



## تحلیل عددی نشست بزرگراه شهید کلانتری در کیلومتر ۷+۸۰۰

کاظم بدو<sup>۱</sup> و رقیه امامی<sup>۲</sup>

گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه ارومیه، صندوق پستی ۱۶۵

پست الکترونیکی: k.badv@urmia.ac.ir

### خلاصه

طراحی و احداث خاکریز روی بسترهای سست یکی از مسائل چالشی در مهندسی ژئوتکنیک بشمار میرود. از خصوصیات اصلی خاکهای سست تراکم پذیری زیاد و مقاومت برشی کم آنها می باشد که سبب ایجاد تغییر شکلهای بلند مدت و بروز مشکلاتی در پایداری خاکریز می شود. خاکریز بزرگراه شهید کلانتری ارومیه به عنوان بخشی از پروژه میانگذر دریاچه ارومیه در تاریخ ۱۳۷۱ توسط اداره کل راه و ترابری استان آذربایجان غربی احداث شده است. این جاده تا تاریخ ۱۳۸۱ در کیلومتر ۷+۸۰۰ در طول تقریبی ۱۰۰ متر بطور قابل ملاحظه ای نشست کرده است. حداکثر میزان نشست حدود ۱/۱ متر در وسط محور صد متری و شانه راست بزرگراه بوده که منجر به استفاده بیش از ۵۰۰ تن آسفالت جهت ترمیم بزرگراه گردیده است. کاوش های ژئوتکنیکی وجود لایه ضخیم خاک آلی (پیت) در زیر و عمدتاً در حاشیه راست بزرگراه از یک طرف و وجود لایه های رس سیلتی سست از طرف دیگر را از عوامل اصلی نشست جاده در این قسمت مسیر نشان داد. در این تحقیق با استفاده از نرم افزار Plaxis 8.2 و مدل رفتاری خاک نرم خزشی (Soft soil creep) میزان نشست محاسبه شده و با مقادیر واقعی مقایسه گردید. بطور کلی نتایج تحلیل عددی تطبیق خوبی را با مقادیر نشستهای مشاهده شده نشان داد.

کلمات کلیدی: بزرگراه شهید کلانتری، خاکریز، بستر سست، نشست، مدل خاک نرم خزشی، Plaxis

### مقدمه

در سالهای ۱۳۷۲-۱۳۷۱ قسمتی از مسیر جاده شهید کلانتری در کیلومتر ۷+۸۰۰ توسط اداره کل راه و ترابری استان آذربایجان غربی احداث و قشرهای آسفالت مطابق مشخصات طرح اجرا شدند. از این تاریخ تا تاریخ ۱۳۷۶ این قسمت از جاده در طول تقریبی ۱۰۰ متر به مقدار قابل ملاحظه ای نشست کرد. میزان نشست تا تاریخ ۱۳۷۶ حدود ۰/۷ متر در وسط محور یکصد متری و در شانه راست جاده بوده است. در تاریخ ۱۳۷۶ اداره کل راه استان اقدام به ترمیم نشست با ریختن آسفالت به سطح جاده می نماید که بنا به اظهارات شفاهی حدود ۵۰۰ تن آسفالت جهت ترمیم مصرف می شود و ضخامت آسفالت ترمیمی در گودترین نقطه حدود ۰/۷ متر بوده است. از تاریخ ۱۳۷۶ (تاریخ ترمیم آسفالتی) لغایت فروردین ۱۳۸۱ نشست این قسمت از مسیر ادامه پیدا کرده است. حداکثر میزان نشست در گودترین نقطه که در وسط مسیر و در حاشیه راست جاده بوده است، در حدود ۰/۴ متر بوده است. مطابق شکل (۱) وجود یک لایه خاک آلی پیت (Peat) در نزدیکی سطح زمین از مشخصه های بارز وضعیت هیدروژئولوژیک در این منطقه است. ضخامت این لایه در حاشیه راست جاده در حدود ۱۰ متر می باشد لکن در حاشیه چپ ضخامت خاک آلی کمتر است. بقیه لایه ها عموماً لایه های سست رسی و سیلتی هستند که این نوع خاکها جزو خاکهای سست میباشند و از خصوصیات اصلی آنها تراکم پذیری زیاد، میزان حد روانی و حد خمیری بالا، درصد رطوبت طبیعی بالا و مقاومت برش کم (معمولاً کمتر از 25 KPa) می باشد [1]. وجود لایه ضخیم خاک پیت در زیر و عمدتاً در حاشیه راست جاده از یک طرف و وجود لایه های رسی سیلتی سست از طرف دیگر از عوامل اصلی نشست جاده در این قسمت از مسیر است. سطح آب زیرزمینی در این قسمت بالا بوده و در نزدیکی (حدود یک متری) سطح زمین است. وجود ضخامت بیشتر لایه خاک آلی در حاشیه راست جاده نسبت به حاشیه چپ آن باعث شده است که سمت راست جاده نسبت به سمت چپ آن نشست بیشتری داشته باشد.

