

## رفتار خزشی خاک‌های ریزدانه براساس مدل‌های ویسکوالاستیک

جمشید صدرکریمی  
اشرف ذکری

دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز  
کارشناس ارشد خاک و پی، دانشگاه تبریز

### چکیده

بیان کرنش تابع زمان خاک‌ها برحسب مدل‌های ویسکوالاستیک روش مفیدی است که برای رفع کاستی‌های روش‌های جاری ارزیابی رفتار تحکیمی خاک میتوان بکار گرفت. در این تحقیق رفتار خزشی نمونه‌های مختلف خاک بررسی شده و نشان داده می‌شود که رفتار تحکیم ثانویه خاک را میتوان به خوبی با مدل ویسکوالاستیک ماکسول تعمیم یافته بیان نمود. آزمایش‌های تحکیم متعدد روی نمونه‌های بازبایی شده و دستنخورده انجام داده شد و رفتار تابع زمان مورد مطالعه قرار گرفت. بستگی ثوابت مدل ماکسول تعمیم یافته به تراز تنش مؤثر و همچنین چگونگی پیروی الگوی نشست خزشی (تحکیم ثانویه) از تغییرات ثوابت مدل پیشنهادی ارزیابی گردید. نتیجه گرفته شد که مدل پیشنهادی یک وسیله مؤثر و مفید برای نشان دادن رفتار نشست‌پذیری کامل خاک، مخصوصاً نشست دراز مدت، می‌باشد.

کلمات کلیدی: خزش، ویسکوالاستیک، رس.

## Creep Behavior of Fine Grained Soils Using Visco-elastic Models

J. Sadrekarimi and A. Zekri  
Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz

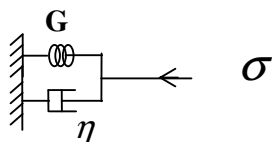
### Abstract

Description of time dependent deformation of soils in terms of visco-elastic models is a useful method that can be employed to improve many deficits of current conventional methods of evaluation of soil consolidation behavior. In this research creep behavior of different soil specimens are evaluated and it is shown that the secondary consolidation behavior may be well defined with the generalized Maxwell visco-elastic model. Several consolidation tests on different remolded and undisturbed soil specimens were carried out and time dependent behavior was studied. The dependency of constants of the generalized Maxwell model on the effective stress level and also dependency of creep settlement pattern on the variations of constants of the proposed model were appraised. It was concluded that the proposed model is an effective and useful tool for defining of complete settlement behavior explicitly in long term.

**Key words:** Creep, Visco-elastic, Clay, Modeling, Oedometer test.

## ۱- مقدمه

همان‌طور که اشاره شد نمونه‌های رسی بعد از این مرحله همچنان به نشست خود ادامه می‌دهند. تئوری تحکیم ترزاقی بر مدل کلوین شکل (۱) منطبق است. در این مدل، ماده جامد همانند سیستمی متشکل از یک فنر (با ثابت  $G$ ) و یک کمک فنر (با ثابت  $\eta$ ) که به طور موازی بسته شده‌اند رفتار می‌کند.



شکل ۱- مدل کلوین

رابطه تنش کرنش برای فنر و کمک فنر به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\sigma = G\varepsilon \quad (۱) \text{ برای فنر}$$

$$\sigma = \eta \frac{d\varepsilon}{dt} = \eta \dot{\varepsilon} \quad (۲) \text{ برای کمک فنر}$$

در روابط فوق  $\sigma$  = تنش،  $\varepsilon$  = کرنش،  $\dot{\varepsilon}$  تغییرات کرنش،  $G$  = ثابت فنر،  $\eta$  = ثابت کمک فنر و  $t$  نشان دهنده زمان می‌باشد. با نوشتن تعادل نیروها در امتداد افقی برای شکل (۱) میتوان نوشت:

$$\sigma_0 = G\varepsilon + \eta \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (۳)$$

اگر تنش  $\sigma_0$  در زمان  $t=0$  تاثیر نموده و بعد از آن ثابت بماند رابطه کرنش - زمان از حل معادله دیفرانسیل (۳) و با فرض صفر بودن مقدار کرنش در  $t=0$  به دست می‌آید

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{G} [1 - \exp(-Gt/\eta)] \quad (۴)$$

بررسی رفتار خاک در اثر بارگذاری، به عنوان یک محیط متخلخل سه فازی نسبت به محیط‌های ایزوتروپ پیچیدگی بیشتری دارد. تغییر تنش موثر در نمونه‌های خاک باعث تغییر شکل آنها می‌شود اما تغییرات تنش موثر در خاک‌های مختلف روند متفاوتی دارد. در خاک‌های درشت دانه به علت امکان زهکشی سریع آب حفرهای هرگونه افزایش تنش کل تقریباً به صورت آنی به افزایش تنش موثر منجر میشود و افزایش تنش موثر نیز باعث تغییر شکل آنی خاک میگردد. ولی در خاک‌های ریز دانه به علت پایین بودن ضریب نفوذپذیری، افزایش تنش کل ابتدا باعث افزایش فشار آب حفرهای می‌شود. با گذشت زمان و زهکشی تدریجی، اضافه فشار آب حفرهای رفته رفته کاهش می‌یابد. همزمان با استهلاک تدریجی اضافه فشار آب حفرهای و افزایش تدریجی تنش موثر، نسبت تخلخل خاک کاهش یافته و خاک تحکیم می‌یابد.

