.16 D_T < X < 0.16 D_T$ ) قرار دارد و به اندازه  $2 D_T$  از محور مرکزی تونل تا سطح زمین گسترش یافته است. شمع‌هایی که پاشنه آن‌ها در محدوده I قرار دارد، نشست بیشتری نسبت به نشست سطح زمین در مجاورت شمع نشان می‌دهند ( $R > 1$ ). نشست نهایی نوک شمع‌هایی که پاشنه آن‌ها در محدوده I قرار گرفته است، با عبور تونل در هر سه حالت، بیش از شمع‌های حاضر در سایر محدوده‌ها بوده و به  $2/2$  تا  $4$  برابر نشست مجاز شمع رسیده است. افزایش عمق عبور تونل، منجر به کاهش نشست در نوک شمع‌های حاضر در این محدوده می‌شود.



شکل (۴-۱۳): محدوده‌های تاثیر عبور تونل از مجاورت شمع‌ها از منظر نشست ایجاد شده در شمع

محدوده دوم (II) با زاویه  $\varphi + 45^\circ$  نسبت به خط افق، از جداره تونل آغاز و تا محدوده  $0.16D_T < |X| < 1/2D_T$  در سطح زمین ادامه می‌یابد. شمع‌هایی که پاشنه آن‌ها در این محدوده قرار دارد، نشست تقریباً معادل نشست سطح زمین در مجاورت شمع دارند ( $R \approx 1$ ). نشست در شمع‌های واقع در این محدوده از حد مجاز بیشتر است اما مقادیر نشست در مقایسه با محدوده I مقادیر نشست تعدیل یافته است. شمع‌های این محدوده نیز با افزایش عمق قرارگیری تونل، در نشست نهایی نوک شمع، کاهش نشان می‌دهند.

محدوده سوم (III) با زاویه  $45^\circ$  درجه نسبت به خط افق، از جداره تونل آغاز و تا محدوده  $1/2D_T < |X| < 2/1D_T$  در سطح زمین ادامه می‌یابد. شمع‌های که پاشنه آن‌ها در این محدوده قرار می‌گیرد، رفتاری متمایز با دو محدوده I و II نشان می‌دهند. شمع‌های واقع در این محدوده اگر چه نشست بیش از نشست مجاز را متحمل می‌شوند

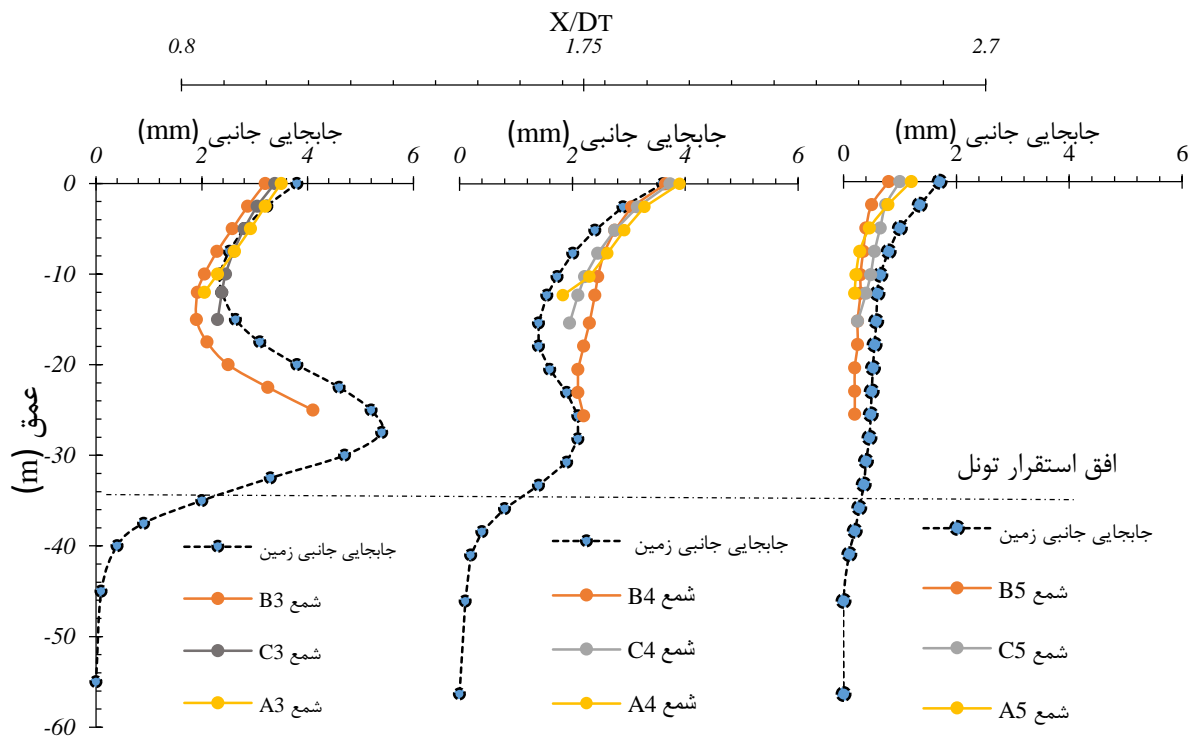


اما، به‌طور کلی مقادیر نشست نهایی نوک شمع، از نشست سطح زمین در نقطه مجاور شمع کمتر است ( $R < 1$ ). با افزایش عمق قرارگیری تونل، نشست نهایی نوک شمع‌های واقع در این محدوده به تدریج افزایش می‌یابد. محدوده چهارم (IV) با زاویه ۴۵ درجه نسبت به خط افق، از جداره تونل آغاز و در محدوده  $|X| > 2/1D_T$  گسترش یافته است. رفتار شمع‌های این محدوده شبیه رفتار محدوده III است. تنها تمایز این دو محدوده را می‌توان تجاوز نکردن نشست نهایی نوک شمع‌ها از مقدار مجاز دانست.

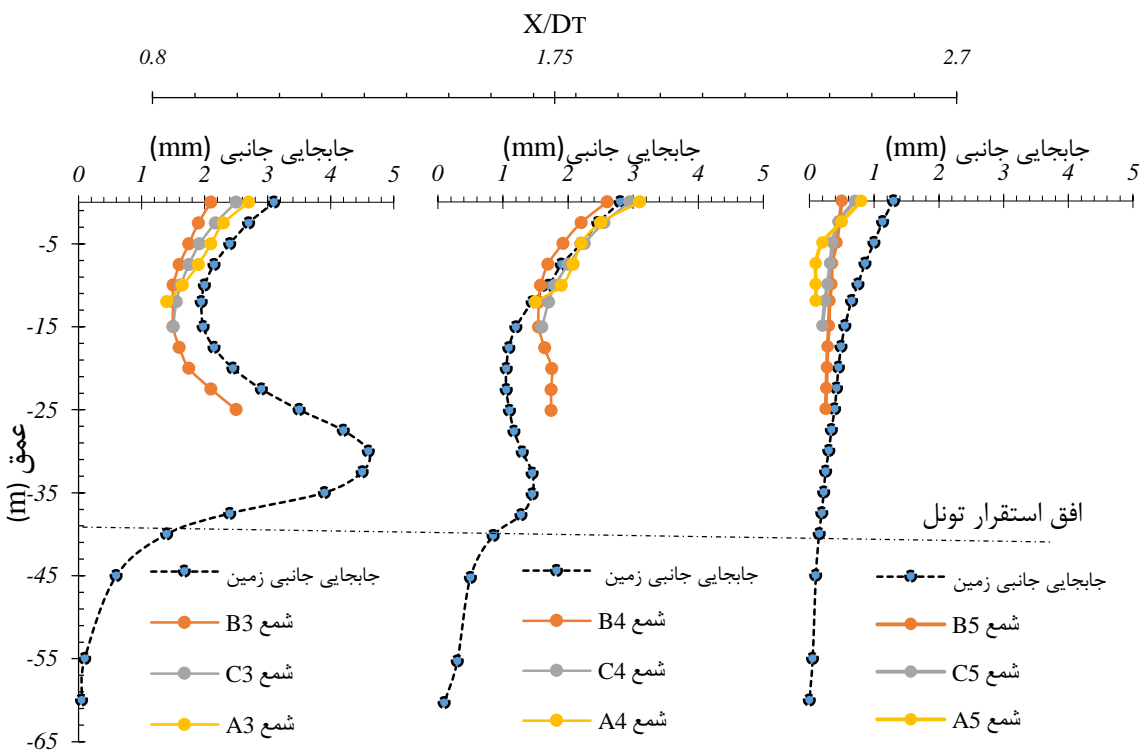
#### ۴-۳-۲- تغییر شکل جانبی شمع

چنگ و لونگ (۲۰۰۶) و یو (۲۰۱۳) با بررسی تغییر شکل حاصله از عبور تونل بر شمع‌های مجاور به این نتیجه دست یافتند که تغییر شکل رخ داده در بدنه شمع، در جهت عمود بر راستای پیشروی تونل، ۳ تا ۴ برابر تغییر شکل به وجود آمده در راستای پیشروی تونل است. لذا، به‌منظور بررسی تغییر شکل جانبی (در جهت عمود بر راستای پیشروی تونل)، شمع‌های واقع در نیمه راست تونل، پس از عبور تونل به اندازه  $2/5D_T$  از زیر شمع‌ها، در سه حالت مختلف مورد بررسی قرار گرفت. علاوه بر تغییر شکل جانبی ایجاد شده در بدنه شمع‌ها، پروفیل جابجایی جانبی خاک نیز در فواصل جانبی  $0/18D_T$ ،  $1/5D_T$  و  $2/ND_T$  مورد بررسی قرار گرفت. شکل‌های (۴-۱۴) تا (۴-۱۶) تغییر شکل جانبی شمع‌های مورد نظر را در فواصل جانبی مختلف از مرکز تونل در سه عمق قرارگیری مختلف را نشان می‌دهد که میزان جابجایی به سمت مرکز تونل با مقدار مثبت نشان داده شده است.

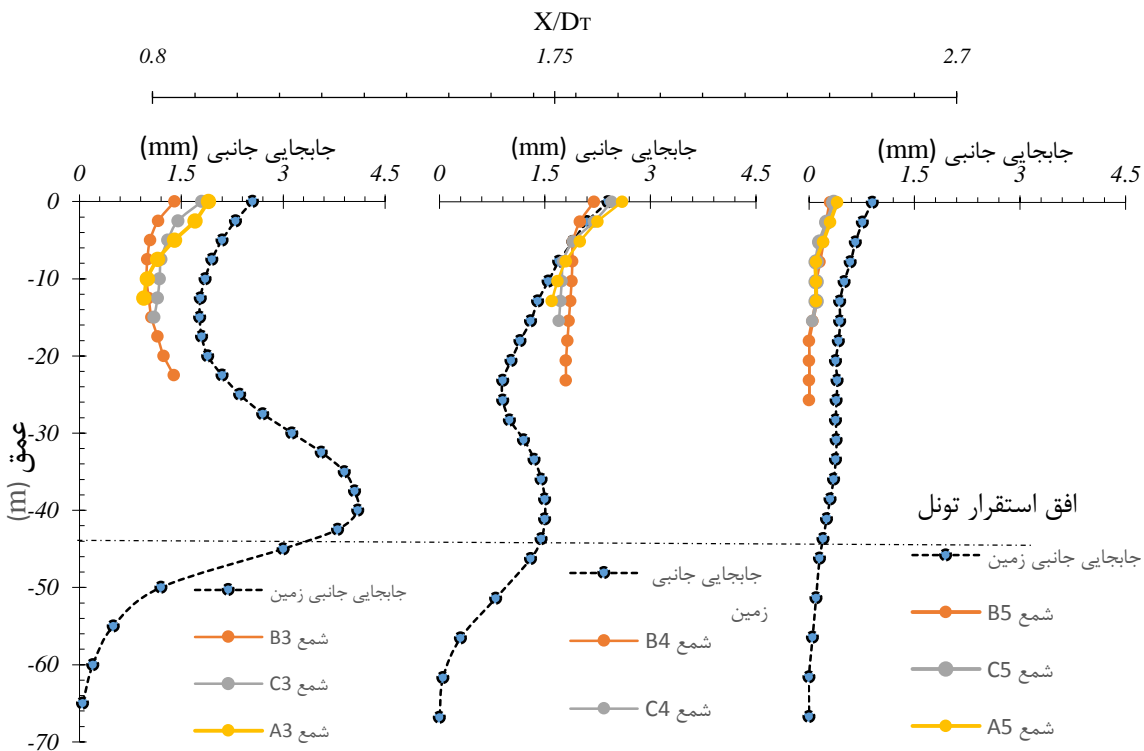
شکل تغییرات جانبی شمع به تغییر شکل جانبی خاک اطراف، فاصله جانبی شمع از مرکز تونل و نسبت‌های  $H_T/D_T$  و  $L_p/H_T$  وابسته است. بررسی حالت اول نشان می‌دهد که در فواصل جانبی نزدیک به تونل ( $0 < X < 1/2D_T$ )، تغییر شکل جانبی شمع بیش از بخش‌های دورتر است و با افزایش  $L_p/H_T$  در این قسمت، تغییر شکل در تمامی بدنه شمع خصوصاً پاشنه شمع، نمود پیدا می‌کند.