روش المان محدود از زمانیکه برای اولین بار توسط [2] Clough and Woodward مورد استفاده قرار گرفت به عنوان روشی قدرتمند جهت ارزیابی رفتار شیروانی ها و خاکریزها شناخته شد. نرم افزار مورد استفاده برای تحلیل نشست جاده شهید کلانتری نرم افزار Plaxis 8.2 می باشد که توسط محققین بسیاری همچون [3] Hedy et. al., [4] Hunter and Fell, [5] Vermer et. al. برای تحلیل نشست خاکریز راه مورد استفاده قرار گرفته است [6].

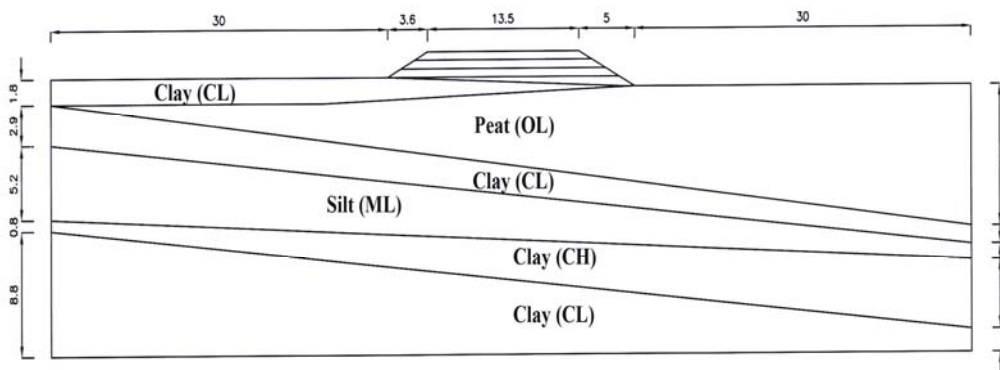
<sup>۱</sup> دانشیار

<sup>۲</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد خاک و بی



### هندسه مدل

شکل (۱) مقطع عرضی خاکریز جاده شهید کلانتری در کیلومتر ۷+۸۰۰ را نشان می‌دهد. عرض این خاکریز ۱۳/۵ متر، ارتفاع آن در محور وسط خاکریز ۲/۷ متر و شیبهای طرفین آن  $V(1) : H(2)$  می‌باشد. بستر خاکریز تا عمق ۲۰ متری شامل لایه‌هایی از خاک سست نظیر پیت، سیلت و رس می‌باشد. عرض پی بگونه‌ای در نظر گرفته شده است که فاصله مرزهای کناری مدل تا کناره خاکریز حدوداً ۳۰ متر باشد. سطح آب زیرزمینی ۱ متر زیر تراز زمین طبیعی در نظر گرفته شده است. جهت شبیه‌سازی نحوه ساخت خاکریز، بدنه خاکریز به لایه‌هایی به ضخامت ۰/۶ متر تقسیم شده است.



شکل ۱- شکل شماتیک هندسه مدل خاکریز و لایه های پی

### خصوصیات مصالح

با توجه به اینکه بستر خاکریز از مصالح سست تشکیل یافته است و این مصالح دارای نشست خزشی نیز می‌باشند جهت مدلسازی این خاکها از مدل رفتاری خاک نرم خزشی (Soft Soil Creep) استفاده شده است [7, 8, 9]. پارامترهای مقاومتی لایه های پی در جدول (۱) و پارامترهای مقاومتی خاکریز در جدول (۲) ارائه گردیده است.

جدول ۱- مشخصات مصالح لایه های پی

Parameter	Name	Clay (CL)	Peat (OL)	Clay (CL)	Silt (ML)	Clay (CH)	Clay (CL)	Unit
Material model	Model	SSC	SSC	SSC	SSC	SSC	SSC	-
Type of material behaviour	Type	Undrained	Undrained	Undrained	Undrained	Undrained	Undrained	-
Soil unit weight above p.l.	$\gamma_{unsat}$	15.5	14.8	15.5	13.4	12.6	11.1	kN/m <sup>3</sup>
Soil unit weight below p.l.	$\gamma_{sat}$	17	18	16	18.6	17.7	15	kN/m <sup>3</sup>
Horizontal permeability	$k_x$	3.00E-05	3.50E-04	1.00E-04	3.80E-04	6.65E-04	3.09E-04	m/day
Vertical permeability	$k_y$	3.00E-05	3.50E-04	1.00E-04	3.80E-04	6.65E-04	3.09E-04	m/day
Modified compression index	$\lambda^*$	0.06	0.12	0.07	0.075	0.064	0.098	-
Modified swelling index	$\kappa^*$	0.015	0.037	0.02	0.02	0.015	0.019	-
Secondary compression index	$\mu^*$	0.0025	0.003	0.0028	0.0031	0.0029	0.0033	-
Cohesion	c	10	5	10	3	12	14	kN/m <sup>2</sup>
Friction angle	$\phi$	22	30	20	22	14	24	°
Dilatancy angle	$\psi$	0	0	0	0	0	0	°
Over consolidation ratio	OCR	1	1.27	1	1	1	1.54	-

