

آنالیز عددی سه بعدی اندرکنش تونل - خاک - شمع

بابک وفايي ، ناصر عرفاتي ، محمدرضا جعفري

کارشناسی ارشد خاک و پی، دانشکده عمران دانشگاه تفرش
استادیار، دانشکده عمران دانشگاه تفرش

Babak.vafai@gmail.com

Nasser.arafati@gmail.com

چکیده

احداث تونل در نواحی شهری بر روی عملکرد پی های عمیق تاثیر میگذارد. نشست های زمین در اثر تونل زنی و همچنین تغییر مکان های افقی بوجود آمده در زمین در اثر احداث تونل رفتار سازه ای شمع ها را تحت تاثیر قرار داده و باعث بوجود آمدن نیروهای محوری و لنگرهای خمشی اضافی بر شمع می گردد. در این مقاله اثرات حفاری تونل بر شمع های مجاور توسط روش آنالیز سه بعدی اجزا محدود صورت گرفته است. در مدلسازی های عددی برای بررسی اندرکنش تونل - خاک - شمع اثر افت حجم زمین و فاصله افقی شمع از مرکز تونل مورد بررسی قرار می گیرد. نتایج عددی بدست آمده حاکی از آن است که با افزایش مقدار افت حجم، مقادیر نیرو محوری و لنگر های خمشی بوجود آمده اضافی در شمع افزایش می یابند، از طرفی مقادیر نیروهای داخلی اضافی بوجود آمده در شمع به موقعیت شمع از محور قائم تونل بستگی دارد.

کلمات کلیدی: اندرکنش تونل - خاک - شمع، مدلسازی سه بعدی تونل، افت حجم^۱

۱. مقدمه

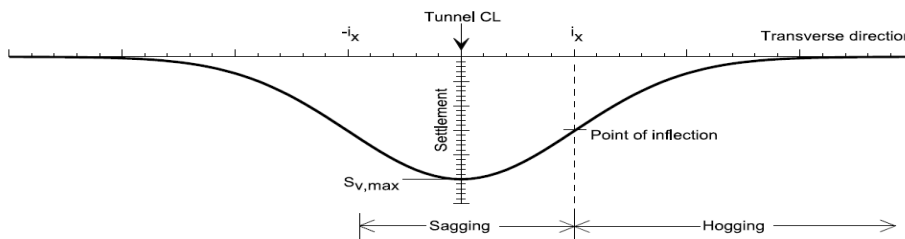
احداث تونل ناچاراً باعث ایجاد تغییر مکان های افقی و قائم در زمین می شود، در محیط های شهری این حرکات بر سازه های سطحی و همچنین سازه های زیر سطحی تاثیر می گذارد. در حالیکه روشهای نیمه تجربی برای پیش بینی تغییر مکان های زمین بکر (زمین بدون حضور سازه های دیگر) ارائه شده است، این روشها برای ارزیابی رفتار زمین هنگام احداث تونل در حضور سازه های دیگر مناسب نیستند. احداث تونل به سازه های سطحی و سازه های زیر سطحی مانند ساختمان ها و تاسیسات تاثیر میگذارد و علت این تاثیرات حرکات زمین است که در داخل سازه تونل در اثر حفاری و احداث آن رخ می دهد. برای تشخیص تغییر شکل ها در رس ها و اثر آنها بر شمع مجاور مدل های آزمایشگاهی سانترافیوژ توسط N.Loganathan & poulos(1998,2000) ساخته شده و عملکرد شمع ها و گروه شمع ها به ازاء موقعیت های مختلف عمق تونل مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج حاصل از آزمایش های سانترافیوژ صورت گرفته حاکی از آن است که اثر تونل زنی بر لنگرهای خمشی و تغییر شکل های جانبی ایجاد شده بر شمع های مجاور وقتی بحرانی است که خط تقارن افقی تونل در تراز نوک شمع واقع شده باشد. در مقابل نیروهای محوری وقتی بحرانی هستند که موقعیت محور افقی تونل نسبت به شمع بگونه ای باشد که تونل در زیر نوک شمع واقع شده باشد. بررسی اثر حفاری و احداث تونل بر شمع ها و گروه شمع توسط روش اجزاء محدود سه بعدی الاستوپلاستیک توسط H.Mroueh & I.Shahrouh(2002) انجام شده است. نتایج حاصل از آنالیزهای عددی و آزمایشگاهی این مطلب را می رساند که احداث تونل در مجاورت شمع ها تاثیر بسزایی بر نیروهای داخلی سازه شمع می گذارد بعلاوه توزیع نیروهای داخلی بستگی به موقعیت کف شمع نسبت به خط تقارن افقی تونل دارد.

¹ Volume loss

در این پژوهش، با در نظرگیری فواصل مختلف شمع از محور قائم تونل و همچنین افت حجم های مختلف اثر احداث تونل بر رفتار شمع مورد بررسی قرار گرفته است.