شکل (۴-۱۴): تغییر شکل جانبی شمع‌های مجاور تونل در حالت اول ( $H_T/D_T = 3/5$ )



شکل (۴-۱۵): تغییر شکل جانبی شمع‌های مجاور تونل در حالت دوم ( $H_T/D_T = 4$ )



شکل (۴-۱۶): تغییر شکل جانبی شمع‌های مجاور تونل در حالت سوم ( $H_T/D_T = 4/5$ )

بیشینه مقدار جابجایی جانبی در این قسمت، در پاشنه شمع  $B_3$  و به مقدار  $4/1$  میلی‌متر است. با افزایش فاصله جانبی شمع از مرکز تونل، مقادیر تغییر شکل کاهش می‌یابد. مقادیر تغییر شکل در بخش‌های تحتانی شمع ثابت و بخش اعظم تغییر شکل در قسمت نوک شمع رخ می‌دهد. در فواصل جانبی دورتر از تونل ( $2/4 D_T < X < 3 D_T$ ) تغییر شکل جانبی در بخش اعظمی از بدنه شمع ثابت شده است. بیشینه مقدار تغییر شکل در این قسمت، به اندازه  $1/2$  میلی‌متر و در نوک شمع  $A_5$  دیده می‌شود که به کمتر از نیمی از بیشینه تغییر شکل در شمع‌های مناطق نزدیک‌تر کاهش یافته است. با افزایش  $H_T/D_T$  از  $3/5$  تا  $4/5$ ، تغییر شکل جانبی شمع‌ها کاهش می‌یابد. بیشینه مقدار جابجایی جانبی شمع‌های مجاور تونل در حالت دوم  $3/1$  و در حالت سوم  $2/6$  میلی‌متر است که در شمع  $A_4$  رخ داده است. در حالت سوم، تاثیر عبور تونل بر شمع‌های

حاضر در محدوده جانبی  $2/4 D_T < X < 3 D_T$  از نظر تغییر شکل جانبی بدنه شمع، به حداقل رسیده و میزان تغییر شکل به صفر نزدیک شده است.

بیشینه جابجایی جانبی نوک شمع‌های مجاور تونل، در تمام حالت‌های مورد بررسی، با مقدار جابجایی جانبی مجاز نوک شمع که در تحلیل اول و بخش ۲-۲-۴ بدست آمده است، نشان می‌دهد جابجایی جانبی نوک شمع‌های منطقه مورد بحث از میزان مجاز عبور نمی‌کند.

### ۳-۳-۴ - تغییرات نیروی محوری در پاشنه شمع

به‌طور کلی نیروی محوری وارد بر پاشنه به عنوان ظرفیت باربری پاشنه قلمداد می‌شود (یو، ۲۰۱۳). عبور تونل منجر به نشست شمع و تغییر در نیروی محوری پاشنه شمع می‌گردد. تغییرات نیروی محوری پاشنه ضمن عبور تونل، در شمع‌های واقع در فاصله جانبی  $2/1 D_T < X < 2/1 D_T$  انجام شد و از بررسی شمع‌های خارج از این محدوده به دلیل نشست کمتر نسبت به نشست مجاز نظر شد. شکل‌های (۴-۱۷) تغییرات نیروی محوری پاشنه در شمع‌های ردیف A، B و C را ضمن عبور تونل در حالت  $H_T/D_T = 3/5$  نشان می‌دهد.

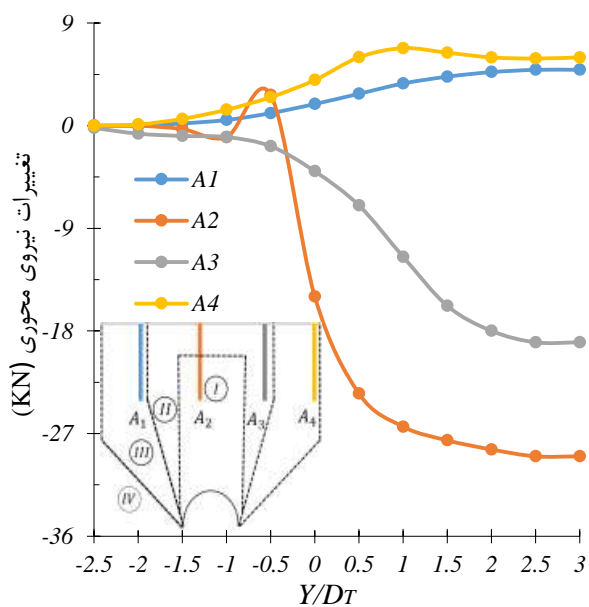
شمع‌های  $A_2$ ،  $B_3$  و  $C_2$  که پاشنه آن‌ها در محدوده I قرار دارد، بیش‌ترین افت نیروی محوری پاشنه را نسبت به سایر شمع‌های مجاور تونل نشان می‌دهند. تغییر نیروی محوری پاشنه در شمع‌های  $A_2$  و  $C_2$  با رسیدن تونل به  $Y = -1 D_T$  و برای شمع  $B_3$  با رسیدن تونل به  $Y = -0/5 D_T$  آغاز، و با عبور تونل به اندازه  $2/5 D_T$  از زیر شمع‌ها به حد ثابتی می‌رسد. شمع‌های حاضر در این محدوده ابتدا با رسیدن تونل به  $-1 D_T < Y < 0 D_T$  دچار افزایش در نیروی محوری پاشنه می‌شوند. مقدار این افزایش برای شمع‌های  $A_2$  و  $C_2$ ، ۲۷ و ۶ کیلونیوتن و برای شمع بلندتر حاضر در محدوده I،  $B_3$ ، ۲۶ کیلونیوتن می‌باشد که این افزایش نیروی

محوری را می‌توان ناشی از تاثیر فشار سینه‌کار تونل در نزدیکی شمع‌ها دانست. با عبور تونل از زیر شمع‌های محدوده، نیروی محوری به‌طور ناگهانی کاهش می‌یابد که نشان از گسترش نیروی کششی در پاشنه شمع است. با پیشروی تونل و رسیدن به محدوده  $0.17D_T < Y < 0.5D_T$  بار دیگر افزایش نیروی محوری در دو شمع  $C_2$  و  $B_3$  دیده می‌شود که می‌توان آن را ناشی از تاثیر فشار تزریق دوغاب دانست. این افزایش برای شمع  $B_3$  معادل ۲۹ کیلونیوتن و برای شمع  $C_2$  برابر با ۴۳ کیلونیوتن می‌باشد.

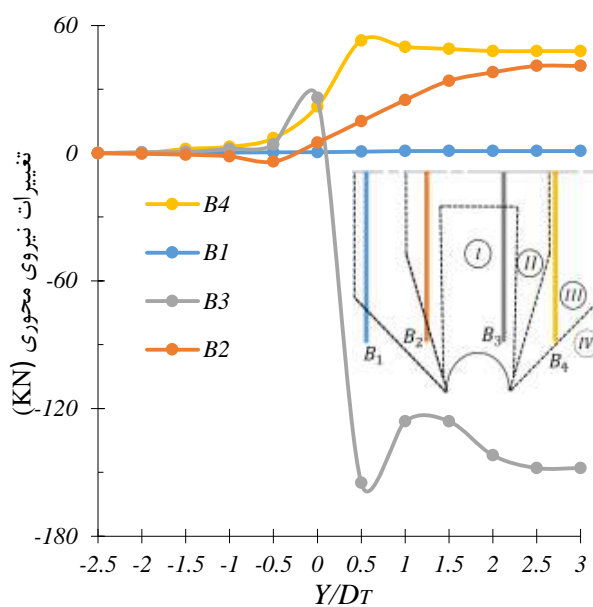
نیروی محوری در پاشنه شمع‌های  $A_3$  و  $C_3$  که در محدوده II قرار دارند نیز ضمن عبور تونل، دچار افت می‌شود. نیروی محوری پاشنه شمع‌های محدوده II برخلاف محدوده I تحت تاثیر فشار تزریق و سینه‌کار تونل افزایش نیافته و با روند آهسته‌تری نسبت به شمع‌های محدوده I افت می‌کند.

تغییرات نیروی محوری در پاشنه پنج شمع  $A_1, A_4, B_4, C_1$  و  $C_4$  که در محدوده III قرار دارند، تابع الگوی متفاوتی نسبت به دو محدوده I و II است. نیروی محوری پاشنه شمع‌های این محدوده با عبور تونل از زیر شمع به‌طور تدریجی افزایش یافته که نشان از گسترش نیروی فشارشی در پاشنه شمع‌های واقع در محدوده III است و با رسیدن تونل به  $Y = 2/5D_T$  تغییرات نیروی محوری پاشنه به حد ثابتی می‌رسد.

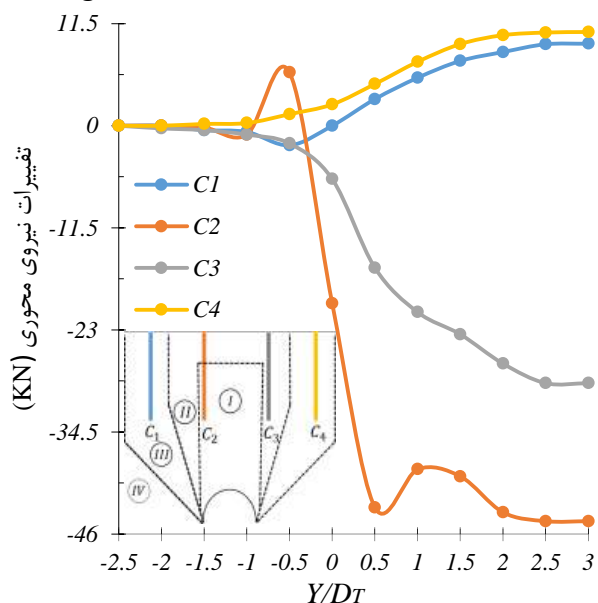
پاشنه شمع  $B_1$  در محدوده IV قرار گرفته است. بررسی تغییرات نیروی محوری این شمع ضمن عبور تونل نشان می‌دهد، عبور تونل بر نیروی محوری پاشنه این شمع تاثیری نداشته و ضمن پیشروی تونل نیروی محوری در پاشنه این شمع ثابت است.