### بارگذاری

برای خاکریزهای با ارتفاع کوتاه (کمتر از ۳ متر) که روی بستر سست ساخته می‌شوند، نشستهای دائمی ناشی از بار ترافیک یکی از فاکتورهای مهم طراحی جاده می‌باشد. فاکتورهای متعددی در تغییرشکلهای ناشی از بار ترافیک مؤثرند. این عوامل عبارتند از (۱) پارامترهای مقاومت و تغییر شکل خاک بستر، (۲) خواص روسازی، اساس و زیر اساس جاده، و (۳) میزان و تعداد اعمال بار ترافیکی. در روش طراحی که توسط Kutara et. al. [10]



جدول ۲- مشخصات مصالح خاکریز

Parameter	Name	Embankment	Unit
Material model	Model	MC	-
Type of material behaviour	Type	Drained	-
Soil unit weight above p.l.	$\gamma_{unsat}$	20.5	kN/m <sup>3</sup>
Soil unit weight below p.l.	$\gamma_{sat}$	21.5	kN/m <sup>3</sup>
Horizontal permeability	$k_x$	1.00E+00	m/day
Vertical permeability	$k_y$	1.00E+00	m/day
Young's modulus	$E_{ref}$	5.00E+04	kN/m <sup>2</sup>
Poisson's ratio	$\nu$	0.35	-
Cohesion	$c$	1	kN/m <sup>2</sup>
Friction angle	$\phi$	34	°
Dilatancy angle	$\psi$	0	°

پیشنهاد شده است بار ترافیک بصورت بار استاتیکی معادل در نظر گرفته شده و تئوری تحکیم یک‌بعدی برای تخمین نشست مورد استفاده قرار گرفته است. بار ترافیک معادل جاده  $12 \text{ KN/m}^2$  در نظر گرفته شده است که بصورت استاتیکی به مدل اعمال شده است.

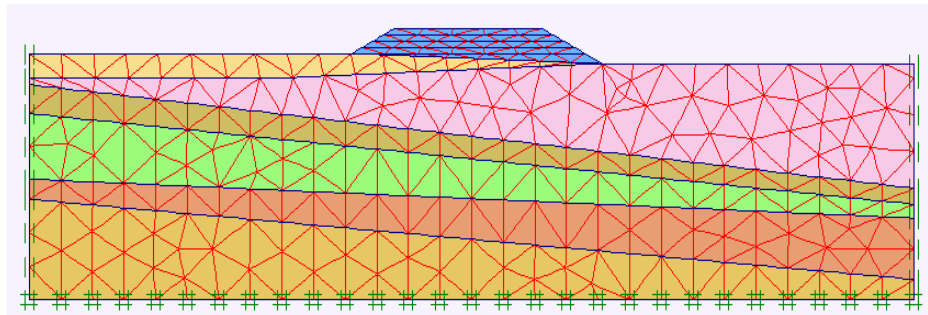
### شرایط مرزی

شرایط مرزی هندسی مطابق قوانین زیر ایجاد شده اند [11]:

- خطوط هندسی عمودی که مختصات X آنها برابر بیشترین یا کمترین مختصات X در مدل می‌باشد، گیرداری افقی ( $U_x = 0$ ) کسب می‌نمایند.
  - خطوط هندسی افقی که مختصات y آنها برابر پایین‌ترین مختصات y در مدل باشد گیرداری کامل ( $U_x = U_y = 0$ ) کسب می‌نمایند.
  - صفحاتی که در مرز هندسه مدل گسترده شده‌اند، چرخش ثابت در نقاط مرزی کسب می‌نمایند ( $\phi_z = 0$ ).
- با توجه به شرایط مسئله، مرز افقی کف و مرزهای قائم طرفین بصورت مرزهای عدم جریان معرف گردیده‌اند. یعنی بدین صورت عمل زهکشی و خروج آب از بستر فقط از قسمت مرزهای بالایی بستر امکان‌پذیر می‌باشد.

### المان بندی

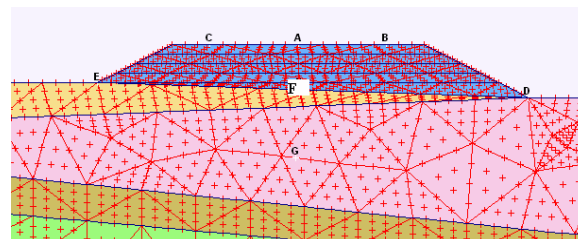
المانهای بکار رفته در این تحلیل المانهای ۱۵ گرهی می‌باشند. شکل (۲) نحوه المان‌بندی مدل را نشان می‌دهد.