۲. بررسی فرضیات و کلیات

احداث تونل ناچاراً باعث حفاری زیادی خاک بیشتر از آنچه به صورت حجم حفاری شده که در حالت تئوریک محاسبه شده است، می شود. اندازه این اضافه حفاری توسط پارامتر V_L تعریف می گردد و عبارتست از نسبت اختلاف حجم خاک حفاری شده و حجم تونل (بدر نظر گرفتن قطر خارجی) بر حجم تونل که به صورت درصد بیان می گردد. پارامتر افت حجم مقیاسی برای دستخوردگی کل زمین است که سبب نشست در سطح زمین می شود و علت آن جابجایی های خاک به داخل مقطع حفاری و تغییر مکان های شعاعی خاک اطراف سیر و حائل می باشد. (Peck (1969) اظهار داشت که نمودار نشست سطحی در مقطع عرضی (شکل ۱) را می توان بوسیله یک تابع گوسی نمایش داد و این بیان ریاضی بصورت گسترده ای بسط داده شد، طبق این روش نشست عمودی در مقطع عرضی از رابطه ۱ بدست می آید [۱].



شکل ۱- نمودار نشست سطحی در مقطع عرضی

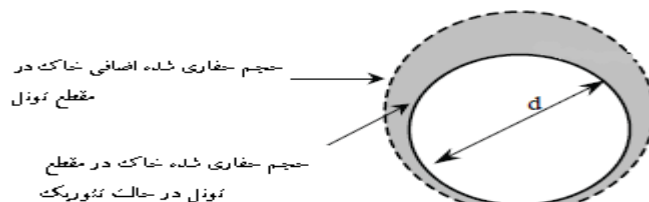
$$S_v(x) = S_{v,max} \cdot e^{-\frac{x^2}{2ix^2}} \quad (1)$$

که در این رابطه $S_v(x)$ مقدار نشست در فاصله x از محور تونل، $S_{v,max}$ بیشترین نشست اندازه گیری شده در بالای محور تونل و پارامتر ix فاصله خط تقارن قائم مرکزی تونل تا نقطه عطف نمودار نشست است، یک نمونه از نمودار نشست عرضی در شکل (۱) آمده است. مساحت زیر نمودار نشست را می توان با استفاده از رابطه ۲ تعریف نمود.

$$V_s = \int_{-\infty}^{+\infty} S_v dx = \sqrt{2\pi} ix S_{v,max} \quad (2)$$

که در این رابطه V_s حجم نمودار نشست بر واحد طول است. در مصالح با نفوذ پذیری کم مانند رس سخت پاسخ اولیه زمین در اثر احداث تونل را می توان به صورت زهکشی نشده در نظر گرفت، بنابراین در این شرایط حجم نشست سطحی برابر با حجم حفاری شده اضافی خاک در مقطع تونل است که در حالت تئوریک محاسبه شده است. شکل (۲) اختلاف حجم خاک حفاری شده و حجم خاک تئوریک را نشان می دهد. اضافه حفاری شده بر واحد طول بصورت رابطه ۳ تعریف می شود.

$$V_l = \frac{V_s}{\frac{\pi D^2}{4}} \quad (3)$$



شکل ۲- حجم حفاری شده اضافی خاک در مقطع تونل و حجم حفاری شده در حالت تئوریک

که در این رابطه V_l پارامتر افت حجم و D قطر تونل است، پارامتر افت حجم به صورت درصد بیان می شود [۲]. در شرایط تونل زنی در حالت زهکشی نشده زمین، حجم نشست زمین برابر با افت حجم خاک حفاری شده داخل تونل می باشد ($V_l = V_t$). این در حالیتیست که این مقدار در شرایط زهکشی شده به علت اتساع و تورم ناشی از باربرداری که در نهایت منجر به متورم شدن خاک می گردد، کمتر از حجم حفاری شده داخل تونل که بیانگر حجم خاک از دست رفته در داخل تونل است، می باشد ($V_l < V_t$)، که V_t بیانگر افت حجم در داخل تونل است. با این حال این اختلاف به مقداری کوچک میل می کند و قابل صرف نظر است و فرض می شود که در شرایط زهکشی شده ($V_l \approx V_t$) می باشد. [۲]