(A) شمع‌های ردیف



(B) شمع‌های ردیف

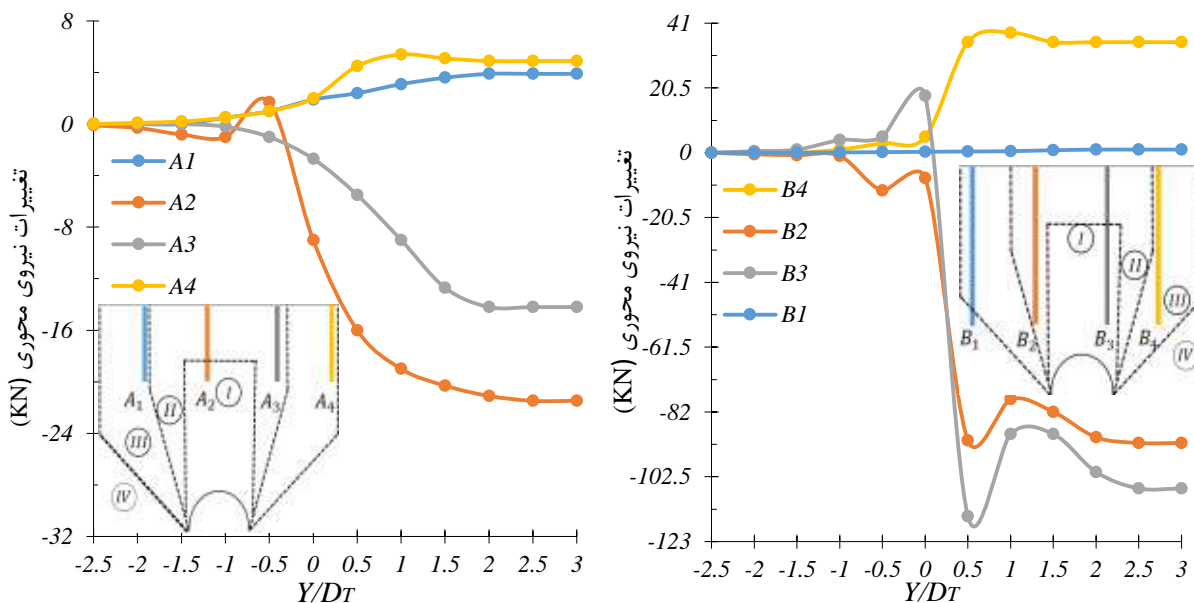


(C) شمع ردیف

شکل (۴-۱۷): تغییرات نیروی محوری در پاشنه شمع‌های مجاور تونل ضمن عبور تونل در حالت  $H_T/D_T = 3/5$

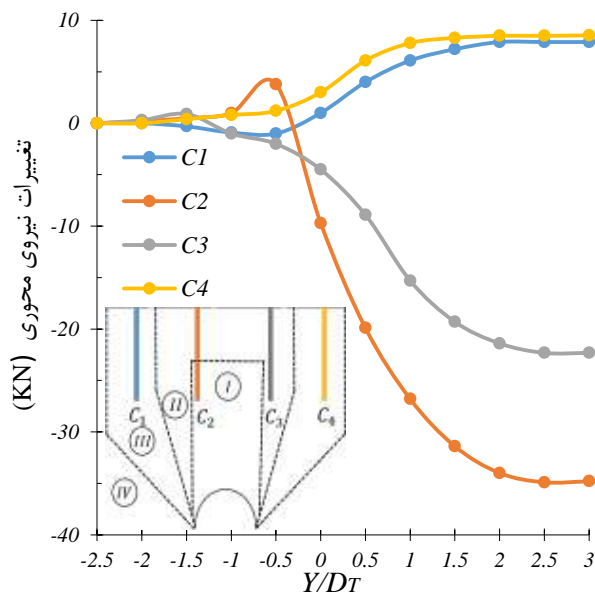
شکل (۴-۱۸) تغییرات نیروی محوری پاشنه شمع‌های مجاور تونل را ضمن پیشروی تونل در حالت  $H_T/D_T = 4$  نشان می‌دهد. به‌طورکلی تغییرات نیروی محوری در پاشنه شمع‌ها، روندی مشابه با تغییرات نیروی محوری در حالت اول دارد. افزایش نسبت  $H_T/D_T$  از  $3/5$  به ۴ سبب کاهش تاثیر فشار تزریق دوغاب

و فشار سینه کار بر افزایش نیروی محوری در شمع‌های محدوده I شده است. در حالت دوم رفتار شمع  $B_2$  تفاوت فراوانی نسبت به حالت اول دارد و افزایش  $H_T/D_T$  منجر به افت ناگهانی نیروی محوری پاشنه این شمع تا مقدار ۹۱/۸ کیلونیوتن شده است.



(شمع‌های ردیف A)

(شمع‌های ردیف B)



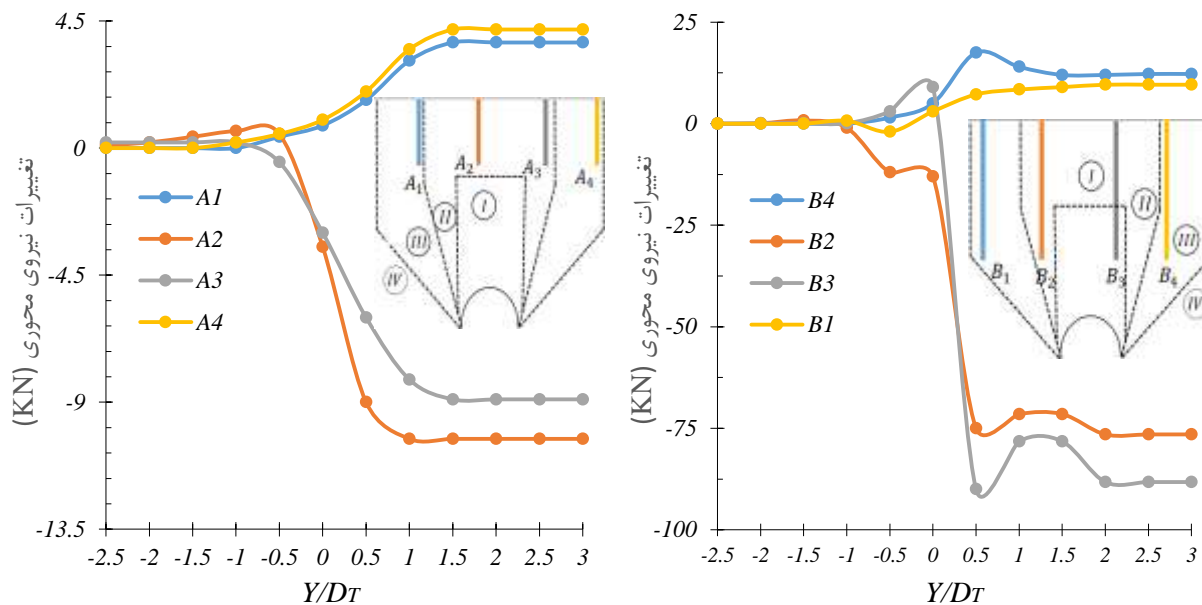
(شمع‌های ردیف C)

شکل (۴-۱۸): تغییرات نیروی محوری در پاشنه شمع‌های مجاور تونل ضمن عبور تونل در حالت  $H_T/D_T = 4$

شکل (۴-۱۹) تغییرات نیروی محوری پاشنه شمعی‌های مجاور تونل ضمن پیشروی تونل در حالت  $H_T/D_T = 4/5$

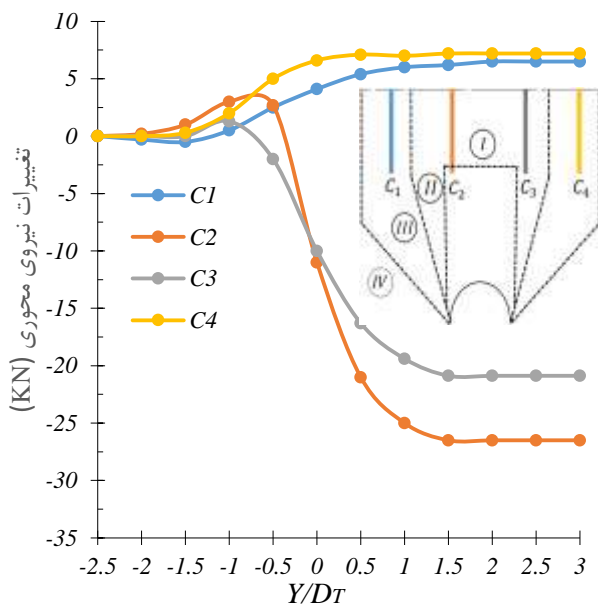
نشان می‌دهد. در  $H_T/D_T = 4/5$ ، نیروی محوری پاشنه شمعی  $B_1$  بر خلاف دو حالت قبل، افزایش می‌یابد.

همین‌طور



(A) شمعی‌های ردیف (A)

(B) شمعی‌های ردیف (B)

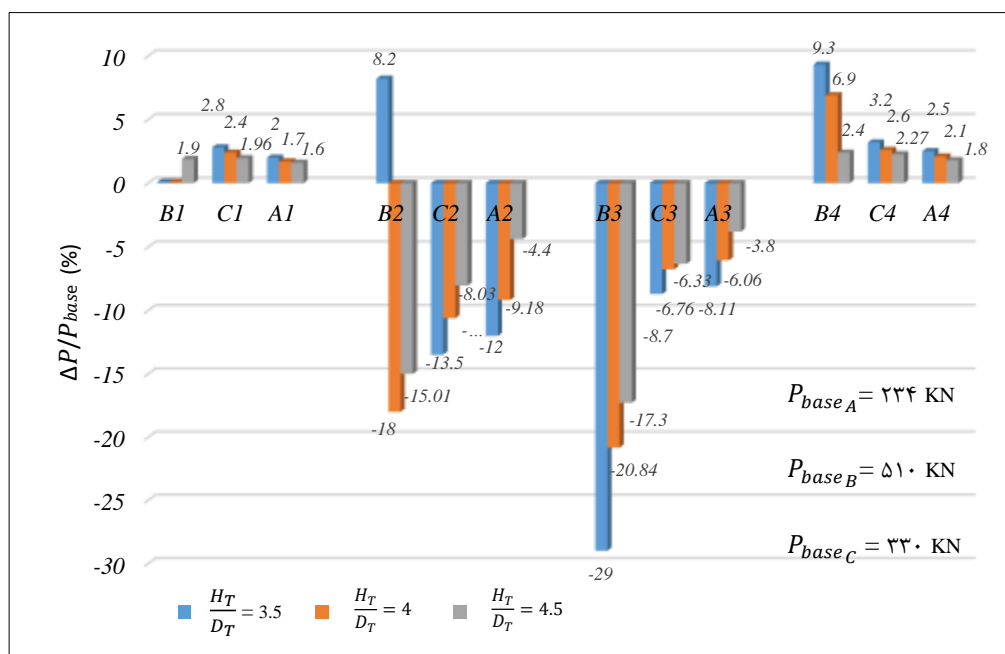


(C) شمعی‌های ردیف (C)

شکل (۴-۱۹): تغییرات نیروی محوری در پاشنه شمعی‌های مجاور تونل ضمن عبور تونل در حالت  $H_T/D_T = 4/5$