شکل ۲- نحوه المان‌بندی مدل

### آنالیز مدل

در آنالیز مدل ابتدا ساخت خاکریز بصورت مرحله‌ای و در لایه‌هایی به ضخامت  $0/6$  متر انجام شده است و فرض گردیده که مدت زمان ساخت هر لایه دو روز بطور می‌انجامد و سپس آنالیز تحکیم برای سالهای مختلف انجام گردیده است. شکل (۳) موقعیت نقاط کنترل انتخاب شده برای رسم منحنی‌ها را نشان می‌دهد. مراحل آنالیز و نوع محاسبات در جدول (۳) ارائه گردیده است. لازم به ذکر است در این پروژه از آنالیز مش بروز شده استفاده شده است.



شکل ۳- نقاط انتخاب شده برای رسم منحنی



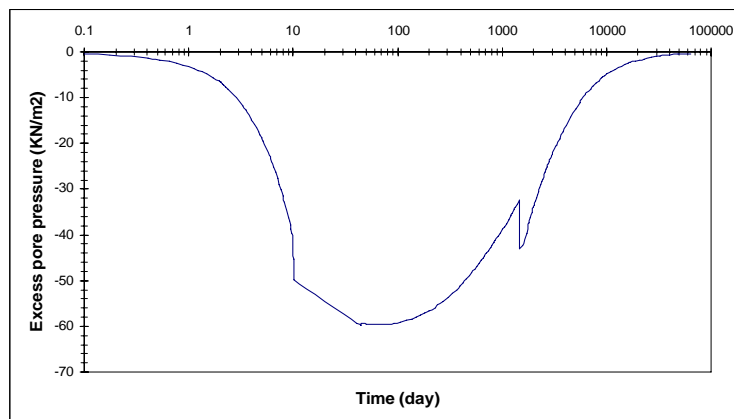
جدول ۳- مراحل آنالیز مدل

Identification	Phase no.	Start from	calculation	Loading input	Time(Day)
Initial phase	0	0	N/A	Staged construction	0
<Phase 1>	1	0	Plastic	Staged construction	2
<Phase 2>	2	1	Plastic	Staged construction	2
<Phase 3>	3	2	Plastic	Staged construction	2
<Phase 4>	4	3	Plastic	Staged construction	2
<Phase 5>	5	4	Plastic	Staged construction	2
<Phase 6>	6	5	Plastic	Staged construction	0.1
<Phase 7>	7	6	Consolidation	Staged construction	1460
<Phase 8>	8	7	Plastic	Staged construction	1
<Phase 9>	9	8	Consolidation	Staged construction	1825
<Phase 10>	10	9	Consolidation	Staged construction	540
<Phase 11>	11	10	Consolidation	Minimum pore pressure	59660

## تحلیل نتایج

## (۱) فشار آب حفره‌ای

شکل (۴) تغییرات فشار آب حفره ای در وسط خاک پیت نسبت به زمان را نشان می دهد. با توجه به نمودار مشاهده می شود که در انتهای ساخت، فشار آب حفره‌ای در زیر خاکریز به حدود  $54/4 \text{ KN/m}^2$  می رسد که می توان علت این افزایش فشار آب حفره‌ای را اجرای سریع خاکریز و عدم وجود زمان کافی برای زهکشی دانست. قابل توجه است که فشار آب حفره‌ای تقریباً معادل سرشار اعمال شده به پی در اثر ساخت خاکریز می باشد  $(2/7 \times 20/5 = 55/35 \text{ KN/m}^2)$  پس از اتمام ساخت خاکریز بار ترافیکی معادل  $12 \text{ KN/m}^2$  به خاکریز اعمال شده است که در اثر این بار نیز مقداری افزایش در فشار آب حفره‌ای اضافی خواهیم داشت. حداکثر فشار آب حفره ای در این مرحله برابر  $60/5 \text{ KN/m}^2$  می باشد. در اثر تحکیم بصورت تدریجی با خروج آب از بستر فشار آب حفره‌ای اضافی کاهش می یابد بطوریکه پس از ۱۶۳ سال فشار آب حفره‌ای اضافی بطور کامل از بین رفته و برابر  $1 \text{ KN/m}^2$  می گردد.