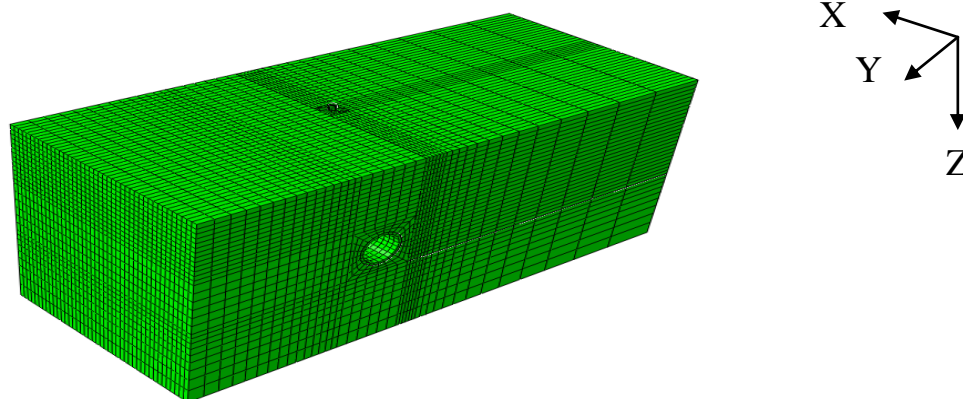
بررسی رفتار شمع در اثر تونل زنی به طول شمع بستگی دارد. از اینرو محققین در مطالعه اندرکنش شمع - خاک - تونل، شمع ها را به دو گروه شمع های بلند و شمع های کوتاه تقسیم بندی کرده اند. شمع کوتاه شمعی است که که محور تونل در زیر نوک شمع قرار می گیرد، ($L_p/H < 1$) در حالیکه شمع بلند شمعی است که موقعیت محور تقارن افقی تونل در بالای نوک شمع قرار بگیرد ($L_p/H < 1$) که L_p طول شمع و H عمق تونل از سطح زمین تا مرکز تونل است. [۴ و ۵]

۳. مدل سازی عددی به روش اجزای محدود

یکی از روش های مطالعه نحوه عملکرد و رفتار سازه های مختلف در مهندسی ژئوتکنیک، استفاده از مدل های عددی است. در این مقاله با استفاده از نرم افزار ABAQUS 6.1.11 مدل های عددی ساخته شده است و رفتار پارامترهای تأثیر گذار، مورد مطالعه قرار می گیرند.

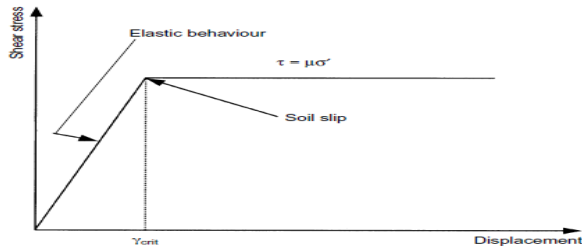
۴. صحت مدل سازی های انجام گرفته در نرم افزار ABAQUS 6.11.1 [۶]

به منظور بررسی صحت رفتار مدل تونل - خاک - شمع، نتایج یک مدل ساخته شده توسط H.Mroueh & I.Shahrour(2002) در نرم افزار اجزاء محدود PECPLAS با مدل ساخته شده در نرم افزار ABAQUS ۶,۱۱,۱ مقایسه می شود. شکل ۲، نشان دهنده شبکه بندی سه بعدی اجزای محدود استفاده شده در این تحلیل پارامتری می باشد. توده خاک دارای طول 12D در جهت محور (X)، 7D در جهت محور طولی (Y) و 5.5D در جهت محور قائم (Z) می باشد. قطر تونل برابر $D=7.5$ متر، عمق آن از سطح زمین تا محور تقارن افقی تونل برابر $H=2.5D$ و همچنین ضخامت لاینینگ برابر با $e=0.5$ متر می باشد. قطر و طول شمع به ترتیب برابر $D_p=1$ متر و $L_p=۲۲,۵$ متر می باشد. یک شبکه بندی نسبتاً ریز در اطراف شمع استفاده شده، در حالی که یک شبکه بندی نسبتاً درشت تر در نقاط نزدیک به مرزها مورد استفاده قرار گرفته است. شبکه بندی بر روی لایه ای صلب فرض شده و مرزهای قائم در سمت چپ و راست به شکل غلطکی اجازه حرکت رو به پایین به لایه های خاک را می دهند. مشخصات مصالح شمع، خاک و لاینینگ مطابق جدول ۱ است. به منظور ساده سازی، برای لایه خاک، مقادیر ثابتی برای مدول یانگ و پارامترهای مقاومت برشی زهکشی شده استفاده شده است.



شکل ۳ - شبکه بندی اجزای محدود در تحلیل سه بعدی

رفتار مماسی شامل اندرکنش مماس برسطوح و یا لغزش دو سطح نسبت به یکدیگر می باشد. برای شبیه سازی رفتار لغزشی در سطوحی که شمع و خاک در تماس هستند از قانون اصطکاک کولمب استفاده شده است (شکل ۴). بدین منظور از ضریب اصطکاک برابر $\mu = 0.3$ و جابجایی محدود شده برابر $\gamma_{crit} = 5mm$ استفاده شده است. با ضرب تنش موثر نرمال (σ) بین سطوح دارای تماس در ضریب اصطکاک، تنش برشی محدود ($\sigma\mu$) بدست می آید. اگر تنش برشی اعمال شده در امتداد سطوح کمتر از ($\sigma\mu$) باشد سطوح در تماس به یکدیگر می چسبند و گره های المان های خاک که در تماس با شمع هستند زمانی که تنش برشی اعمال شده در امتداد سطوح از ($\sigma\mu$) تجاوز نماید در امتداد شمع می لغزند. [۶]