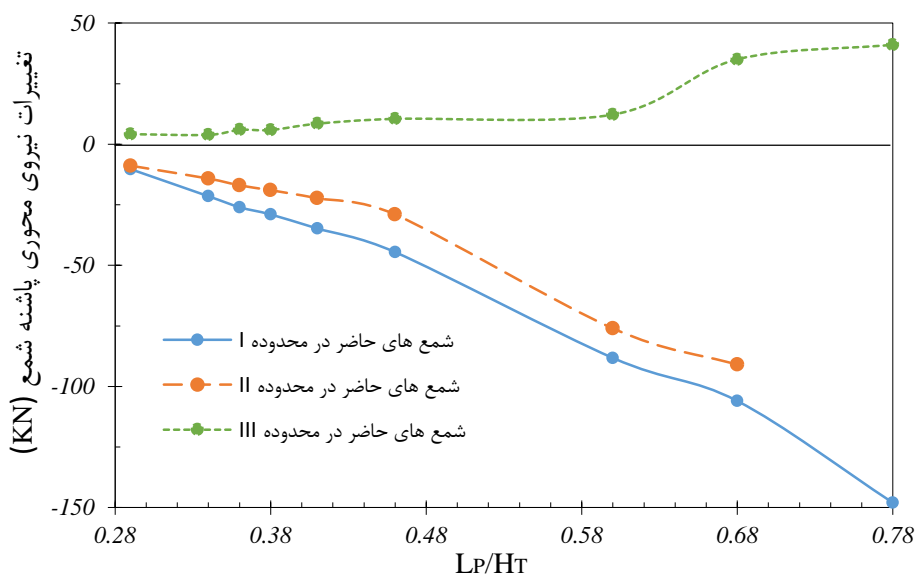


شکل (۴-۲۰) تغییرات نهایی نیروی محوری در شمع‌های حاضر در مجاورت تونل را پس از عبور تونل به اندازه  $2/5D_T$  از زیر شمع‌های حاضر، در حالت‌های مختلف را نشان می‌دهد. در شکل (۴-۲۰) تغییرات نیروی محوری پاشنه پس از عبور تونل ( $\Delta P$ ) نسبت به نیروی محوری پاشنه هر شمع با اعمال تنش به اندازه ظرفیت باربری شمع بر نوک و بدون حضور تونل ( $P_{base}$ ) که در تحلیل مرحله اول به دست آمده است بر حسب درصد، نرمالایز گردیده است.



شکل (۴-۲۰): تغییرات نهایی نیروی محوری پاشنه برای شمع‌های حاضر در مجاورت تونل ضمن عبور تونل از سه حالت مختلف

افزایش عمق عبور تونل، منجر به کاهش گسترش نیروهای کششی و فشارشی در پاشنه و افت در میزان کاهش و افزایش نیروی محوری پاشنه شده است. به‌طور کلی، مقدار افت صورت گرفته در اثر افزایش نسبت  $H_T/D_T$  را می‌توان وابسته به دو عامل فاصله جانبی و  $L_P/H_T$  دانست. شکل (۴-۲۱) تغییرات نهایی نیروی محوری در پاشنه شمع‌های هر یک از محدوده‌های تاثیر شکل گرفته در اطراف تونل را در مقابل افزایش نسبت  $L_P/H_T$  نشان می‌دهد:



شکل (۴-۲۱): تغییرات نهایی نیروی محوری در پاشنه شمع‌های مجاور تونل

به‌طور کلی در تمام حالت‌های مورد بررسی، از میان شمع‌های حاضر در مجاورت تونل، شمع‌هایی که پاشنه آن‌ها در محدوده I قرار دارد، بیش‌ترین کاهش در نیروی محوری پاشنه را پس از عبور تونل نشان می‌دهند. افزایش نسبت  $H_T/D_T$  از  $3/5$  به  $4/5$ ، بیش‌ترین تاثیر را در کاهش تغییرات نیروی محوری پاشنه شمع‌هایی با  $L_P/H_T \geq 0/6$  نسبت به  $P_{base}$  داشته و منجر به افت کاهش نیروی محوری پاشنه از  $29P_{base}\%$  تا  $17P_{base}\%$  می‌شود. این در حالی است که افزایش نسبت  $H_T/D_T$  در شمع‌هایی با  $L_P/H_T < 0/46$ ، با افت کاهش نیروی محوری پاشنه از  $12P_{base}\%$  به  $4/4P_{base}\%$ ، منجر به کاهش کمتری در تغییرات نیروی محوری شده است.

افزایش نسبت  $H_T/D_T$  تاثیری مشابه محدوده I بر شمع‌های محدوده II، از نظر تغییرات نیروی محوری پاشنه می‌گذارد با این تفاوت که بازه تغییرات نیروی محوری پاشنه در شمع‌های محدوده II نسبت به محدوده I کوچک‌تر است. ضمن افزایش نسبت  $H_T/D_T$  از  $3/5$  به  $4/5$  شمع‌هایی با  $L_P/H_T \geq 0/6$  از  $18P_{base}\%$  به  $13P_{base}\%$  و شمع‌هایی با  $L_P/H_T < 0/46$  از  $11P_{base}\%$  به  $3/8P_{base}\%$  افت در کاهش نیروی محوری نشان می‌دهند.

در میان شمع‌های محدوده III، شمع‌هایی با نسبت  $L_p/H_T \geq 0.6$  بیش‌ترین میزان افزایش در نیروی محوری پاشنه و نیز بیش‌ترین تاثیر از افزایش نسبت  $H_T/D_T$  در کاهش تغییرات نیروی محوری پاشنه را نشان می‌دهند. ضمن افزایش نسبت  $H_T/D_T$  از  $3/5$  به  $4/5$ ، شمع‌هایی با  $L_p/H_T > 0.6$  از  $0.9/3P_{base}$  تا  $0.1/9P_{base}$  افت در افزایش نیروی محوری پاشنه را متحمل شده‌اند. در محدوده III، روند تغییرات نیروی محوری شمع‌هایی با  $0.6 < L_p/H_T \leq 0.38$  با افزایش نسبت  $H_T/D_T$ ، با شیب اندک ادامه یافته است. این در حالی است که در نیروی محوری پاشنه شمع‌هایی با  $L_p/H_T < 0.38$  با افزایش نسبت  $H_T/D_T$  تغییری به وجود نیامده و افزایش نیروی محوری در این شمع‌های از  $0.2P_{base}$  فراتر نمی‌رود.

#### ۴-۳-۴ - تغییرات مقاومت جداری در طول شمع

جابجایی نسبی میان شمع و خاک سبب ایجاد تنش برشی در حد فاصل شمع و خاک می‌گردد. این جابجایی ممکن است در اثر نیروی فشاری به نوک شمع و جابجایی شمع رو به پایین یا در اثر نیروی کششی به نوک شمع و جابجایی آن رو به بالا اتفاق بیافتد. به همین ترتیب این جابجایی نسبی می‌تواند در اثر نشست یا بالازدگی خاک و اثرات آن بر شمع نیز رخ دهد. در صورتی که مقدار حرکت خاک در مقایسه با شمع بیشتر باشد، نیرویی به طرف پایین شکل می‌گیرد که آن را تنش برشی منفی و در صورتی که میزان حرکت شمع از خاک بیشتر باشد، نیروی تشکیل یافته در حد فاصل شمع و خاک به طرف بالا بوده و آن را تنش برشی مثبت می‌نامند. مراجع قدیمی نیروی برشی تشکیل شده در جداره شمع را اصطکاک جداری می‌نامند؛ اما در منابع منتشر شده در سه دهه اخیر، واژه مقاومت جداری بکار رفته است. در صورتی که جابجایی شمع با جهت تنش برشی یکسان باشد آن را پوسته جداری مثبت و در غیر این صورت به آن پوسته جداری منفی گفته می‌شود (فلنیوس، ۱۹۸۴). تنش برشی در طول بدنه شمع با استفاده از رابطه (۱-۴) قابل محاسبه است (لی و کیم، ۲۰۰۷).

$$\tau = \frac{(P_{i+1} - P_i)}{A_s \cdot d_z} \quad \text{رابطه (۱-۴)}$$

که در رابطه (۴-۱) و  $i+1$  و  $i$ : نقاط مرجع روی بدنه شمع،  $d_z$ : فاصله میان دونقطه  $i$  و  $i+1$ ،  $A_S$ : محیط شمع  $P_i$  و  $P_{i+1}$ : نیروی محوری در نقاط مرجع.

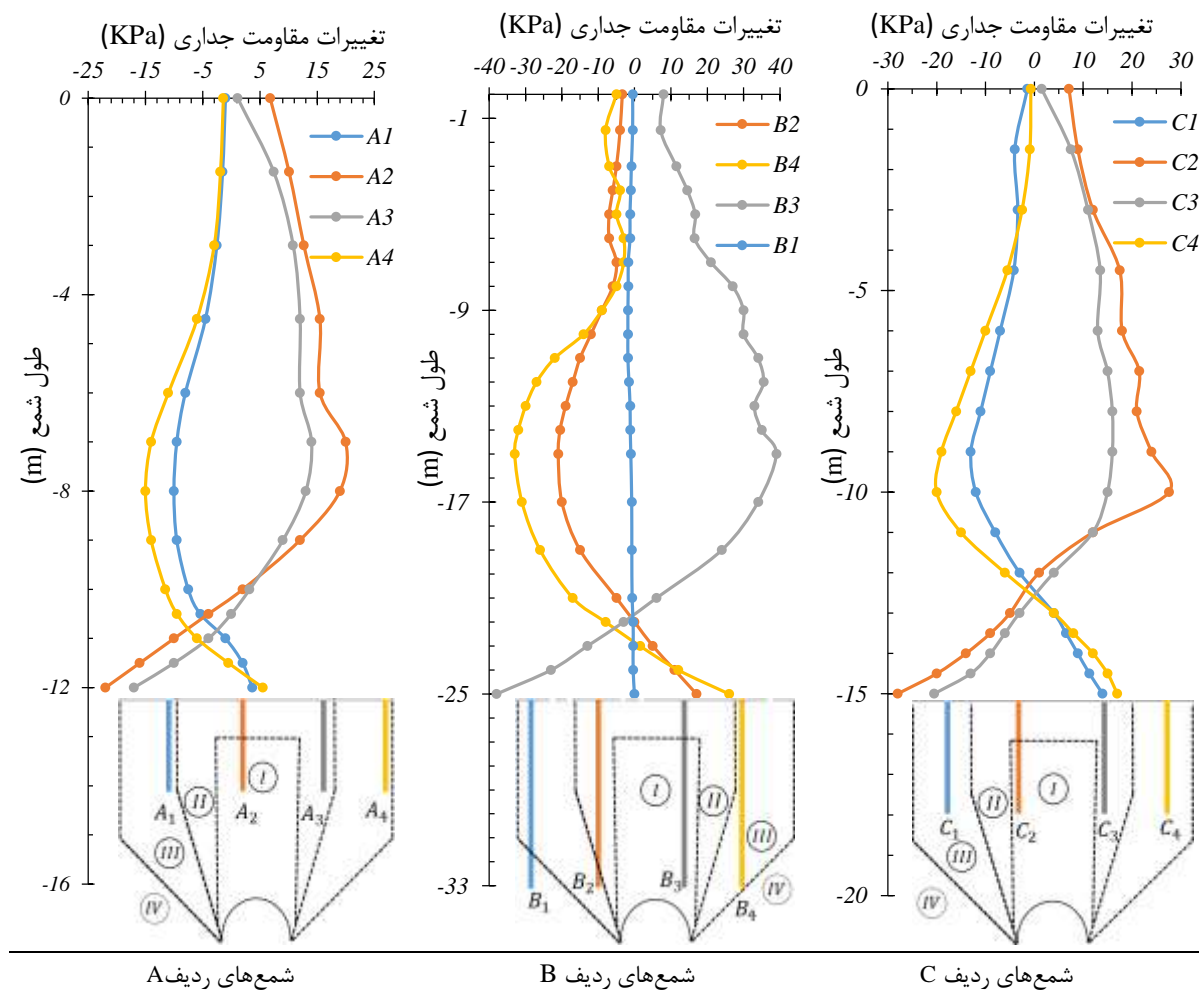
با توجه به نتایج (۴-۳-۱) و به تعادل رسیدن مقادیر جابجایی نوک شمع‌ها پس از عبور تونل به اندازه  $2/5 D_T$  از زیر شمع‌ها، تغییرات مقاومت جداری، ضمن افزایش  $H_T/D_T$  از  $3/5$  به  $4/5$  برای شمع‌های حاضر در فاصله جانبی  $2/1 D_T < X < 2/1 D_T$  - مورد بررسی قرار گرفت.