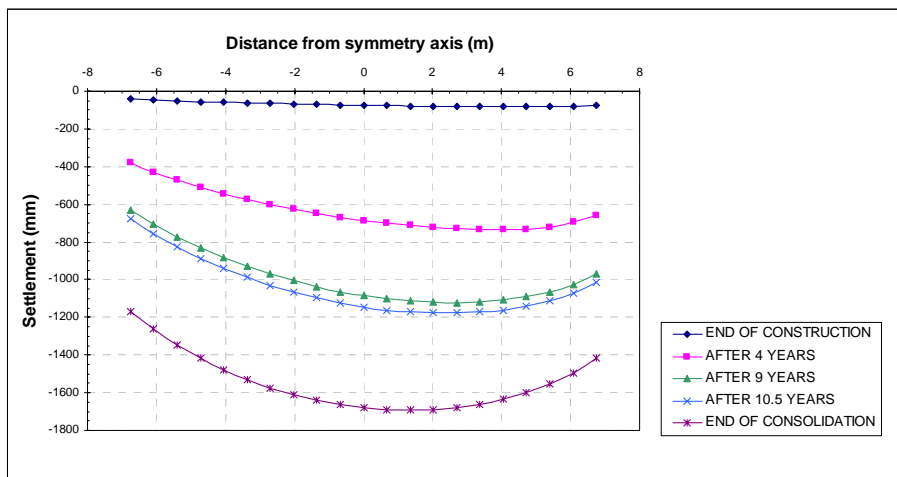
شکل ۴- تغییرات فشار آب حفره‌ای اضافی نسبت به زمان در وسط لایه پیت

## (۲) تغییر مکان های قائم (نشست)

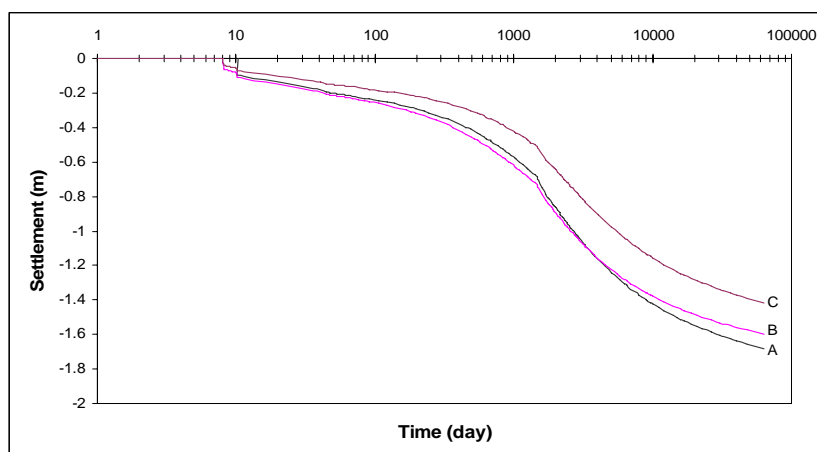
شکل (۵) نشست تاج خاکریز در مراحل مختلف آنالیز را نشان می دهد. با توجه به این نمودار حداکثر نشست آبی خاکریز برابر  $8/3$  سانتی متر می باشد. این نشست بیشتر ناشی از تغییر شکل مصالح خاکریز می باشد، زیرا در این مرحله با توجه به فشار آب حفره‌ای ایجاد شده در پی و عدم وجود زمان کافی برای زهکشی آن، تنش مؤثر افزایش چندانی نداشته و تغییر شکل های زیادی در پی ایجاد نشده است. با گذشت زمان در اثر زهکشی پی و افزایش تنش مؤثر پی تغییر شکل های تاج خاکریز نسبت به زمان انتهای ساخت ناشی از تغییر شکل پی می باشند. شکل های (۶) و (۷) نشست نقاط کنترل نسبت به زمان را نشان می دهند. با توجه به اشکال و نمودارها می توان مشاهده کرد که پس از گذشت چهار سال از ساخت خاکریز حداکثر نشست خاکریز در نقطه B (حاشیه راست جاده) بوده و برابر  $73/6$  سانتی متر می باشد. در حاشیه چپ خاکریز یعنی نقطه C مقدار نشست برابر  $40$  سانتی متر می باشد که دلایل این تفاوت عبارتند از (۱) شیب دار بودن مقطع عرضی زمین، (۲) تفاوت ارتفاع خاکریز در حاشیه راست و چپ خاکریز، و (۳) تفاوت ضخامت خاک پیت



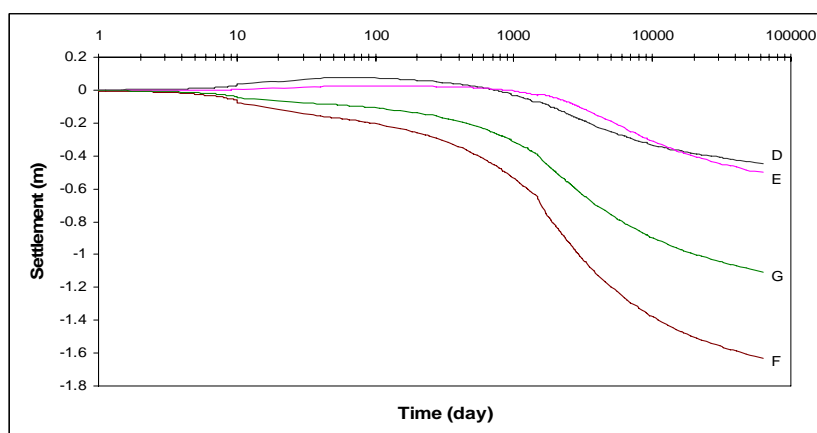
در زیر خاکریز . پس از چهار سال بیشترین مقدار نشست پی در نقطه F یعنی زیر خاکریز و محور وسط و برابر ۶۵ سانتی متر می باشد. یعنی می توان نتیجه گرفت که قسمت اعظم تغییر شکلها مربوط به پی و نشست تحکیمی پی می باشد. در این دوره در نقاط D و E (پنجه های خاکریز) به دلیل فشردگی مصالح و برون زدگی مصالح حاشیه (پنجه) تورم مشاهده شده است.