بعد از زایل شدن کامل اضافه فشار حفرهای، تنش موثر در خاک نیز ثابت میماند. نشست خاک تا این مرحله به نام تحکیم اولیه خوانده می‌شود [۱]. مشاهدات نشان میدهد که در خاک‌های رسی، تغییر شکل حتی بعد از ثابت شدن تنش موثر نیز ادامه مییابد. از این پدیده به عنوان خزش نمونه یا تحکیم ثانویه نام برده میشود [۲]. یکی از علل بروز خزش اینست که مقداری از آب بسیار لزج بین ذرات بتدریج خارج میشود. این امر باعث تغییر آرایش اجزا و مکان‌گیری مجدد آنها، تحت تنش ثابت می‌گردد [۳].

امروزه شناخت نسبتاً کاملی از مرحله تحکیم اولیه خاک‌ها در دست می‌باشد اما به نظر می‌رسد برای شناخت دقیق رفتار خزشی به مطالعات بیشتری نیاز باشد.

یکی از رایج‌ترین تئوری‌های موجود برای بیان فرایند تحکیم، تئوری تحکیم ترزاقی می‌باشد. براساس این تئوری، افزایش تنش کل در یک نمونه رسی، ابتدا به صورت افزایش فشار آب حفرهای بروز میکند. با گذشت زمان و زهکشی تدریجی آب حفرهای، تنش به دانه‌های خاک که فرض می‌شود رفتاری مانند جامدات الاستیک دارند، منتقل می‌شود. افزایش تنش موثر خاک باعث کاهش نسبت تخلخل و نشست خاک می‌گردد. بعد از زایل شدن کامل اضافه فشار آب حفرهای، تنش موثر در خاک نیز ثابت می‌ماند. طبق فرضیات تئوری ترزاقی پس از ثابت شدن تنش موثر، نباید تغییر شکلی در نمونه رخ دهد [۱]. اما

در بخش الاستیسیته تاخیری، آنها از تاثیر این پارامتر بر رفتار نمونه‌ها صرف‌نظر نموده و مدل ساده شده ماکسول را مطابق شکل (۳) برای بیان رفتار تابع زمان رسها انتخاب کردند [۵]. رفتار مایعات ماکسولی را میتوان با استفاده از فنر الاستیک و کمک فنری که به طور سری بهم وصل شده‌اند و مجموعه آنها تحت تنش  $\sigma$  قرار گرفته است، مدل نمود. قانون حاکم بر رفتار این مواد را میتوان چنین نوشت:

$$\varepsilon = \varepsilon_s + \varepsilon_d \quad (5)$$

در این رابطه  $\varepsilon$  نشان دهنده کرنش مجموعه،  $\varepsilon_s$  نشان دهنده کرنش فنر و  $\varepsilon_d$  نشان دهنده کرنش کمک فنر میباشد. تنشی که به هر یک از اجزای مدل می‌رسد برابر تنش اعمالی به کل مجموعه است. با استفاده از روابط (۱) و (۲) و مشتق‌گیری از رابطه (۵) میتوان نوشت:

$$\sigma + \frac{\eta}{G} \dot{\sigma} = \eta \dot{\varepsilon} \quad (6)$$

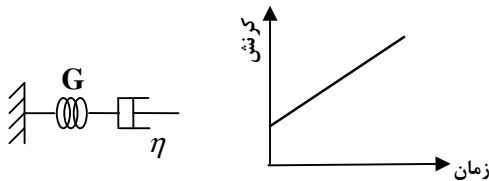
رابطه ارائه شده، نشان دهنده رفتار مایعات است که در آنها هر تنش غیر صفری با بروز نرخ کرنش غیر صفر توأم است [۶]. اگر چنین مدلی در لحظه  $t=0$ ، تحت تنش ثابت  $\sigma_0$  قرار گیرد با نوشتن تبدیل لاپلاس معادله ۶ و صفر قرار دادن تمام شرایط اولیه، خواهیم داشت:

$$\hat{\varepsilon} = \left( \frac{1}{\eta s} + \frac{1}{G} \right) \hat{\sigma} \quad (7)$$