شکل (۴-۲۲) تغییرات مقاومت جداری شمع‌ها را در حالت  $H_T/D_T = 3/5$  نشان می‌دهد. تغییرات مقاومت جداری در بدنه شمع‌های مجاور تونل از دو الگوی متفاوت پیروی می‌کند. تغییرات تنش برشی در طول بدنه شمع‌های حاضر در محدوده I و II پس از عبور تونل در اکثر قسمت‌ها به صورت تشکیل پوسته جداری منفی ظاهر شده است. مقادیر تنش‌های برشی در فاصله‌ای برابر با  $0/8$  تا  $0/9$  برابر طول شمع از نوک، به صفر رسیده و در بخش تحتانی شمع، پوسته جداری مثبت تشکیل می‌شود. بیشینه تنش برشی مثبت و منفی تشکیل شده در جداره شمع‌های محدوده‌های I و II به ترتیب بین  $13$  تا  $39$  کیلوپاسکال و  $22$  تا  $38$  کیلوپاسکال است که بسته به نسبت  $L_P/H_T$  و فاصله جانبی شمع‌های حاضر با مرکز تونل تغییر می‌کند. شمع  $B_3$  با نسبت  $L_P/H_T = 0/78$  و فاصله جانبی  $X = 0/3 D_T$  بیش‌ترین افزایش در تنش برشی را به مقدار  $39$  کیلوپاسکال را در عمق  $15$  متری شمع و نیز بیش‌ترین کاهش در تنش برشی به مقدار  $38$  کیلوپاسکال در پاشنه شمع را نشان می‌دهد.

در شمع‌های محدوده III، تغییرات تنش برشی عکس آنچه در دو محدوده I و II اتفاق افتاده است، می‌باشد. در این محدوده مقادیر تغییرات تنش برشی، به جز اندازه‌ای معادل  $0/1$  از انتهای طول شمع، منفی بوده که نشان از تشکیل پوسته جداری مثبت در بخش اعظمی از طول شمع است. در  $0/1$  تحتانی از طول شمع، تغییرات تنش برشی مقداری مثبت را نشان می‌دهند که به معنی تشکیل پوسته جداری منفی در این بخش می‌باشد. بازه تغییرات تنش‌های برشی مثبت و منفی شمع‌های حاضر در این محدوده در

حالت اول به ترتیب بین ۵/۵ تا ۲۶ کیلوپاسکال و ۱۵ تا ۳۳ کیلوپاسکال است. شمع  $B_4$  با نسبت  $L_P/H_T = 0.78$  و فاصله جانبی  $X = 1/4 D_T$ ، بیشترین افزایش در تنش برشی را به مقدار ۲۶ کیلوپاسکال در پاشنه شمع و نیز بیشترین کاهش در تنش برشی به مقدار ۳۳ کیلوپاسکال در عمق ۱۵ متری شمع را نشان می‌دهد.

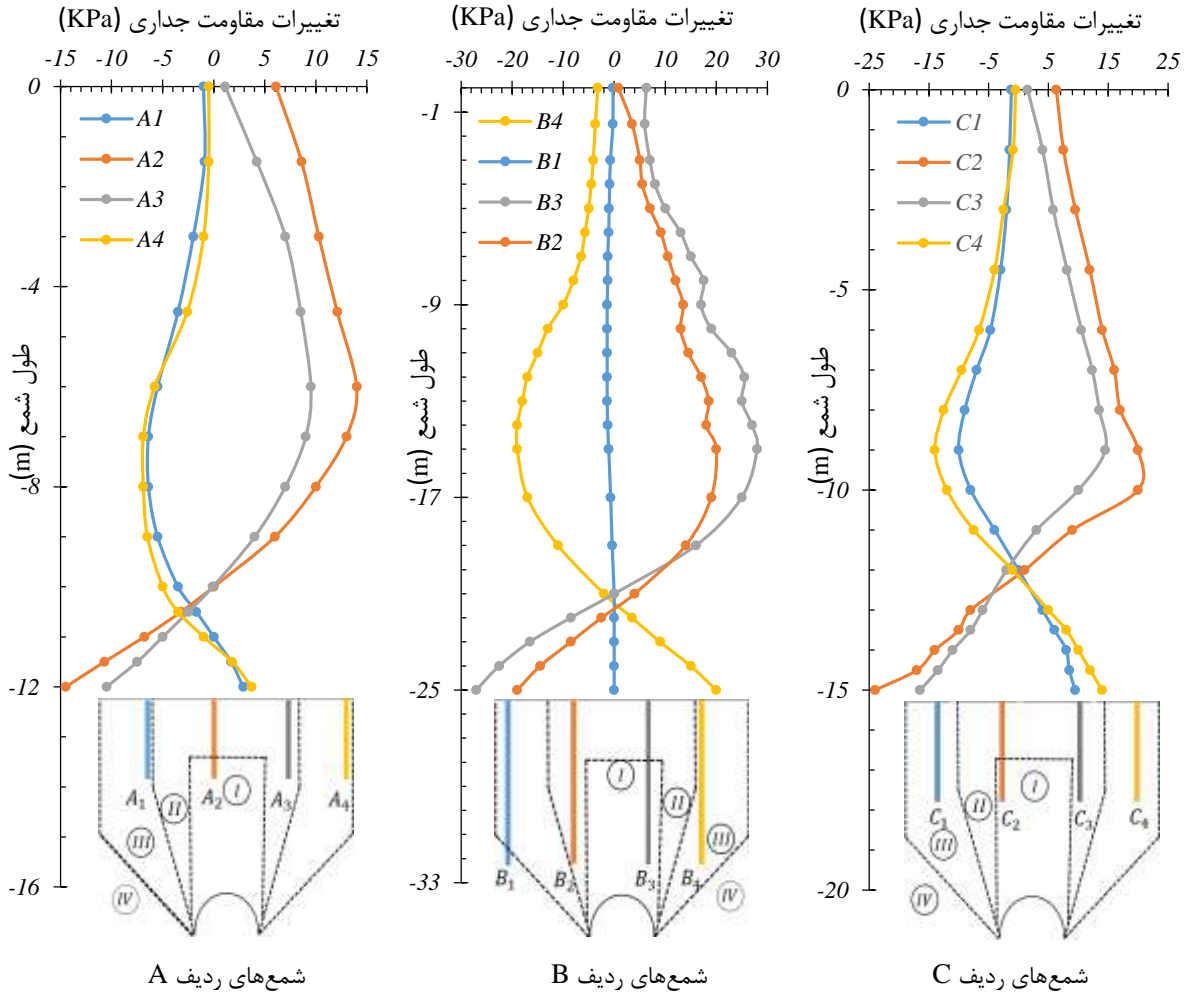
شمع  $B_1$  تنها شمع مورد بررسی است که در محدوده IV واقع شده است. تغییرات مقاومت جداري به وجود آمده در این شمع، به صورت افزایش تنش برشی منفی به حد بسیار اندک و در بر گرفتن پوسته جداري مثبت طول بدنه شمع، به صورت خفیف است.



شکل (۴-۲۲): تغییرات مقاومت جداري شمع‌های مجاور در حالت  $H_T/D_T = 3/5$

تغییرات مقاومت جداری شمع‌های مجاور تونل در حالت  $H_T/D_T = 4$  در شکل (۴-۲۲) قابل مشاهده

است:



شکل (۴-۲۳): تغییرات مقاومت جداری شمع‌های مجاور در حالت  $H_T/D_T = 4$

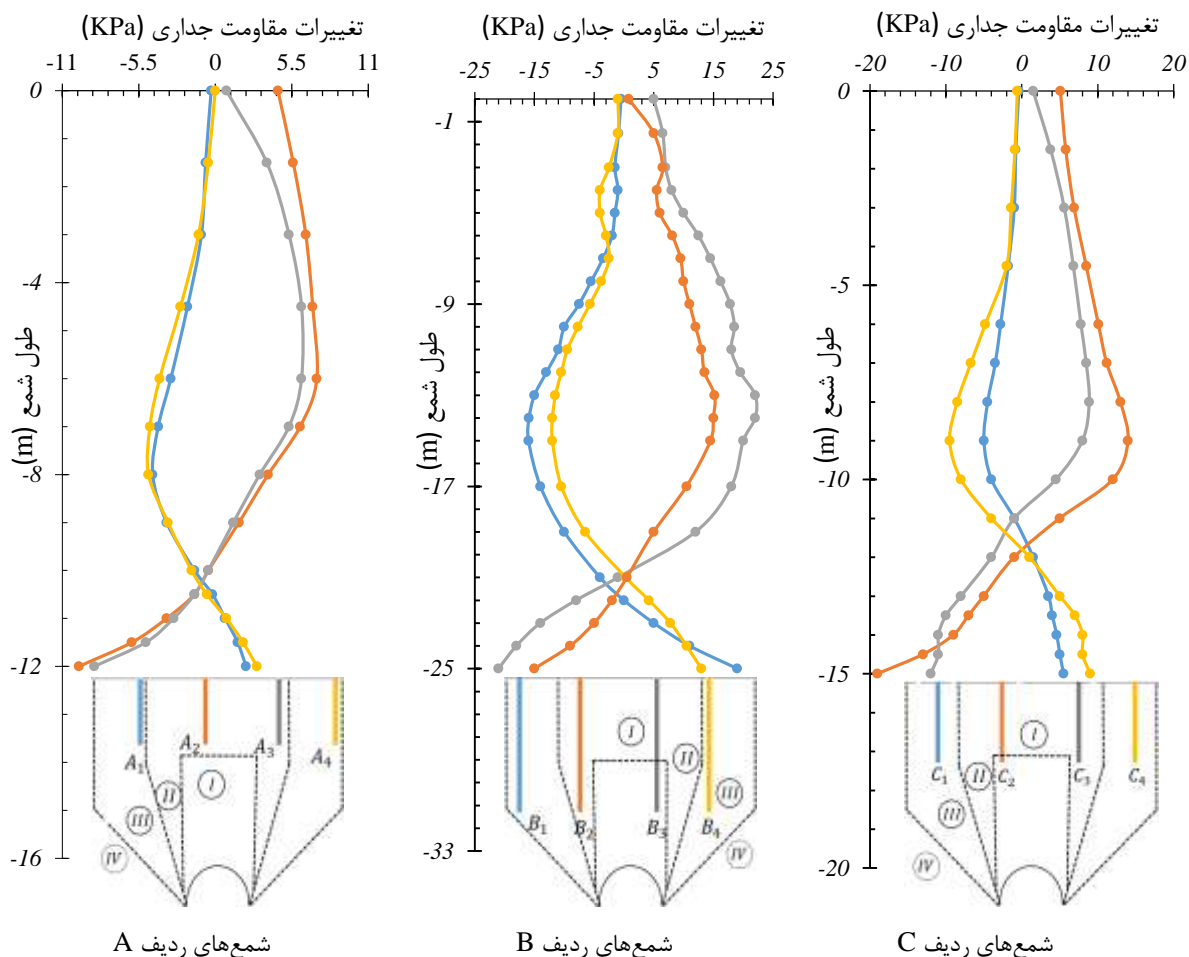
بررسی تغییرات مقاومت جداری در حالت دوم روندی مشابه حالت اول در تغییرات را نشان می‌دهد. با افزایش عمق قرارگیری تونل، شمع  $B_2$  رفتاری مشابه شمع‌های محدوده I و II را نشان می‌دهد. افزایش عمق قرارگیری تونل منجر به کاهش بیشینه تغییرات تنش‌های برشی مثبت و منفی تشکیل شده در طول

شمع نسبت به حالت اول می‌شود. تغییرات بیشینه تنش‌های مثبت و منفی تشکیل یافته در شمع‌های محدوده I و II در حالت دوم، به ترتیب بین ۹ تا ۲۸ کیلوپاسکال و ۱۰- تا ۲۷- کیلوپاسکال است.