شکل ۵- نشست تاج خاکریز در مراحل مختلف تحلیل



شکل ۶- نشست نقاط کنترل A ، B ، C نسبت به زمان

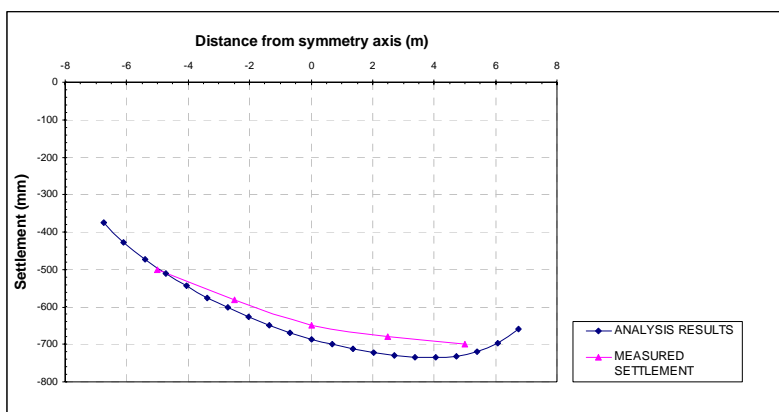


شکل ۷- نشست نقاط کنترل D ، E ، F ، G نسبت به زمان

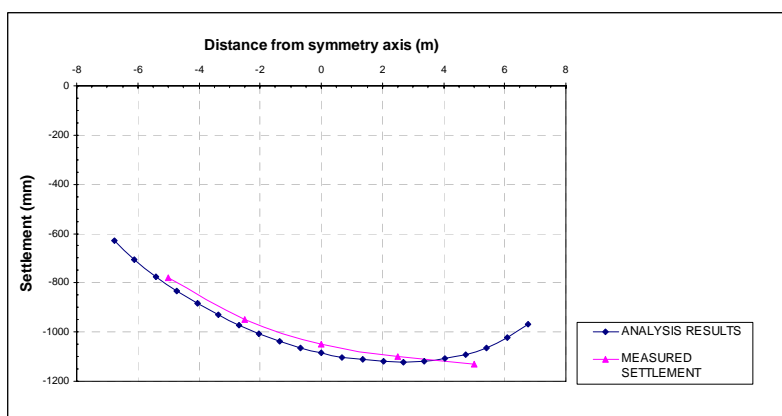


با توجه به نمودارهای نشست نسبت به زمان، با گذشت زمان مقدار نشست خاکریز افزایش یافته و در سال نهم مقدار حداکثر به ۱۱۲ سانتی‌متر رسیده است و پس از هیجده ماه (سال ۱۰/۵) این مقدار ۱۱۸ سانتی‌متر گردیده است. یعنی در طی این هیجده ماه ۶ سانتی‌متر افزایش نشست اتفاق افتاده است.

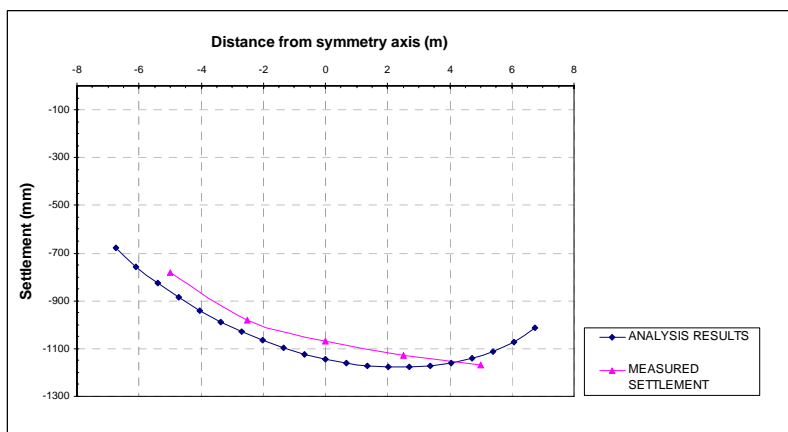
مقایسه مقادیر مشاهده شده در صحرا با مقادیر پیش بینی شده توسط Plaxis در این سه مرحله در شکل‌های (۸) تا (۱۰) نشان داده شده است. با توجه به این نمودارها تطابق خوبی بین نتایج آنالیز و مقادیر اندازه‌گیری شده وجود دارد. زمان از بین رفتن کامل فشار آب حفره‌ای حدوداً ۱۶۳ سال تخمین زده می‌شود. در طی این مدت با توجه به نمودار (۳) حداکثر نشست برابر ۱۶۹ سانتی‌متر خواهد گردید. بنابراین انتظار می‌رود به میزان ۵۱ سانتی‌متر نشست به نشست‌های قبلی افزوده شود.