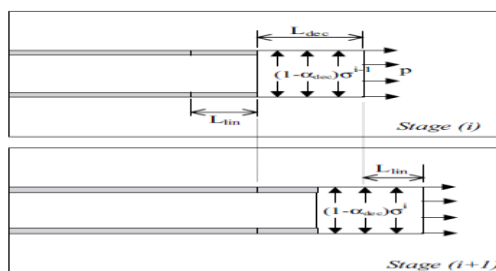


شکل ۴- رفتار المان سطح تماس مماسی

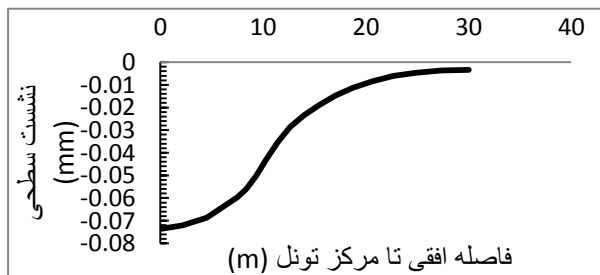
جدول ۱- مشخصات مصالح

پارامتر	واحد	نشانه	مصالح		
			خاک ماسه ای	حائل تونل	شمع
مدل رفتاری	-	-	موهر- کلمب	الاستیک خطی	الاستیک خطی
شرایط زهکشی	-	-	زهکشی شده	-	-
وزن مخصوص	kN/m ³	γ	20	۲۵	25
مدول یانگ	MPa	E	30	۳۵۰۰۰	۲۳۵۰۰
ضریب پواسون	-	ν	0.3	۰.25	0.25
چسبندگی	kPa	C	5	-	-
ضریب فشار جانبی خاک	-	K ₀	0.5	-	-
زاویه اصطکاک داخلی	درجه	φ	۲۷	-	-
اتساع	درجه	ψ	۵	-	-

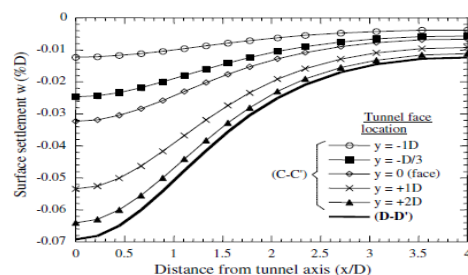
مدلسازی احداث تونل یک مسئله سه بعدی است. چراکه در آن مواردی از قبیل پیروسه حفاری خاک، اعمال فشار به سینه کار، نصب حائل و گروت ریزی و رفتار غیر خطی خاک و حائل وجود دارد. برای مدلسازی روند تونل زنی سه بعدی از روش همگرایی - محصوریت استفاده گردیده است. حرکات خاک را می توان بواسطه پارامتر آزادسازی تنش α_{dec} و طول منطقه حائل بندی نشده L_{dec} کنترل کرد. همچنین این دو پارامتر اثر فاصله بین حائل و خاک و تزریق گروت در این فاصله را در نظر می گیرند. شکل (۵) در گام نخست حفاری فشارهای داخلی (P_0) در مقطع حفاری برابر فشارهای خارجی است این در حالی است که حائل هنوز نصب نشده است. در گام دوم توسط ضریب α_{dec} بخشی از فشارهای داخلی آزاد می شوند و در گام بعدی المان های لاینیگ به مدل اضافه شده و در گام نهایی مقدار α_{dec} برابر با صفر می شود و با اتمام عملیات حائل گذاری فشار داخلی برابر صفر می گردد. [۷]



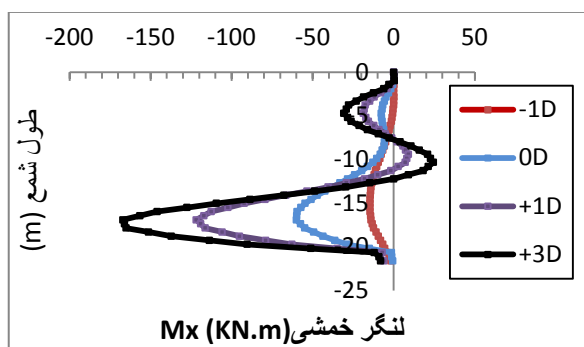
شکل (۵) روند مدلسازی سه بعدی تونل



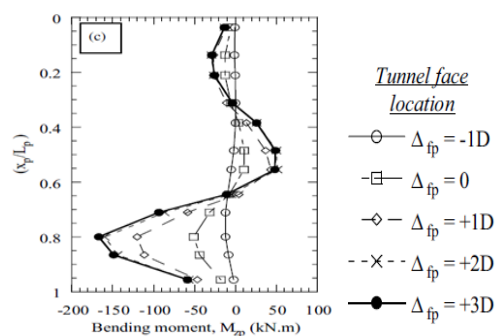
شکل ۶-ب - نمودار نشست بدست آمده در این مطالعه