$\hat{\varepsilon}$ ،  $\hat{\sigma}$  نشان دهنده تبدیل لاپلاس کرنش و تنش و  $s$  متغیر لاپلاس می‌باشد. واضح است که در تنش ثابت  $\sigma_0/s$   $\hat{\sigma} = \sigma_0/s$  می‌باشد. با نوشتن معکوس تابع لاپلاس برای رابطه ۷، خواهیم داشت:

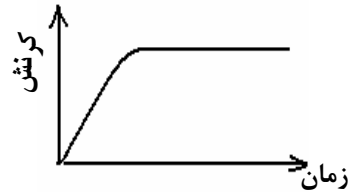
$$\varepsilon = \sigma_0 \left( \frac{1}{G} + \frac{t}{\eta} \right) \quad (8)$$

نمودار کرنش-زمان این مواد یک خط راست است [۷].



شکل ۳- مدل ماکسول و منحنی کرنش-زمان آن

منحنی کرنش- زمان چنین سیستمی در اثر اعمال تنش  $\sigma_0$  مطابق شکل (۲) خواهد بود. در این مدل رفتار تغییرات تنش موثر مشابه رفتار تغییرات تنش در فنر و رفتار تغییرات فشار آب حفره‌ای مشابه رفتار تغییرات تنش در کمک فنر می‌باشد.



شکل ۲- منحنی کرنش-زمان در مدل کلوین

معادله منحنی کرنش-زمان نشان می‌دهد که در صورت ثابت ماندن تنش، مقدار کرنش نیز ثابت خواهد ماند. لذا به کمک این مدل نمیتوان مرحله تحکیم ثانویه خاک را مورد مطالعه قرار داد. تا قبل از ارائه روش‌های جدید مبتنی بر مدل ویسکوالاتیک، نشست ناشی از خزش با فرض خطی بودن تغییرات نسبت تخلخل در مقابل  $\log t$  در مرحله تحکیم ثانویه برآورد می‌شد [۴].

این نقص و برخی مشاهدات دیگر باعث شد تلاش‌های بیشتری برای مدل کردن مجدد فرایند تحکیم انجام گیرد. از مهمترین مشاهداتی که محققان را به تکمیل نظریه تحکیم ترزاقی واداشته است می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

(الف) از نظر رئولوژی نمیتوان بین رفتار رس‌ها در منطقه NC و OC تفاوت اساسی قائل شد.

(ب) بخشی از تغییر شکل فشاری رس‌ها قابل برگشت است.

(ج) تغییر شکل فشاری رس‌ها وابسته به زمان بوده و به مقدار ثابتی میل نمی‌کند.

(د) رس‌ها خاصیت الاستیسیته تاخیری بروز میدهند.

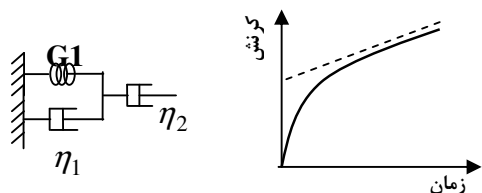
(ه) رس‌ها خاصیت آسودگی تنش موثر نشان میدهند [۵]. یوشیکونی و همکاران (۱۹۹۴) با کنار هم قرار دادن این مشاهدات و تحقیق بر روی رس هیروشیما دریافتند که رفتار رس‌ها همانند رفتار مایعات ویسکوالاتیک است و نمونه‌های رسی آنها از مدل ماکسول توسعه یافته پیروی می‌کند. اما با توجه به ابهامات موجود در مورد نحوه تعیین ضریب کمک فنر

است با:

$$\varepsilon_0 = \sigma \left( \frac{2}{9k} + \frac{1}{3G_2} \right) \quad (10)$$

با توجه به اینکه تنها بعد از رسیدن به  $T_{100}$  (زمان عملی اتمام تحکیم اولیه)، تنش موثر نمونه‌ها به مقدار ثابت میرسد و با توجه به تعریف کرنش به صورت  $(e_i - e)/e_i$  ملاحظه می‌شود که در زمان  $t = 0$  یعنی بعد از رسیدن به  $T_{100}$ ، مقدار کرنش خزشی ناشی از تحکیم ثانویه برابر صفر خواهد بود.  $e_i$  نشان دهنده نسبت تخلخل در پایان تحکیم اولیه و  $e$  نشان دهنده نسبت تخلخل در هر لحظه می‌باشد. با بینهایت شدن پارامتر  $G_2$  این المان از مدل حذف شده و مدل فرضی به صورت مدل ماکسول توسعه یافته در می‌آید شکل (۵). در این مدل:

$$\varepsilon = \sigma \left[ \frac{1}{3G_1} (1 - \exp(-\frac{G_1 t}{\eta_1})) + \frac{t}{3\eta_2} \right] \quad (11)$$