شکل ۸- مقایسه نتایج بدست آمده از تحلیل (پیش بینی شده توسط Plaxis) و مقادیر اندازه‌گیری شده نشست در سال چهارم پس از پایان ساخت



شکل ۹- مقایسه نتایج بدست آمده از تحلیل (پیش بینی شده توسط Plaxis) و مقادیر اندازه‌گیری شده نشست در سال نهم پس از پایان ساخت

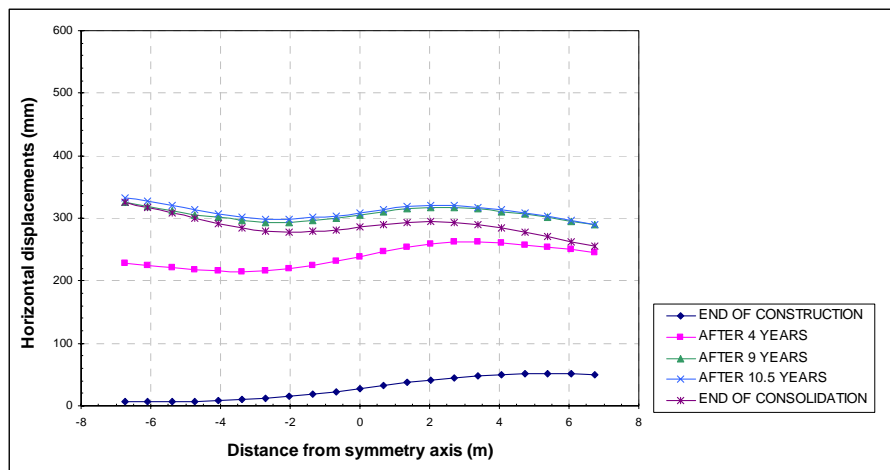


شکل ۱۰- مقایسه نتایج بدست آمده از تحلیل (پیش بینی شده توسط Plaxis) و مقادیر اندازه‌گیری شده نشست در سال نهم پس از پایان ساخت

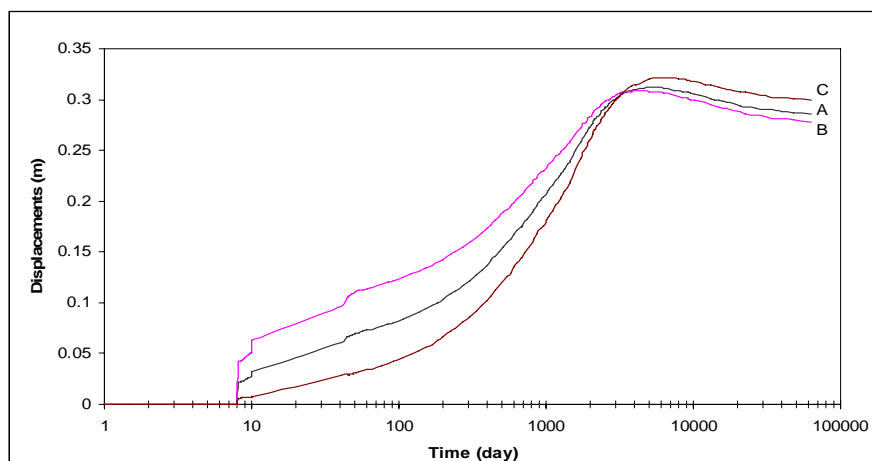


### ۳) تغییر مکانهای افقی

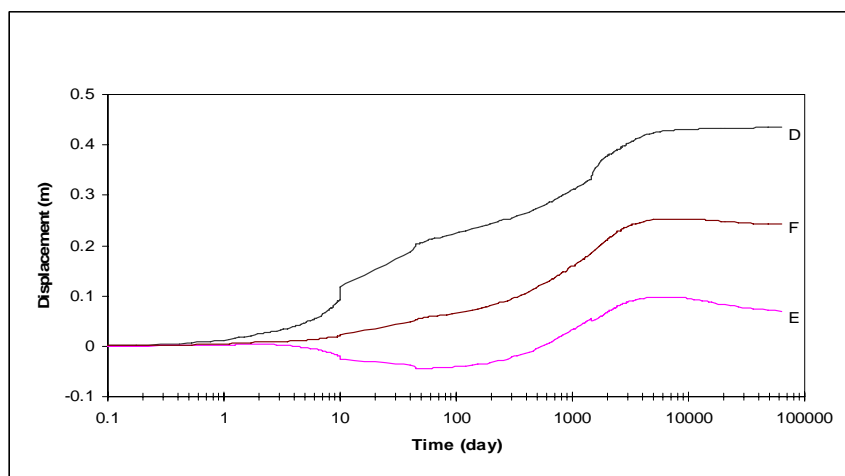
با توجه به شکل‌های (۱۱) الی (۱۳) که تغییر مکانهای افقی تاج خاکریز و تغییر شکل نقاط کنترل نسبت به زمان را نشان می‌دهند، می‌توان مشاهده کرد که پس از اتمام ساخت حداکثر تغییر مکان افقی در نقطه D، برابر ۱۰ سانتی‌متر می‌باشد.