بیشینه تنش‌های برشی مثبت و منفی تشکیل یافته در طول شمع‌های حاضر در محدوده III نیز در حالت

دوم، نسبت به حالت اول افت می‌کنند. بیشینه تنش‌های برشی مثبت در شمع‌های این محدوده بین ۲/۹ تا ۲۰ کیلوپاسکال و بیشینه تنش برشی منفی بین ۶/۹- تا ۱۹- کیلوپاسکال است.

شکل (۴-۲۳) تغییرات مقاومت جداري شمع‌های مجاور تونل در حالت  $H_T/D_T = 4/5$  را نشان می‌دهد:



شکل (۴-۲۴): تغییرات مقاومت جداري شمع‌های مجاور در حالت  $H_T/D_T = 4/5$

افزایش عمق قرارگیری تونل منجر به تشکیل پوسته جداری مثبت در بخش بالایی شمع  $B_4$  و نیز پوسته جداری منفی در پاشنه این شمع می‌شود. تغییرات مقاومت جداری شمع‌ها در حالت سوم روندی مشابه حالت‌های اول و دوم را نشان می‌دهد. در حالت سوم، شمع‌های منطقه مورد بررسی نسبت به حالت اول و دوم در بیشینه تنش‌های برشی مثبت و منفی دچار افت می‌شوند. بیشینه تنش‌های برشی مثبت در شمع‌های محدوده I و II بین  $6/2$  تا  $20$  کیلوپاسکال و بیشینه تنش برشی منفی بین  $8/7$  تا  $21$  - کیلوپاسکال است. همین‌طور مقادیر بیشینه تنش برشی مثبت و منفی در شمع‌های محدوده III بین  $2/2$  تا  $19$  و  $4/7$  - تا  $16$  - می‌باشد.

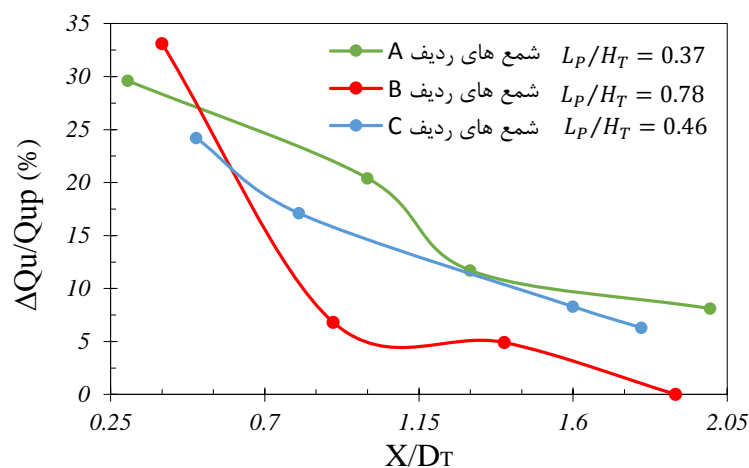
بررسی شمع‌های مجاور تونل در سه حالت مختلف نشان می‌دهد افزایش نسبت  $H_T/D_T$  منجر به کاهش بیشینه تغییرات تنش برشی می‌گردد. در تمام حالت‌های مورد بررسی، کاهش نسبت  $L_P/H_T$  و افزایش فاصله جانبی شمع از مرکز تونل، سبب کاهش در بیشینه تنش برشی تشکیل یافته در جداره و پاشنه شمع شده است.

#### ۴-۴ - تحلیل سوم

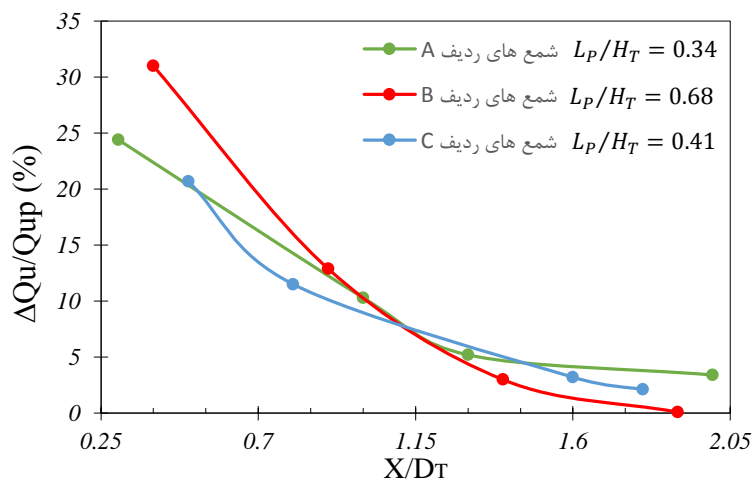
با توجه به نتایج بخش‌های قبل شمع‌های حاضر در محدوده جانبی  $2/1 D_T < X < 2/1 D_T$ ، در اثر عبور تونل، دچار نشست بیش از نشست مجاز شمع می‌شوند. علاوه بر این نیروی محوری پاشنه و مقاومت جداری شمع‌های این محدوده نیز دچار تغییراتی می‌شوند. به‌منظور بررسی ظرفیت باربری محوری شمع‌ها تحت اثر عبور تونل در عمق‌های مختلف، پس از عبور تونل به اندازه  $Y = 2/5 D_T$  از زیر شمع‌ها، مقادیر تنش روی نوک شمع‌های محدوده به‌صورت تدریجی افزایش داده شد و با رسم نمودارهای تنش - نشست و استفاده از روش حدی دیویسون، ظرفیت باربری محوری شمع‌های مجاور، در سه حالت  $H_T/D_T = 4$ ،  $H_T/D_T = 3/5$  و  $H_T/D_T = 4/5$  محاسبه شد.



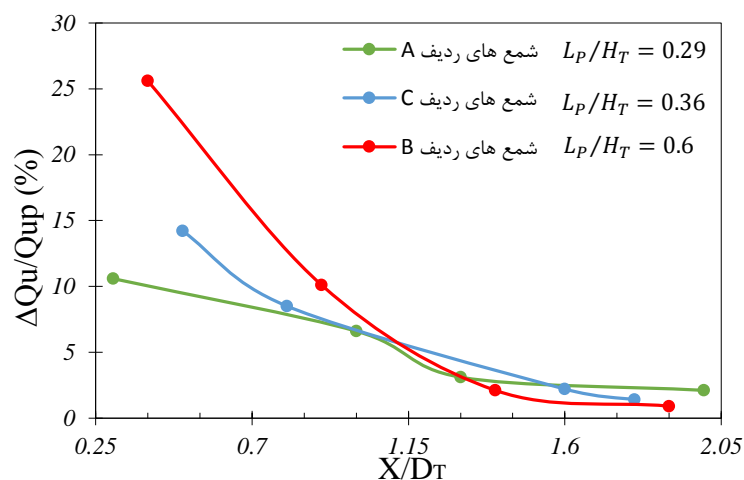
شکل‌های (۲۵-۴) تا (۲۷-۴) تغییرات ظرفیت باربری محوری شمع‌های مجاور تونل را در سه حالت نشان می‌دهند. تغییرات ظرفیت باربری محوری ( $\Delta Q_u$ ) بر حسب ظرفیت باربری محوری اولیه شمع، بدون حضور تونل ( $Q_{up}$ ) و فاصله جانبی شمع تا مرکز تونل ( $X$ ) بر حسب قطر تونل ( $D_T$ ) نرمالایز شده است. به‌طور کلی افزایش نسبت  $H_T/D_T$  و فاصله جانبی شمع از مرکز تونل و نیز کاهش نسبت  $L_P/H_T$  منجر به افت در کاهش ظرفیت باربری محوری شمع‌های مجاور تونل می‌شود.



شکل (۲۵-۴): تغییرات ظرفیت باربری محوری شمع‌ها در حالت  $H_T/D_T = 3/5$

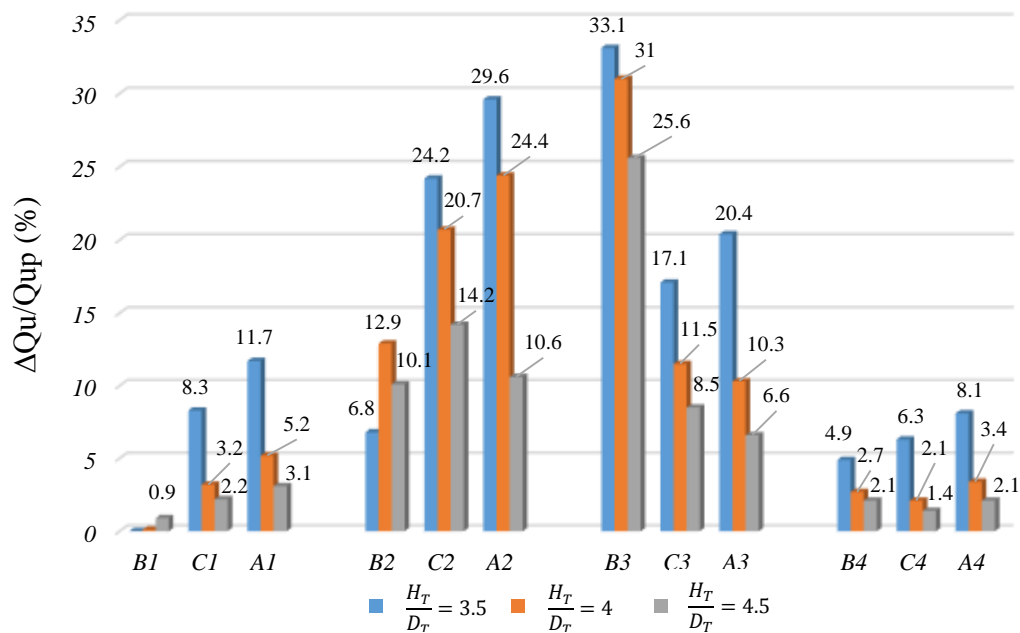


شکل (۲۶-۴): تغییرات ظرفیت باربری محوری شمع‌ها در حالت  $H_T/D_T = 4$



شکل (۴-۲۷): تغییرات ظرفیت باربری محوری شمع‌ها در حالت  $H_T/D_T = 4/5$

تغییرات ظرفیت باربری محوری ردیف‌های شمع مجاور تونل در سه حالت مختلف در شکل (۴-۲۸) به‌طور کلی قابل رویت است.



شکل (۴-۲۸): تغییرات ظرفیت باربری محوری برای شمع‌های مجاور تونل در سه حالت مختلف

در محدوده I شمع‌هایی با نسبت  $0.16 \leq L_p/H_T \leq 0.78$ ، در تمامی حالت‌های مورد بررسی، بیش‌ترین مقدار کاهش ظرفیت باربری محوری و کم‌ترین میزان اثرپذیری از افزایش عمق تونل را دارند. افزایش نسبت  $H_T/D_T$  از  $3/5$  به  $4/5$  سبب افت کاهش ظرفیت باربری محوری از  $33/1 Q_{up}$  به  $25/6 Q_{up}$  شده است. شمع‌های کوتاه‌تر محدوده که  $0.32 \leq L_p/H_T \leq 0.46$ ، با افزایش نسبت  $H_T/D_T$  خصوصا از  $4$  به  $4/5$  تغییرات فراوانی در افت کاهش ظرفیت باربری محوری نشان می‌دهند. کاهش ظرفیت باربری محوری این شمع‌ها ضمن افزایش نسبت  $H_T/D_T$  از  $3/5$  به  $4/5$  از  $29/6 Q_{up}$  به  $10/6 Q_{up}$  افت کرده است.