شکل ۵- مدل ماکسول توسعه یافته و منحنی کرنش- زمان آن

برای تعیین پارامترهای این مدل میتوان با قرار دادن  $\varepsilon_0 = 0$  از روابط مدل برگرز استفاده کرد. خط مجانب مایلی که منحنی کرنش- زمان به آن میل میکند دارای شیب  $\frac{\sigma}{3\eta_2}$  و عرض از مبدا  $\frac{\sigma}{3G_1}$  می‌باشد. مقدار  $\eta_1$  نیز از شیب خط  $\log q$  که برابر  $\frac{G_1}{2.3\eta_1}$  می‌باشد به دست می‌آید.  $q$  نشان دهنده فاصله منحنی کرنش از خط مجانب مایل می‌باشد [۱۲].

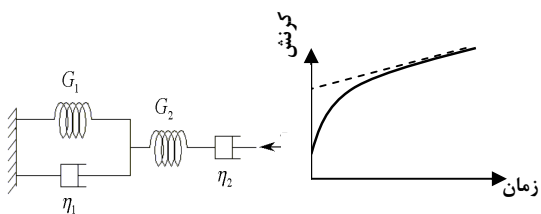
بدین ترتیب در صورت سازگاری نتایج آزمایشگاهی و محاسباتی خزش که از رابطه ۱۱ به دست می‌آید میتوان رفتار خزشی نمونه را با مدل ماکسول توسعه یافته مورد مطالعه قرار داد. همچنین با استفاده همزمان از این مدل و تئوری تحکیم ترازقی، میتوان نشست کلی نمونه، ناشی از تحکیم اولیه و ثانویه را به دست

کانو و همکاران (۱۹۹۸) نیز با در نظر گرفتن چنین رفتاری تغییرات اضافه فشار آب حفره‌ای در خاک‌های رسی را در اثر پیش بارگذاری مورد مطالعه قرار دادند [۸]. لی و همکاران (۱۹۹۸) نشان دادند که با استفاده از مدل ویسکوالاستیک میتوان میزان نشست تحکیمی خاک در مجاورت با لایه‌های نیمه تراوا را برآورد کرد [۹].

در این تحقیق با مطالعه رفتار خزشی نمونه‌های مختلف که مشخصات آنها دارای تفاوت‌های اساسی می‌باشد فرض انطباق این رفتار بر مدل مایعات ویسکوالاستیک و وابستگی احتمالی درستی این نظریه به مشخصات نمونه‌ها بررسی میشود. لازم به ذکر است که تعدادی از نمونه‌ها از مارن تبریز به دست آمده‌اند. براساس تحقیقات می‌توان مارن تبریز را اغلب به عنوان رس یا سیلت با حد روانی زیاد و پتانسیل تورم بالا در نظر گرفت [۱۰].

## ۲- مدل پیشنهادی و طرز بکارگیری آن

همانطور که اشاره شد هدف از این تحقیق، مطالعه رفتار خزشی رس‌ها براساس مدل‌های رفتاری مواد ویسکوالاستیک می‌باشد. برای بررسی انطباق منحنی زمان- کرنش نمونه‌ها با مدل‌های مختلف، ابتدا فرض شد این منحنی بر مدل برگرز منطبق باشد. در این مدل شکل (۴) منحنی  $\varepsilon, t$  برای نمونه‌های تحت تنش ثابت  $\sigma$  از رابطه (۹) قابل محاسبه می‌باشد:



شکل ۴- مدل برگرز و نمودار کرنش- زمان آن

$$\frac{\varepsilon}{\sigma} = \frac{2}{9k} + \frac{1}{3G_1} [1 - \exp(-\frac{G_1 t}{\eta_1})] + \frac{1}{3} [\frac{1}{G_2} + \frac{t}{\eta_2}] \quad (9)$$

در این رابطه  $k$  مدول حجمی خاک بوده و برابر با است با  $E/3(1-2\nu)$  نشان دهنده ضریب الاستیسیته و  $\nu$  نشان دهنده ضریب پواسون خاک است [۱۱]. همچنین کرنش اولیه برابر

به روش A [۱۳] انجام گرفته است. فشار وارده بر نمونه‌ها بین  $0.75 - 8.0 \text{ kg/cm}^2$  بوده و زمان باقی ماندن بار بر روی نمونه در هر مرحله یک تا دو روز می‌باشد. با استفاده از نتایج آزمایش تحکیم، زمان اتمام تحکیم اولیه، یعنی  $T_{100}$  نمونه‌ها به روش جذر زمان به دست آورده شد. با توجه به اینکه  $T_{100}$  تمامی نمونه‌ها کمتر از ۲۵ دقیقه بوده است فرض طولانی بودن زمان بارگذاری، یعنی یک تا دو روز، فرض قابل قبولی به نظر می‌رسد و میتوان گفت که خط مجانب مایل منحنی کرنش- زمان نمونه‌ها از مقادیر متناظر در انتهای این بازه‌های زمانی عبور خواهد کرد. بدین ترتیب میتوان پارامترهای  $G_1$  و  $\eta_2$  را با استفاده از مشخصات این خط تعیین نمود.