شکل ۱۱- تغییر مکان افقی تاج خاکریز در مراحل مختلف تحلیل



شکل ۱۲- تغییر مکان افقی نقاط کنترل A, B, C نسبت به زمان



شکل ۱۳- تغییر مکان افقی نقاط کنترل D, E, F نسبت به زمان



با گذشت زمان تغییر مکانهای افقی خاکریز افزایش یافته در سال چهارم حداکثر تغییر مکان در نقطه D و برابر ۴۵/۸ سانتی‌متر بوده و در تاج خاکریز در نقاط A, B, C به ترتیب برابر ۲۳، ۲۵ و ۲۰ سانتی‌متر می‌باشد. در سال نهم حداکثر تغییر شکل افقی در نقطه D برابر ۵۷/۱ سانتی‌متر بوده و در نقاط A, B, C تقریباً برابر ۳۱ سانتی‌متر می‌باشد. در اتمام مرحله تحکیم حداکثر تغییر مکان افقی در نقطه D و برابر ۶۱/۷ سانتی‌متر می‌باشد.

### نتیجه گیری

نتایج حاصل از این مطالعه را به شرح زیر میتوان خلاصه کرد :

- ۱) نتایج بدست آمده از آنالیز خاکریز جاده شهید کلانتری در حالت غیر مسلح با مقادیر نشست مشاهده شده تطابق خوبی دارد.
- ۲) از آنجائیکه ضخامت لایه پیت در سمت راست جاده بیشتر است و همچنین به علت ارتفاع بیشتر خاکریز که از شیبدار بودن سطح زمین طبیعی ناشی شده است، حداکثر میزان نشست در سمت راست خاکریز اتفاق افتاده است.
- ۳) عملکرد نرم افزار Plaxis در تحلیل نشست خاکریز جاده موفقیت آمیز بوده است.
- ۴) استفاده از مدل Soft soil creep جهت مدل کردن رفتار وابسته به زمان خاکهای سست بسیار مفید می باشد.

### مراجع

1. Neher, H.P., Wehnert, M. and Bonnier, P.G. (2004) An evaluation of soft soil models based on trial embankments, *Proc. 10<sup>th</sup> Int. Conf. on Computer Methods and Advances in Geomechanics*, Tuscon, 373-378.
2. Clough, R.W. and Woodward, R.J. (1967) Analysis of embankment stresses and deformations, *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, **93**(4), 529-549.
3. Hedy, R., Mols, H., Sawarendro, E., Teunissen, E. and Deutekon, J. (2002) The Bereng Bengkel trial embankment, *Geotechnique* **6**(4), 32.
4. Hunter, G. and Fell, R. (2003) Prediction of impending failure of embankment on soft ground, *Canadian Geotechnical Journal* **40**, 209-220.
5. Wiltawsky, C., Scharinger, F., Schweiger, H.F., Krenn, H., Zentar, R., Karstunen, M., Cudny, M., Neher, H. and Vermeer, P.A. (2003) Results from a geotechnical benchmark exercise of an embankment on soft clay, *Int. Workshop on Geotechnics of Soft Soils*, Noorwijkrhout, Sept 17-19, Essen, 381-388.
6. Plaxis (Ver. 8.2), *Plaxis Reference manual*, Web: <http://www.plaxis.nl.com>
7. Van Baars, S. (2003) Soft soil creep modelling of large settlements, *2<sup>nd</sup> International Conference on Advances in Soft Soil Engineering and Technology*. 2-4 July, Putrajaya, Malaysia.
8. Haval, F. (2004) Creep in soft soil, *Doctoral thesis for the degree of doktor ingenior*, Norwegian University of Science and Technology.
9. Ravaska, D. (2006) Modelling creep of soft Finnish clay, *Ph.D. Thesis*, Department of Civil and Environmental Engineering, Helsinki University of Technology.
10. Kutara, K., Miki, H., Mashita, Y. and Seki, K. (1980) Settlement and countermeasures of the road with low embankment on soft ground, *Tech. Reo. Of Civil Eng., JSCE*, **22**(8), 13-16 (In Japanese).
11. Chai, J.C. and Miura, N. (2002) Traffic load-induced permanent deformation of road on soft subsoil, *Geotechnical and Geo-Environmental Engineering Journal, ASCE*, **128**(11), 241-250.