در محدوده II کاهش نسبت  $L_p/H_T$  از  $0.78$  تا  $0.6$  منجر به رفتار نوسانی در تغییرات ظرفیت باربری محوری شمع دارد. با کاهش نسبت  $L_p/H_T$  از  $0.78$  تا  $0.68$  کاهش ظرفیت باربری محوری شمع از  $6/18 Q_{up}$  به  $12/9 Q_{up}$  افزایش می‌یابد. این در حالی است که کاهش نسبت  $L_p/H_T$  از  $0.68$  تا  $0.6$  منجر به افت کاهش ظرفیت باربری محوری تا  $10/1 Q_{up}$  می‌شود.

در محدوده II شمع‌هایی با  $0.32 \leq L_p/H_T \leq 0.46$  در حالت اول، بیش‌ترین مقدار کاهش در ظرفیت باربری محوری را پس از عبور تونل نشان داده‌اند. با افزایش نسبت  $H_T/D_T$  خصوصا از  $3/5$  به  $4$  تغییرات فراوانی در افت کاهش ظرفیت باربری محوری شمع‌های این محدوده رخ می‌دهد شمع‌هایی با  $0.16 \leq L_p/H_T \leq 0.68$  دچار بیش‌ترین کاهش در ظرفیت باربری محوری می‌شوند. در مجموع با افزایش نسبت  $H_T/D_T$  از  $3/5$  به  $4/5$ ، کاهش ظرفیت باربری محوری شمع‌های این محدوده بین  $20/4 Q_{up}$  تا  $6/6 Q_{up}$  افت می‌یابد.

در محدوده III، بر خلاف دو محدوده I و II، شمع‌های کوتاه‌تر و با نسبت  $0.29 \leq L_p/H_T \leq 0.37$  بیش‌ترین کاهش در ظرفیت باربری محوری را متحمل شده‌اند. شمع‌های این محدوده حساسیت بیشتری به افزایش عمق در مرحله اول نشان داده و افت کاهش ظرفیت باربری محوری شمع‌های این محدوده با افزایش

از  $H_T/D_T$  ۳/۵ به ۴ در بازه  $Q_{up}$  (۶/۵٪ تا ۲/۲٪) قرار دارد. با افزایش نسبت  $H_T/D_T$  به ۴/۵، شمع‌های محدوده III روندی ثابت در تغییرات ظرفیت باربری نشان داده و کاهش ظرفیت باربری در این حالت از  $Q_{up}$  ۳/۱٪ فراتر نمی‌رود.

#### ۴-۵- جمع‌بندی

در این فصل با ساخت چندین مدل تفاضل محدود، طی سه مرحله، به بررسی تاثیر عبور تونل بر شمع‌های مجاور پرداخته شد. در مرحله اول ظرفیت باربری محوری و جانبی شمع‌های محدوده بدون حضور تونل مورد بررسی قرار گرفت و همین‌طور میزان بار، نشست و جابجایی مجاز شمع‌های محدوده به دست آمد. در مرحله دوم با اعمال بارکاری به دست آمده از تحلیل‌های صورت گرفته در مرحله اول بر شمع‌های حاضر در منطقه مورد بررسی، تغییرات نشست، جابجایی جانبی، بار پاشنه و مقاومت جداری شمع‌های منطقه مورد بحث، ضمن فرآیند تونل‌سازی مورد بررسی قرار گرفت. در مرحله سوم میزان افت ظرفیت باربری محوری شمع‌ها پس از عبور تونل به اندازه ۲/۵ برابر قطر از زیر شمع‌های مجاور در جهت پیشروی مورد بررسی قرار گرفت. همین‌طور علاوه بر عمق قرارگیری تونل خط هفت متروی تهران طبق طرح اصلی، به‌منظور بررسی تاثیر عمق قرارگیری تونل بر تغییرات موارد مورد بررسی، عمق تونل دو بار و هر بار به اندازه نیمی از قطر تونل افزایش داده شد. نتایج نشان از وجود چهار محدوده تاثیر در مجاورت تونل دارد که واکنش شمع‌ها حین عبور تونل، شدیداً وابسته به موقعیت قرارگیری پاشنه نسبت به محدوده‌های تاثیر دارد. افزایش عمق قرارگیری تونل و همین‌طور فاصله جانبی شمع از مرکز تونل منجر به کاهش تغییرات در موارد مورد بررسی می‌شود.

## ۵- فصل پنجم

### نتیجه گیری

## ۵-۱- نتیجه‌گیری

در این مطالعه با استفاده از مدل‌سازی عددی به روش تفاضل محدود در نرم‌افزار فلک سه‌بعدی به بررسی تاثیر عبور تونل خط هفت متروی تهران بر پایداری شمع‌های پل تقاطع بزرگراه محلاتی با بزرگراه امام علی پرداخته شده است. علاوه بر این با ساخت دو مدل دیگر و افزایش عمق عبور تونل، مطالعه پارامتریکی روی نسبت طول شمع به عمق قرارگیری تونل در فواصل جانبی مختلف و تاثیر نسبت عمق بر قطر تونل در تغییر میزان نشست نوک، تغییر شکل جانبی، نیروی محوری پاشنه، مقاومت جداری و ظرفیت باربری شمع‌های مجاور تونل انجام شد.

با توجه به فرآیند مدل‌سازی حفاری در مجاورت شمع‌های پل (فصل ۳) و نیز تجزیه و تحلیل مدل‌سازی (فصل ۴)، پیرامون پارامترهای مورد بررسی، نتایج استخراج شده از مطالعه حاضر به شرح ذیل است.

۱. بررسی نشست ایجاد شده در نوک شمع‌های مجاور تونل و نشست سطح زمین، چهار محدوده اثر در اطراف تونل را مشخص می‌کند. در محدوده I که روی تاج تونل  $(0/6D_T < X < 0/6D_T)$  قرار دارد و به اندازه  $3D_T$  از محور مرکزی تونل به طرف سطح زمین گسترش یافته است، نشست نوک شمع ۱ تا ۳ میلی‌متر بیش از نشست سطح زمین است. در محدوده II که با زاویه  $45 + \varphi$  نسبت به خط افق، از جداره تونل آغاز و تا محدوده  $1/2D_T < |X| < 0/6D_T$  در سطح زمین ادامه می‌یابد، نشست نوک شمع با نشست سطح زمین به‌طور تقریبی برابر و بیش از نشست مجاز شمع می‌باشد. در محدوده III که با زاویه ۴۵ درجه نسبت به خط افق، از جداره تونل آغاز و تا محدوده  $1/2D_T < |X| < 2/1D_T$  در سطح زمین ادامه می‌یابد، نشست نوک شمع از نشست سطح

زمین کمتر و بیش از نشست مجاز شمع است. در محدوده IV که با زاویه ۴۵ درجه نسبت به خط افق، از جداره تونل آغاز و در محدوده  $|X| > 2/1 D_T$  گسترش یافته است، شمع‌ها نشست کمتر از نشست سطح و نشست مجاز شمع دارند.

۲. نشست حاصل از عبور تونل از عمق ۳۲ متری سطح زمین در نوک شمع‌های پل، ضمن پیشروی تونل در محدوده  $2/5 D_T < Y < 2/5 D_T$  افزایش یافته و در بیشینه مقدار خود به ۴ برابر نشست مجاز شمع می‌رسد و با رسیدن تونل به محدوده  $Y = 2/5 D_T$  به حد ثابتی می‌رسد. مقدار نشست بسته به افزایش فاصله جانبی شمع از مرکز تونل و نسبت  $L_P/H_T$  کاهش می‌یابد. با افزایش عمق قرارگیری تونل تا ۴۱ متر، بیشینه مقدار نشست شمع تا  $2/8$  برابر نشست مجاز شمع کاهش می‌یابد.

۳. تغییر شکل جانبی شمع‌هایی که پاشنه آن‌ها در محدوده‌های I تا III قرار گرفته، تابعی از تغییر شکل جانبی خاک منطقه در اثر عبور تونل بوده و بیش‌ترین مقدار تغییر شکل در نوک شمع اتفاق افتاده است. تغییر شکل جانبی شمع‌های حاضر در محدوده چهارم در بخش زیادی از طول شمع ثابت بوده و با افزایش عمق قرارگیری تونل به ۴۱ متری سطح زمین به صفر نزدیک می‌شوند. در تمام حالت‌های مورد بررسی، عبور تونل سبب تجاوز تغییر شکل جانبی نوک شمع‌های پل، از حد مجاز نشده است.

۴. در اثر عبور تونل، هر دو نیروی فشاری و کششی در پاشنه شمع‌های مجاور تونل تشکیل می‌شود. تغییرات نیروی محوری در پاشنه شمع وابستگی شدیدی به موقعیت قرارگیری پاشنه شمع نسبت به تونل دارد. همین‌طور توزیع تنش‌های برشی در جداره شمع پس از عبور تونل دست‌خوش تغییرات می‌شود. در پاشنه شمع‌های حاضر در محدوده I و II نیروی کششی توسعه یافته و

پوسته جداری منفی به جز بخش تحتانی شمع، در اکثر طول شمع شکل می‌گیرد. در پاشنه شمع‌های حاضر در محدوده III و IV نیروی فشاری گسترش یافته و بخش اعظمی از طول شمع جز قسمت تحتانی شمع، با پوسته اصطکاکی مثبت پوشیده می‌شود.

۵. بیشینه محدوده تاثیر عبور تونل از عمق ۳۲ متری سطح زمین بر تغییرات نیروی محوری پاشنه شمع‌های مجاور  $1/5D_T < Y < 2/5D_T$  می‌باشد. افزایش عمق قرارگیری تونل تا ۴۱ متری از سطح زمین منجر به کاهش محدوده تاثیر تونل به  $1/5D_T < Y < 1/5D_T$  می‌شود.

۶. با توجه به تغییر ناگهانی نشست نوک شمع و نیروی محوری پاشنه شمع‌های حاضر در محدوده  $1D_T < Y < 0/5D_T$ ، می‌توان این محدوده را محدوده بحرانی تاثیر تونل در جهت پیشروی در تمام حالت‌های مورد بررسی معرفی کرد.

۷. ضمن عبور تونل، شمع‌هایی با نسبت  $L_p/H_T \geq 0/6$  و  $L_p/H_T < 0/46$  در سه محدوده اول تاثیر معرفی شده، به ترتیب بزرگ‌ترین و کوچک‌ترین تغییرات در نیروی محوری پاشنه، ضمن عبور تونل و نیز بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار افت در تغییرات نیروی محوری پاشنه ضمن افزایش عمق قرارگیری تونل را نشان می‌دهند.

۸. عبور تونل منجر به کاهش ظرفیت باربری محوری شمع‌های مجاور می‌شود. به‌طور کلی افزایش فاصله جانبی، کاهش نسبت  $L_p/H_T$  و افزایش عمق تونل منجر به افت در کاهش ظرفیت باربری شمع‌ها می‌شود. عبور تونل از عمق ۳۲ متری سطح زمین منجر به کاهشی تا  $33/1Q_{up}$ ٪ در ظرفیت باربری محوری شمع‌های محدوده I،  $20/4Q_{up}$ ٪ در شمع‌های محدوده II،  $11/7Q_{up}$ ٪ در شمع‌های محدوده III می‌شود. افزایش عمق قرارگیری تونل تا ۴۱ متر، سبب افت کاهش



ظرفیت باربری محوری تا میزان  $0.19Q_{up}$  برای شمع‌های محدوده I،  $0.13/8Q_{up}$  برای شمع‌های

محدوده II و  $0.08/6Q_{up}$  برای شمع‌های محدوده III می‌شود.