آورد. در صورتیکه زمان مورد نظر برای محاسبه نشست کمتر از  $T_{100}$  باشد نشست نمونه که درصدی از نشست تحکیم اولیه است از روابط تریاقی محاسبه می‌شود. در صورتیکه این زمان بیش از  $T_{100}$  نمونه باشد برای به دست آوردن نشست تحکیم کلی، لازم است علاوه بر محاسبه نشست تحکیم اولیه متناظر با  $e_i$  مقدار خزش به وجود آمده در فاصله  $T_{100}$  الی  $t$  نیز برآورد شود. یادآوری می‌نماید که در رابطه ۱۱ تمامی زمان‌ها از مبداء  $T_{100}$  سنجیده می‌شوند.

### ۳- آزمایش‌ها و تحلیل نتایج

در این مطالعه بر روی ۱۴ نمونه کاملاً متفاوت که مشخصات آنها مطابق جدول (۱) می‌باشد آزمایش تحکیم استاندارد

جدول ۱- مشخصات نمونه‌ها

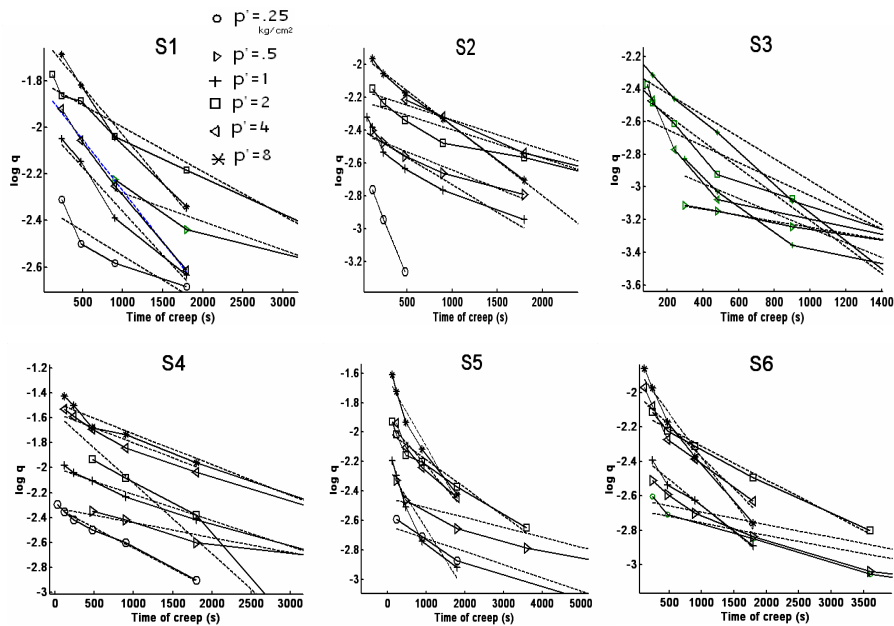
نمونه	LL%	PI%	$e_0$	وضعیت	نورم اولیه
S1	۳۷	۲۱	۰/۷	دست خورده	دارد
S2	۲۲	N.P	۰/۷۵	دست خورده	ندارد
S3	۷۶	۵۶	۱/۵۳	دست خورده	ندارد
S4	۴۴	۲۶	۰/۶۳	دست خورده	دارد
S5	۳۲	۱۶	۰/۵۹	دست خورده	ندارد
S6	۳۲	۸	۰/۷۸	دست خورده	ندارد
S7	۳۵	۱۳	۱/۲۹	دست نخورده	دارد
S8	۵۱	۳۰	۰/۸۵	دست نخورده و حساس	ندارد
S9	۳۸	۱۱	۱/۲۷	دست نخورده و حساس	ندارد
S10	۸۵	۶۵	۱/۲۴	دست نخورده	دارد
S11	۸۵	۶۵	۱/۱۷	دست نخورده	دارد
S12	۳۵	۱۲	۱/۲۹	دست نخورده و حساس	دارد
S13	۶۸	۴۰	۱/۱۶	دست خورده	دارد
S14	۷۱	۴۶	۱/۵۳	دست خورده	دارد

(۲) با رسم خط مجانب مایل منحنی  $(e_i - e)/e_i$  و  $t$ ، که از مقادیر مربوط به انتهای بازه زمانی بارگذاری می‌گذرد پارامترهای  $G_1$  و  $\eta_2$  را محاسبه می‌کند.