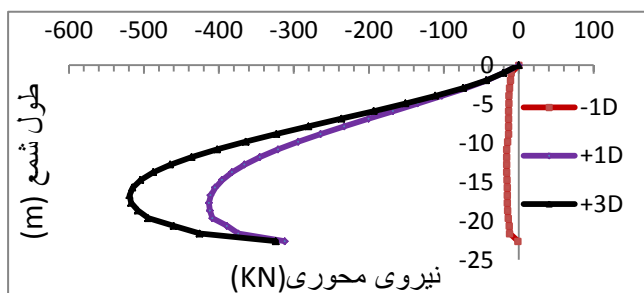
شکل ۶-الف - نمودار نشست [۷]



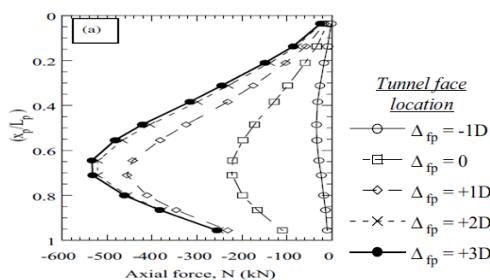
شکل ۷-ب توزیع لنگر خمشی در طول شمع در این مطالعه



شکل ۷-الف توزیع لنگر خمشی در طول شمع [۸]



شکل ۸-ب توزیع نیروی محوری در طول شمع در این مطالعه



شکل ۸-الف توزیع نیروی محوری در طول شمع [۸]

شکل (۶-الف) و (۶-ب) نمودار نشست سطحی زمین بدست آمده را به ترتیب توسط H.Mroueh & I.Shahrour (2002) و این مطالعه را نمایش می دهند. همانطور که ملاحظه می گردد نشست سطحی زمین در هر دو نمودار برابر ۷ سانتی متر بدست آمده است. شکل (۷-الف) و (۷-ب) نمودارهای بدست آمده توزیع لنگر خمشی در امتداد شمع را به ترتیب توسط H.Mroueh & I.Shahrour (2008) و این مطالعه نشان میدهند. مشاهده می شود که بیشترین مقدار لنگر خمشی اضافی بدست آمده در این دو نمودار برابر 164 KN.m بدست آمده است. به علاوه، شکل (۸-الف) و (۸-ب) توزیع نیروی محوری در امتداد شمع را در اثر احداث تونل نمایش می دهند. همانطور که ملاحظه می شود بیشترین نیروی محوری در این دو نمودار برابر 510 KN بدست آمده است. بنابراین می توان نتیجه گرفت که نتایج بدست آمده از تحلیل سه بعدی با نرم افزار ABAQUS 6.11.1 مطابق مقادیر بدست آمده توسط H.Mroueh & I.Shahrour (2002, 2008) می باشد.

۵. تحلیل های عددی

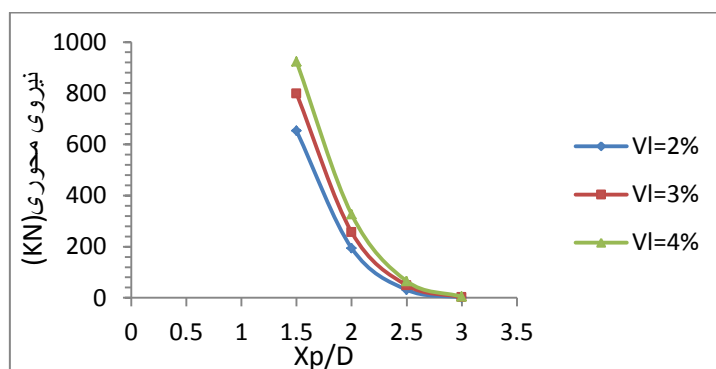
به منظور بررسی اثر پارامتر افت حجم زمین بر شمع های مجاور از سه حالت مختلف افت حجم استفاده می شود، که عبارتند از $V_1 = 2\%, 3\%, 4\%$ و علاوه چهار فاصله افقی مختلف مرکز شمع از مرکز تونل مورد بررسی قرار گرفته است که شامل $X_p = 1.5D, 2D, 2.5D, 3D$ می باشد. برای بدست آوردن مقادیر افت حجم های مورد نظر از تغییر دادن پارامتر ضریب آزاد سازی تنش α_{dec} به صورت سعی و خطا و همچنین ثابت در نظر گرفتن پارامتر طول محدوده حائل گذاری نشده L_{dec} استفاده شده است.