۹. محدوده I را می‌توان بحرانی‌ترین محدوده تشکیل شده در اثر عبور تونل معرفی کرد. موارد مورد

بحث این مطالعه بیشینه مقدار تغییرات خود را در شمع‌های حاضر در این محدوده نشان

می‌دهند.

۱۰. محدوده IV را می‌توان به عنوان حاشیه ایمن از اثرات تونل سازی بر شمع‌های مجاور معرفی

کرد. موارد مورد بحث مطالعه حاضر در این محدوده کوچک‌ترین تغییرات را داشته و کاهش

در میزان ظرفیت باربری شمع در این محدوده شکل نمی‌گیرد.

## ۵-۲- پیشنهاد ها

با توجه به بررسی‌های صورت گرفته ضمن مطالعه حاضر می‌توان موارد زیر را جهت تحقیقات آتی پیشنهاد کرد:

(۱) با توجه به بررسی انجام شده در مطالعه حاضر، می‌توان عوامل دیگری نظیر طول گام حفاری، فشار سینه کار و فشار تزریق را بر رفتار شمع‌های مجاور تونل حائز اهمیت دانست لذا می‌توان در تحقیقات آتی به این موضوع پرداخته شود.

(۲) از آنجا که در مطالعه حاضر از المان حجمی جهت مدل سازی شمع‌ها استفاده شده است، لزوم بررسی نتایج با شمع‌هایی حاضر در مجاورت تونل که به روش المان خطی مدل شده اند حس می‌شود.

(۳) یکی از مهم‌ترین کمبودهای مطالعه حاضر را می‌توان در عدم بررسی تاثیر عبور تونل بر گشتاور شمع قید کرد. لذا بررسی این مطلب یکی از پیشنهادهای جدی مطالعه حاضر می‌باشد.

(۴) از آنجا که طبق نتایج مطالعه حاضر، شمع‌های واقع در بخش‌های اول و دوم و سوم دچارافت ظرفیت باربری محوری می‌شوند و نیز با توجه به این مطلب که بر حسب الزامات طرح، افزایش عمق قرارگیری تونل میسر نیست، بررسی تاثیر عملیات‌های تحکیمی همچون تزریق در محدوده شمع‌ها می‌بایست به دقت مورد بررسی قرار گیرد.

## ۵-۳- فهرست منابع

- علمی ف، (۱۳۷۷) " بررسی ظرفیت باربری جانبی شمع " چاپ اول، مرکز تحقیقات و آموزش وزارت راه و ترابری، تهران، ص ۱۲۲.
- فاخر ع، (۱۳۹۲) "مهندسی پی پیشرفته" جلد دوم، چاپ دوم، موسسه انتشارات دانشگاه تهران، تهران، ص ۶۹۴.
- فخاریان کاظم، ا سلامی، ا، (۱۳۸۴) "ظرفیت باربری محوری شمع‌ها" چاپ اول، پژوهشکده حمل‌ونقل و وزارت راه و ترابری، تهران، ص ۲۴۰.
- منجقچی پ، (۱۳۸۸)، پایان‌نامه ارشد: "پیش‌بینی ظرفیت باربری شمع‌ها با استفاده از مدل‌سازی عددی آزمایش بارگذاری شمع"، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس،
- موسسه ی مهندسیین مشاور ساحل، ( ۱۳۸۹ ) "طراحی ایزاربندی و رفتارنگاری تونل خط هفت متروی تهران"، تهران.
- موسسه ی مهندسیین مشاور ساحل، ( ۱۳۹۱ ) "تزریق پشت سگمنت"، تهران.
- موسسه ی مهندسیین مشاور ساحل، ( ۱۳۹۳ ) "بررسی تعامل تونل خط هفت مترو و پل بزرگراه امام علی (ع)"، تهران.
- موسسه ی مهندسیین مشاور ساحل، ( ۱۳۹۴ ) "گزارش زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک مسیر تونل خط هفت مترو تهران در کریدور جدید"، تهران.
- ولی ر، (۱۳۹۲)، پایان‌نامه ارشد: "ارزیابی تاثیر تونل زنی بر عملکرد گروه شمع"، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یزد،

- AASHTO. (2002), “**Standard Specifications for Highway Bridges**”, 17th Edition, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C, pp.443 .
- Bonnier P. G. Muller S. C. and Vermeer P. A., (2002) “Bending Moments and Normal Forces in Tunnel Lining”, *Numerical Methods in Geotechnical Engineering*, P 515-523, Paris. France
- Chen L. T. Poulos H. G. and Loganathan N. (1999) “Pile Responses Caused by Tunneling” *J. of .Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.*, 125, 3, pp 207-215.
- Cheng C.Y. Leung C.F. and Chow Y., (2004) "3D Numerical Study of Tunnel-Soil-Pile Interaction", Proceedings 30th ITA-AITES World Tunnel Congress, P1-8, Singapore, Singapore
- Comodromos E. M. And Georgiadis,M. K., (2003) “Numerical Assessment of Axial Pile Group Response Based on Load Test” *Computers and Geotechnics*, 30, 6, PP 505-515.
- Dodds A. M. and Martin G. R. (2007) “Modeling Pile Behavior in Large Pile Groups Under Lateral Loading”, Technical Report No. 07-0004, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research.
- Federation of Piling Specialists(FPS). (2006), “**Handbook on Pile Load Testing**”, Geotechnical engineering, Beckenham Kent, pp.29.
- Fellenius B. H. (2015), “**Basics of Foundation Design**”, British Columbia, Sidney, pp.432.
- Fellenius, B. H., (1984) “Negative Skin Friction and Settlement of Piles”, Second International Seminar of Pile Foundations, P 12-24, Nanyang, Singapore
- Grasso P. Mahtab A. and Xu S. (2008), ”**Mechanized Tunneling on Urban Areas – Design Methodology and Construction Control**”, Taylor & Francis Group, London, pp .496.

- Hailu E., (2012), Master. Thesis, “A Comparison of Friction Piles Bearing capacity Based on Theoretical and Empirical Mathematical Models”, Department of Civil and Transport Engineering. Norwegian University of Science and Technology,
- Itasca (2012) “*FLAC<sup>3D</sup>*: Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3-Dimensions’ Version 5.0, User Manual”, Itasca Consulting Group Inc, USA
- Jacobsz S. W. Bowers K. H. and Zanardo G., (2005) “The Effects of Tunneling on Piled Structures on the CTRL”, 5<sup>th</sup> International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, P115-121, Amsterdam, Netherland
- Jacobsz S. W. Standing J. R. and Hagiwara T., (2002) “Centrifuge Modelling of Tunnelling Near Driven Piles”, 4<sup>th</sup> International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, P 89-94, Toulouse, France
- Jing L. (2003) “A Review of Techniques, Advances and Outstanding Issues in Numerical Modelling for Rock Mechanics and Rock Engineering” *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences.*, 40, 3, pp 283-353.
- Judi A. And Moayed R. Z. (2008) “Lateral Bearing Capacity of Piles in Cohesive Soils Based on Soils' Failure Strength Control” *EJGE.*,13, 4, pp 23-31.
- Kaalberg F. J. Teunissen E. A H. and Bosch J. W., (2005) “Dutch Research on the Impact of Shield Tunnelling on Pile Foundations”, 5th International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, P105-27, Amsterdam, Netherland
- Leca E. (2007) “Settlements Induced by Tunneling in Soft Ground” *Tunnelling and Underground Space Technology.*, 22, 2, PP 119–149.
- Lee C. J. and Jacobsz S. W. (2006) “The Influence of Tunnelling on Adjacent Piled Foundations” *Tunnelling and Underground Space Technol.*, 21, 3, PP 430-436.
- Lee C. J. and Yoo N. J., (2007) “The Effect of Tunneling on an Adjacent Single Pile”, underground space the 4<sup>th</sup> Dimension of Metropolises, P 527-532, London England

- Lee Y. J. and Bassett R. H. (2007) “Influence Zones for 2D Pile–Soil-Tunnelling Interaction Based on Model Test and Numerical Analysis” *Tunnelling and Underground Space Technology*, 22, 3, PP 325-342.
- Liu H. Zhang, N. and Li, Z. (2011) “Numerical Analysis of Bearing Capacity of Pile Foundation Due to Urban Metro Tunneling” *Geotechnical special Publication.*, 24, 215, pp 191-198.
- Nakajima M. Saitoh S. and Nakamura H., (1992) “Planning of Underground Railway Directly Below Extremely Large Overhead Expressway Piers in Tokyo”, Proceeding of the International Congress ‘Towards New Worlds in Tunnelling’, **P81-88**, Acapulco, Mexico
- Piotrowski T. (2015) “Numerical Modelling and Bearing Capacity Analysis of Pile Foundation” *procediaEngineering.*, 111, 2, pp 356-363.
- Reese L. C. Cox W. R. and Koop F. D., (1974) “Field Testing of Laterally Loaded Piles In Sand” , Sixth Annual Offshore Technology Conference, **P478-483**, Dallas, Texas
- Rybnikov A, M. (1990) “Experimental Investigations of Bearing Capacity of Bored-Cast-in-Place Piles” *J. of soil mechanics and foundation engineering.*, 27,2,pp48-52.
- Salini U. And Girish M. S. (2008) “Lateral Load Capacity of Model Piles on Cohesionless Soil” *EJGE.*,14, 8, pp 1-11.
- Selemetas D. Standing J. R. and Mair R., (2005) “The Response of Full-Scale Piles to Tunneling”, 5<sup>th</sup> International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, P **763-769**, Amsterdam, Netherland
- XIA R., (2004), PhD. Thesis, “Tunnel Pile interaction in Clay”, Department of Civil Engineering. National University of Singapore,
- Yoo Ch. (2013) “Interaction Between Tunneling and Bridge Foundation – A 3Dnumerical Investigation” *Computers and Geotechnics*, 49, 13, pp 70-78.

## Abstract

Excavation underground spaces in soils and shallow depths create horizontal and vertical displacement around the underground space. These displacements can shift to surface and cause damage to the Surface structures and their supporting foundations. Studying changes resulting from the passage of tunnel as on of conventional urban underground spaces on the stability of deep foundations is very important. In this study, the effect of tunneling on stability of adjacent piles by carrying finite different analysis with *FLAC<sup>3D</sup>*, During the case study of piles of the bridge in intersection of Emam Ali-Shahid Mahalati highways in the presence of line seven Tehran metro, studied. The main parameters discussed in this study consisted of pile length, pile lateral distance from center of tunnel and tunnel depth. In this study, the effect of the above-mentioned parameters on lateral deformation, settlement of piles, changes of axial forces in piles toe, changes shaft pile strength and bearing capacity of the piles in presence of tunneling in different depth must be evaluated. The results of analysis, indicated that four influence zone formed around tunnel. Piles that their toe is located in first zone that is located above the tunnel and in a lateral distance equal to  $0/6$  tunnel diameter ( $D_T$ ) From center of tunnel and as much as three  $3D_T$  to the surface Extended, compared to the absence of tunnel Showing the biggest drop (%33.1) in reducing pile axial bearing capacity, so this area can be introduced as critical zone of tunneling effect on adjacent piles. Tunneling on Piles that their toe is located in fourth zone which is projected at an angle of 45 from tunnel springline and in lateral distance of  $[X] > 2.1D_T$  Extended it has nor any effect.

Keywords: tunnel, Piles, finite different method, pile bearing capacity, axial force, resistance  
Pile shaft, settlement of pile head



**Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering  
Master of Science in mining Rock Mechanic Engineering**

# **Numerical investigation of piles stability in the vicinity of underground spaces**

*Farzad Ebrahimzade*

**Supervisor:**

*Dr. S.R.Torabi*

**Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of  
Master of Science (M.Sc.)  
In  
Mining Engineering**

April 2016