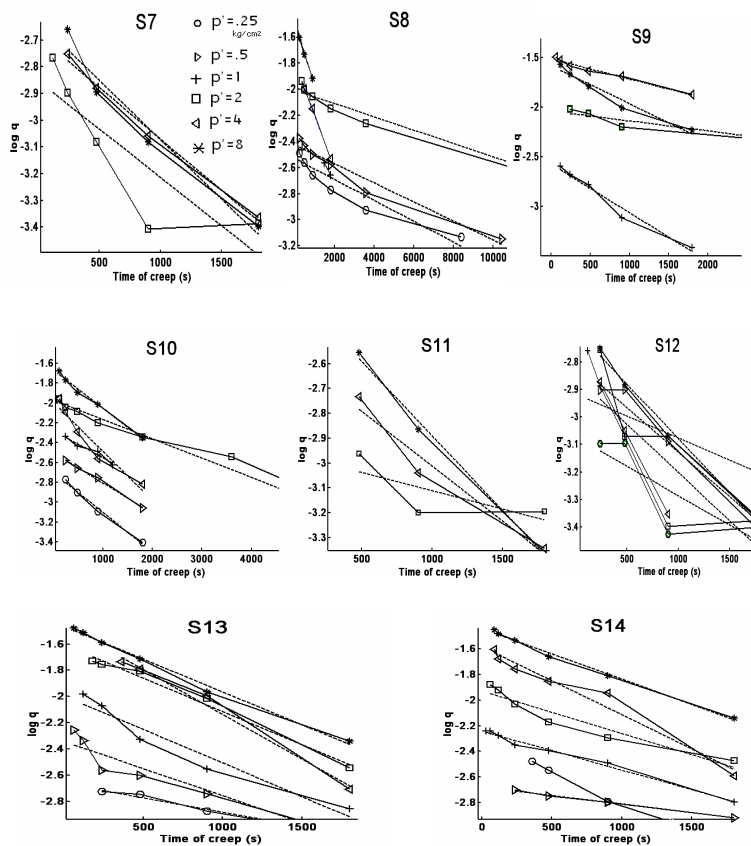
(۳) با عبور دادن خطی به روش کمترین مربعات از میان مقادیر  $\log q$ ، پارامتر  $\eta_1$  را محاسبه می‌کند شکل (۶-۱ و ۶-۲).

برای مطالعه رفتار نمونه‌ها با استفاده از نرم‌افزار MATLAB [۱۴]، کدی نوشته شده که با دریافت اطلاعات آزمایش تحکیم استاندارد و زمان اتمام تحکیم اولیه برای هر نمونه، بررسی‌های زیر را بر روی آن انجام می‌دهد:

(۱) بعد از جداسازی زمان و مقادیر مربوط به تحکیم اولیه، منحنی  $(e_i - e)/e_i$  را برای هر پله بارگذاری رسم می‌کند.