جدول (۲) بیشترین نیروی محوری اضافی بدست آمده به ازاء افت حجم های مختلف و فواصل مختلف شمع از تونل

نیروی محوری (KN)	فاصله شمع از محور قائم تونل			
	1.5D (KN)	2D (KN)	2.5D (KN)	3D (KN)
VL=2(%)	652.678	194.465	31.498	1.441
VL=3(%)	798.527	256.583	49.21	2.675
VL=4(%)	923.217	326.297	65.444	4.427

شکل (۹) و جدول (۲) بیشترین نیروی محوری فشاری ایجاد شده در شمع بازاء افت حجم های مختلف و فاصله های مختلف شمع از محور قائم تونل نشان می دهد. همانطور که ملاحظه می گردد با افزایش فاصله افقی بین شمع و تونل مقادیر نیروی محوری اضافی کاهش می یابد. با بررسی حالتی که

مقدار افت حجم برابر ۲٪ است می توان دریافت که هنگامی که شمع در نزدیکترین فاصله از تونل قرار دارد مقدار نیروی محوری اضافی در شمع برابر 652.678KN است. با افزایش فاصله شمع از تونل این مقدار به اندازه ۷۰٪ کاهش یافته و به مقدار 194.465KN در فاصله $X_p=2D$ رسیده است. روند کاهش این پارامتر با دورتر شدن فاصله شمع از تونل ادامه یافته و به ترتیب با ۸۳٪، ۹۵٪ کاهش به ازاء فواصل $X_p=2.5D$ ، $X_p=3D$ به مقادیر 31.498KN و 1.441KN رسیده است. با مقایسه مقدار نیروی محوری ایجاد شده در دورترین و نزدیکترین فاصله شمع از تونل می توان دریافت که این مقدار در دورترین فاصله به میزان ۹۹٫۷۶٪ نسبت به نزدیکترین فاصله کاهش یافته است. در حالتی که مقدار $VL=3\%$ است بیشترین مقدار نیروی محوری در فاصله $X_p=1.5D$ برابر 798.527KN است که این مقدار با افزایش فاصله شمع از تونل با ۶۸٪ کاهش برابر 256.583KN به ازاء فاصله $X_p=2D$ بدست آمده است. با مقایسه مقدار نیروی محوری ایجاد شده در دورترین و نزدیکترین فاصله شمع از تونل می توان دریافت که این مقدار در دورترین فاصله به میزان ۹۹٫۶۶٪ نسبت به نزدیکترین فاصله کاهش یافته است. این روند رو به کاهش با افزایش فاصله شمع از تونل ادامه یافته و به ترتیب با ۶۸٪ و ۹۴٫۵ درصد کاهش به ازاء فواصل $X_p=2.5D$ و $X_p=3D$ معادل 49.21 KN و 2.675 KN بدست آمده است. با بررسی حالت $VL=4\%$ می توان دریافت که بیشترین نیروی محوری اضافی ایجاد شده در شمع معادل 923.327 KN در فاصله $X_p=1.5D$ بدست آمده است. روند رو به کاهش این پارامتر ادامه داشته و به ترتیب با ۸۰٪ و ۹۳٫۳٪ کاهش به ازاء $X_p=2.5D$ و $X_p=3D$ برابر 64.444 KN و 4.427 KN بدست آمده است. با مقایسه مقدار نیروی محوری ایجاد شده در دورترین و نزدیکترین فاصله شمع از تونل می توان دریافت که این مقدار در دورترین فاصله به میزان ۹۹٫۵۲٪ نسبت به نزدیکترین فاصله کاهش یافته است.

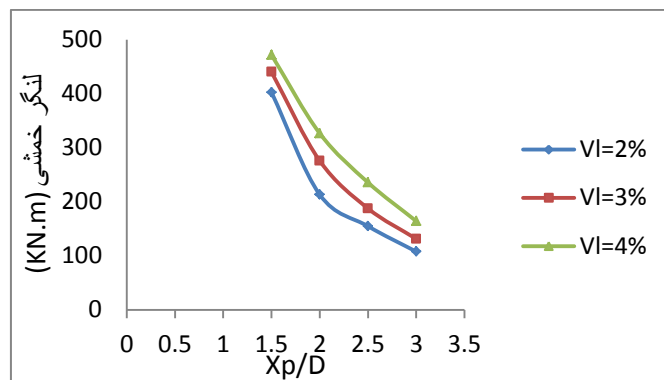


شکل ۹- مقایسه بیشترین نیروی محوری فشاری ایجاد شده در شمع بازاء افت حجم های مختلف و فاصله های مختلف

جدول ۳- مقادیر بیشترین لنگر خمشی (M_x) بدست آمده به ازاء افت حجم های مختلف و فواصل مختلف شمع از تونل

لنگر خمشی $M_x(KN.m)$	فاصله شمع از محور قائم تونل			
	1.5D	2D	2.5D	3D
$VL=2(\%)$	402.51	213.15	154.67	107.668
$VL=3(\%)$	439.939	275.613	187.523	131.177
$VL=4(\%)$	471.688	326.411	235.595	164.087