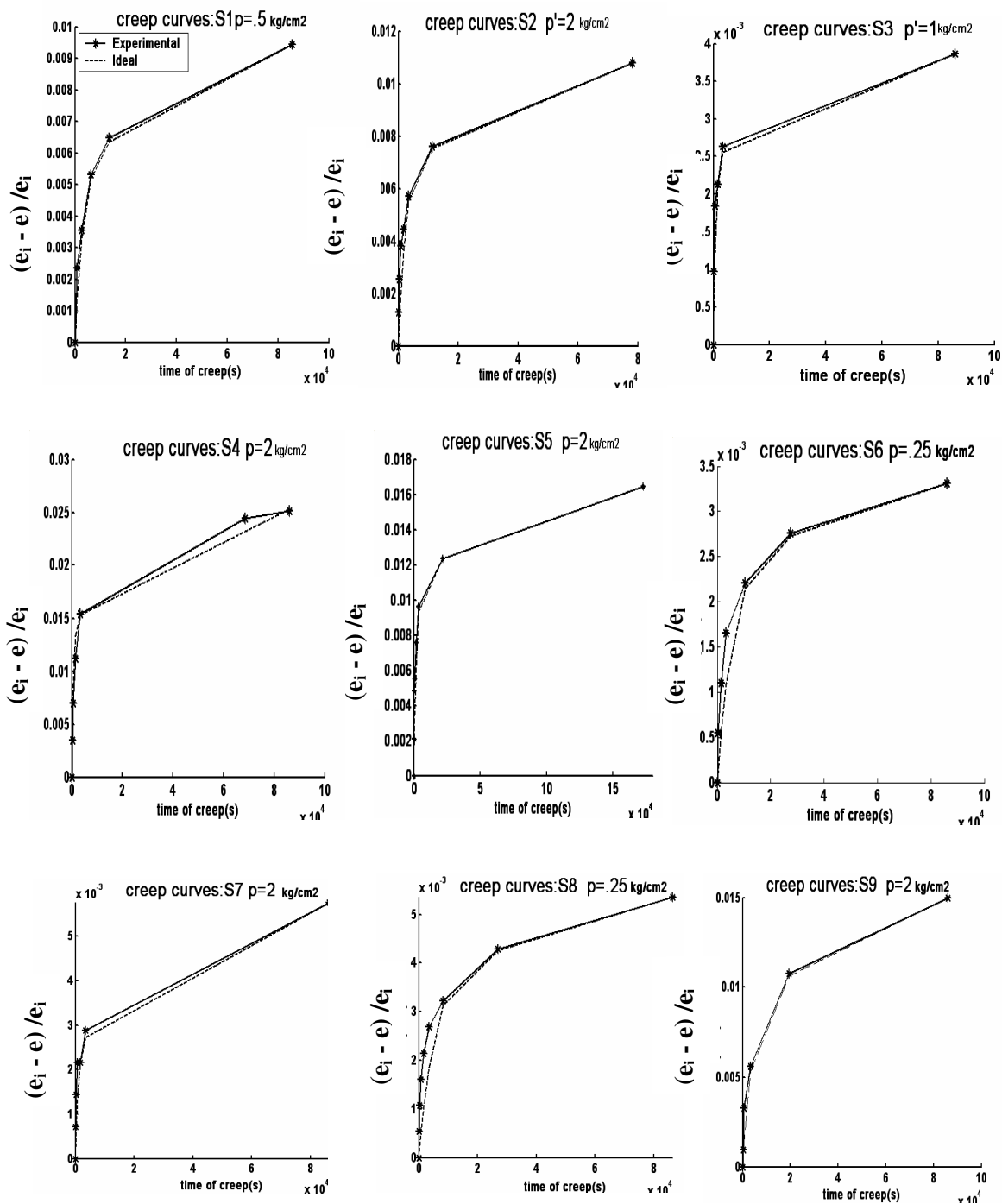


شکل ۱-۶- انحراف مقادیر  $\log q$  از خط راست در S1-S6

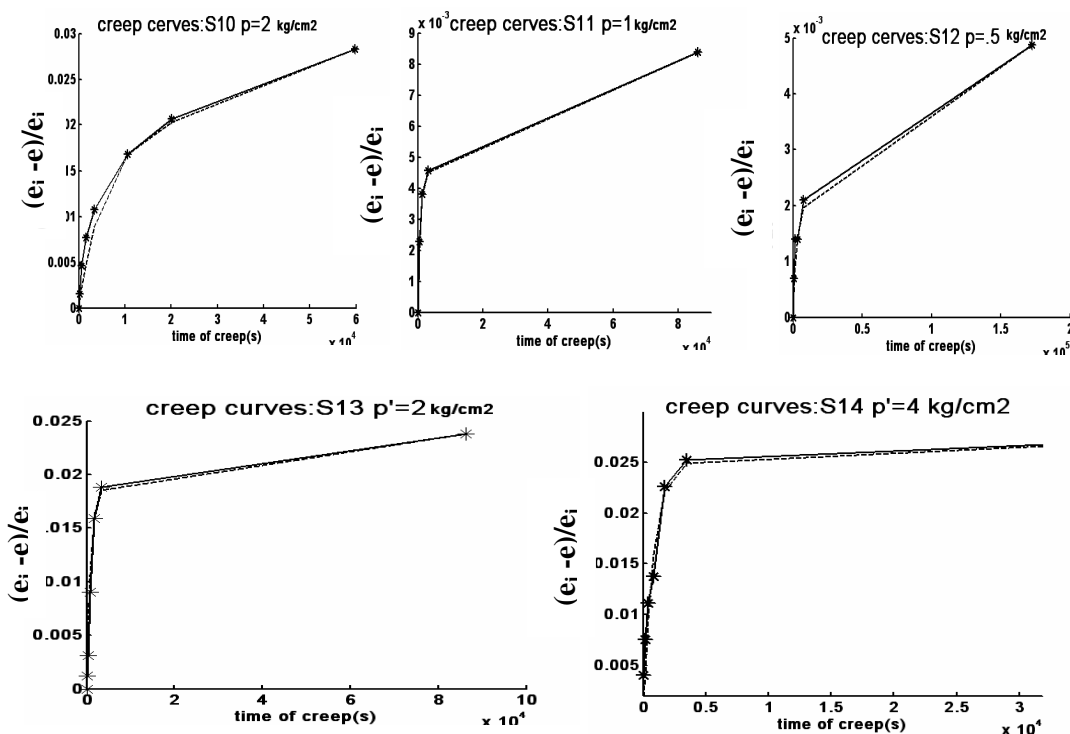


شکل ۲-۶- انحراف مقادیر  $\log q$  از خط راست در S7-S14

۴) انطباق منحنی حاصل از داده‌های آزمایشگاهی را بر منحنی ایده‌آل مدل ماکسول توسعه یافته نشان میدهد. پارامترهای مربوط به منحنی ایده‌آل با استفاده از خط راستی که بر مقادیر  $\log q-t$  گذرانده شده است و خط مجانب مایل منحنی کرنش-زمان داده‌ها به دست می‌آید شکل (۱-۷ و ۲-۷).