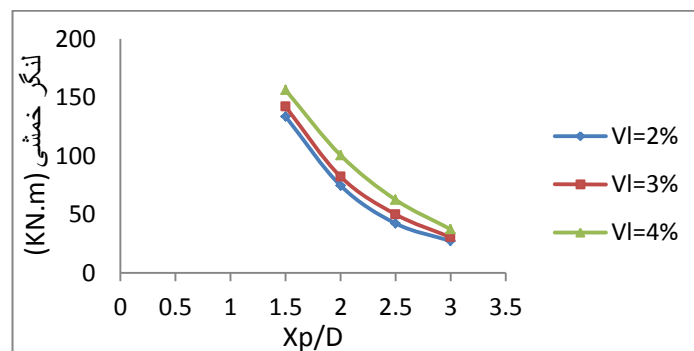
شکل (۱۰) و جدول (۳) مقدار لنگر خمشی اضافی ایجاد شده در شمع (M_y) بازاء افت حجم های مختلف و فاصله های مختلف شمع از محور قائم تونل نشان می دهد. همانطور که ملاحظه می گردد با افزایش فاصله افقی بین شمع و تونل مقادیر لنگر خمشی اضافی کاهش می یابد. با بررسی حالتی که مقدار افت حجم برابر ۲٪ است می توان دریافت که هنگامی که شمع در نزدیکترین فاصله از تونل قرار دارد مقدار لنگر خمشی اضافی ایجاد شده در شمع (M_x) برابر 402.51 KN.m است. با افزایش فاصله شمع از تونل این مقدار به اندازه ۴۷٪ کاهش یافته و به مقدار 213.15 KN.m در فاصله $X_p=2D$ رسیده است. روند کاهش این پارامتر با دورتر شدن فاصله شمع از تونل ادامه یافته و به ترتیب با ۲۷٫۴٪، ۳۰٫۴٪ کاهش به ازاء فواصل $X_p=2.5D$ ، $X_p=3D$ به مقادیر 154.67 KN.m و 107.668 KN.m رسیده است. با مقایسه مقدار لنگر خمشی اضافی ایجاد شده در شمع (M_x) در دورترین و نزدیکترین فاصله شمع از تونل می توان دریافت که این مقدار در دورترین فاصله به میزان ۷۰٫۲٪ نسبت به نزدیکترین فاصله در حالت $VL=2\%$ کاهش یافته است. در حالتی که مقدار $VL=3\%$ است بیشترین مقدار لنگر خمشی در فاصله $X_p=1.5D$ برابر 439.939 KN.m است که این مقدار با افزایش فاصله شمع از تونل با ۳۷٫۳۵٪ کاهش برابر 275.613KN به ازاء فاصله $X_p=2D$ بدست آمده است.



شکل ۱۰- مقایسه بیشترین لنگر خمشی (M_x) ایجاد شده در شمع بازاء افت حجم های مختلف و فاصله های مختلف

جدول ۴- مقادیر بیشترین لنگر خمشی (M_y) بدست آمده به ازاء افت حجم های مختلف و فواصل مختلف شمع از تونل

لنگر خمشی M_y (KN.m)	فاصله شمع از محور قائم تونل			
	1.5D	2D	2.5D	3D
VL=2(%)	133.721	74.5968	42.2255	27.2302
VL=3(%)	142.123	82.2524	50.0222	30.4105
VL=4(%)	156.358	100.573	62.4721	37.2875



شکل ۱۱- مقایسه لنگر خمشی (M_y) ایجاد شده در شمع بازاء افت حجم های مختلف و فاصله های مختلف

روند رو به کاهش با افزایش فاصله شمع از تونل ادامه یافته و به ترتیب با 31.96٪ و 30 درصد کاهش به ازاء فواصل $X_p=2.5D$ و $X_p=3D$ معادل 187.523 KN.m و 131.177 KN.m بدست آمده است. با مقایسه مقدار مقدار لنگر خمشی اضافی ایجاد شده در شمع (M_x) در دورترین و نزدیکترین فاصله شمع از تونل می توان دریافت که این مقدار در دورترین فاصله به میزان 73.25٪ نسبت به نزدیکترین فاصله کاهش یافته است. با بررسی حالت VL=4% می توان دریافت که بیشترین مقدار لنگر خمشی اضافی ایجاد شده در شمع معادل 471.688 KN.m در فاصله $X_p=1.5D$ بدست آمده است. روند رو به کاهش این پارامتر ادامه داشته و بترتیب با 80٪ و 93.3٪ کاهش به ازاء $X_p=2.5D$ و $X_p=3D$ برابر 235.595KN.m و 164.087KN بدست آمده است.

شکل (۱۱) و جدول (۴) مقدار لنگر خمشی اضافی ایجاد شده در شمع (M_y) بازاء افت حجم های مختلف و فاصله های مختلف شمع از محور قائم تونل نشان می دهد. همانطور که ملاحظه می گردد با افزایش فاصله افقی بین شمع و تونل مقادیر لنگر خمشی اضافی کاهش می یابد. با بررسی حالتی که مقدار افت حجم برابر ۲٪ است می توان دریافت که هنگامی که شمع در نزدیکترین فاصله از تونل قرار دارد مقدار لنگر خمشی اضافی ایجاد شده در شمع (M_y) برابر 133.721 KN.m است. با افزایش فاصله شمع از تونل این مقدار به اندازه 44.2٪ کاهش یافته و به مقدار 74.5968KN.m در فاصله $X_p=2D$ رسیده است. روند کاهشی این پارامتر با دورتر شدن فاصله شمع از تونل ادامه یافته و به ترتیب با 43.4٪، 35.5٪ کاهش به ازاء فواصل $X_p=2.5D$ ، $X_p=3D$ به مقادیر 42.2455 KN.m و 27.2305 KN.m رسیده است. با مقایسه مقدار مقدار لنگر خمشی اضافی ایجاد شده در شمع (M_y) در دورترین و نزدیکترین فاصله شمع از تونل می توان دریافت که این مقدار در دورترین فاصله به میزان 79.63٪ نسبت به نزدیکترین فاصله کاهش در حالت VL=2% یافته است. در حالتی که مقدار VL=3% است بیشترین مقدار لنگر خمشی در فاصله

$X_p=1.5D$ برابر 149.123KN.m است که این مقدار با افزایش فاصله شمع از تونل با 42.12% کاهش برابر 82.2524KN.m به ازاء فاصله $X_p=2D$ بدست آمده است. این روند رو به کاهش با افزایش فاصله شمع از تونل ادامه یافته و به ترتیب با 39.2% و 39.2% درصد کاهش به ازاء فواصل $X_p=2.5D$ و $X_p=3D$ معادل 50.02KN.m و 30.41KN.m بدست آمده است. با مقایسه مقدار مقدار لنگر خمشی اضافی ایجاد شده در شمع (M_x) در دورترین و نزدیکترین فاصله شمع از تونل می توان دریافت که این مقدار در دورترین فاصله به میزان 78.6% نسبت به نزدیکترین فاصله در حالت $VL=3\%$ کاهش یافته است. با بررسی حالت $VL=4\%$ می توان دریافت که بیشترین مقدار لنگر خمشی اضافی ایجاد شده در شمع معادل 156.358KN.m در فاصله $X_p=1.5D$ بدست آمده است. روند رو به کاهش این پارامتر ادامه داشته و بترتیب با 36% و 37.8% کاهش به ازاء $X_p=2.5D$ و $X_p=3D$ برابر 62.47KN.m و 37.2875KN بدست آمده است.

۶. خلاصه و نتیجه گیری

۱- اثر احداث تونل بر نیروی محوری اضافی ایجاد شده در شمع تا فاصله ای معادل $X_p=2D$ در مقطع عرضی تاثیر دارد و با دورتر شدن فاصله شمع از محور تونل این اثر به شدت کاهش می یابد. که علت آن جابجایی های قائم خاک است. با افزایش فاصله شمع از تونل جابجایی های قائم خاک در محل حضور شمع کاهش می یابد در نتیجه این امر سبب کاهش نیروی محوری در ازاء دورتر شدن فاصله شمع از تونل می گردد.

۲- افزایش افت حجم بر رفتار شمع اثر گذاشته و موجب افزایش لنگرهای خمشی اضافی و نیروهای محوری اضافی بوجود آمده در شمع می شود که علت آن افزایش جابجایی های افقی و قائمی است که در اثر تونل زنی در خاک بوجود می آید.

۳- در اثر احداث تونل ساختمان خاک دچار دستخوردگی شده که این امر سبب ایجاد تغییر مکان های جانبی در شمع و خاک می شود. اثر تونل زنی بر لنگرهای خمشی اضافی ایجاد شده در شمع و با دورتر شدن فاصله شمع از محور تونل این اثر به شدت کاهش می یابد. که علت آن جابجایی های جانبی خاک است. با افزایش فاصله شمع از تونل جابجایی های جانبی خاک در محل حضور شمع کاهش می یابد در نتیجه این امر سبب کاهش نیروی محوری در ازاء دورتر شدن فاصله شمع از تونل می گردد.

۷. مراجع

1. Peck, R. B. 1969. Deep excavations and tunneling in soft ground. Pages 225{290 of: Proc.of the 7th int. Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. State of the art volume. Sociedad Mexicana de Mecanica de Suelos, A. C.
2. Franzius J.N (2003), "Behaviour of buildings due to tunnel induced subsidence" Ph.D. thesis, University of London.
3. S.C. Moller *, P.A. Vermeer,(2008) On numerical simulation of tunnel installation, Tunneling and Underground Space Technology 461-475
4. Loganathan, N. & Poulos, H. G. 1998. Analytical prediction fortunneling-induced ground movements in clays. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCEVol. 124 (9): 846 -856
5. Loganathan, N., Poulos, H. G. & Stewart, D. P. (2000). Centrifuge model testing of tunneling -induced ground and pile deformations, Geotechnique 50, No. 3, 283-294
6. ABAQUS v. 6.11.1 (2011). Hibbitt, Karlsson and Sorenson, Inc
7. H. Mroueh and I. Shahrour,(2008), A simplified 3D model for tunnel construction using tunnel boring machines, Tunneling and Underground Space Technology 23 (2008) 38-45
- 8- H. Mroueh and I. Shahrour,(2002), Three-dimensional finite element analysis of the interaction between tunneling and pile foundations, INTERNATIONAL JOURNAL FOR NUMERICAL AND ANALYTICAL METHODS IN GEOMECHANICS(217-230)