شکل ۱-۷- انطباق داده‌های آزمایشگاهی بر منحنی مدل ماکسول توسعه یافته در نمونه‌های S1 الی S9



شکل ۷-۲- انطباق داده‌های آزمایشگاهی بر منحنی مدل ماکسول توسعه یافته در S10-S14

منظور با استفاده از کد نوشته شده مقادیر  $G_1$  به  $(0.7, 0.8, 0.9, 1.1, 1.2, 1.3)$  تغییر داده شد و با ثابت نگه داشتن دو پارامتر دیگر، تغییرات منحنی ماکسول توسعه یافته در اثر تغییر  $G_1$  بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که در صورت کاهش  $G_1$  مقادیر خزش در زمان‌های طولانی و به همان میزان افزایش می‌یابد در مقابل، افزایش  $G_1$  باعث کاهش مقدار خزش می‌شود. تاثیر تغییر  $G_1$  در زمان‌های اولیه خزش اندک است.

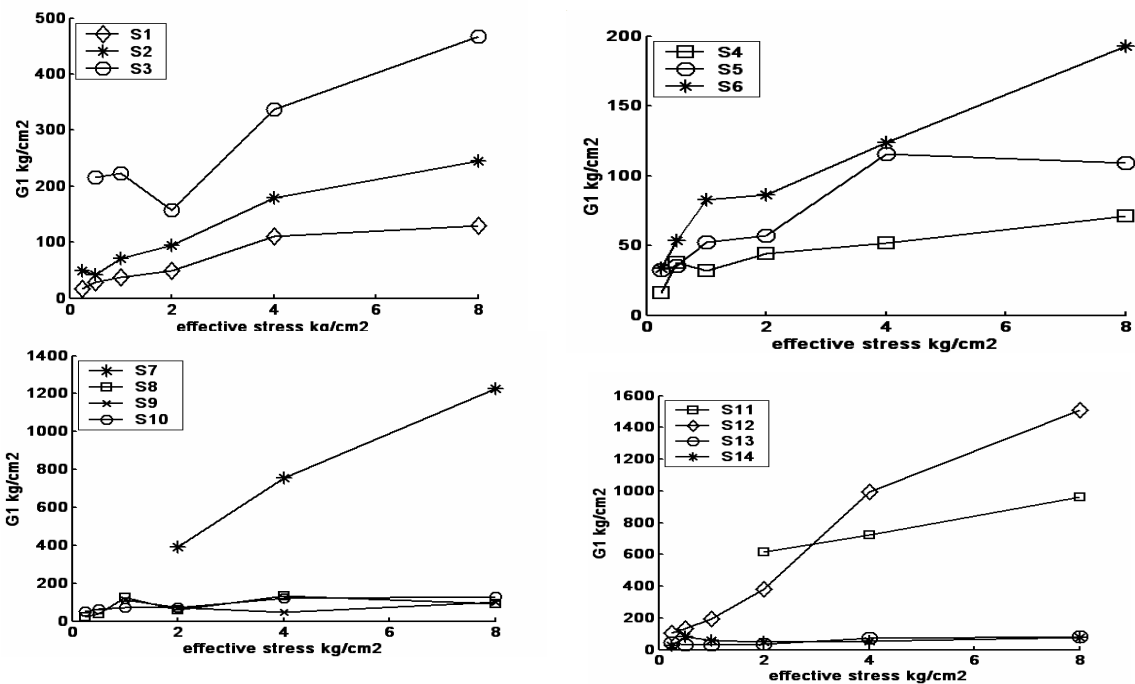
تغییر مقادیر  $\eta_1$  به  $(0.7, 0.8, 0.9, 1.1, 1.2, 1.3)$  نشان می‌دهد که منحنی ماکسول توسعه یافته نسبت به تغییرات  $\eta_1$  حساسیت بیشتری دارد. اما این تغییرات در زمان‌های اولیه خزش بروز میکنند و با گذشت زمان اثر آنها به شدت کاهش می‌یابد.

تغییرات ناشی از  $\eta_2$  در تمامی نمونه‌ها و در تمام زمان‌ها همسو اما کمتر از تغییرات ناشی از  $G_1$  است. بدین معنی که افزایش  $\eta_2$  نیز باعث کاهش خزش می‌شود و برعکس، اما تاثیر آن کمتر از تغییر  $G_1$  است.

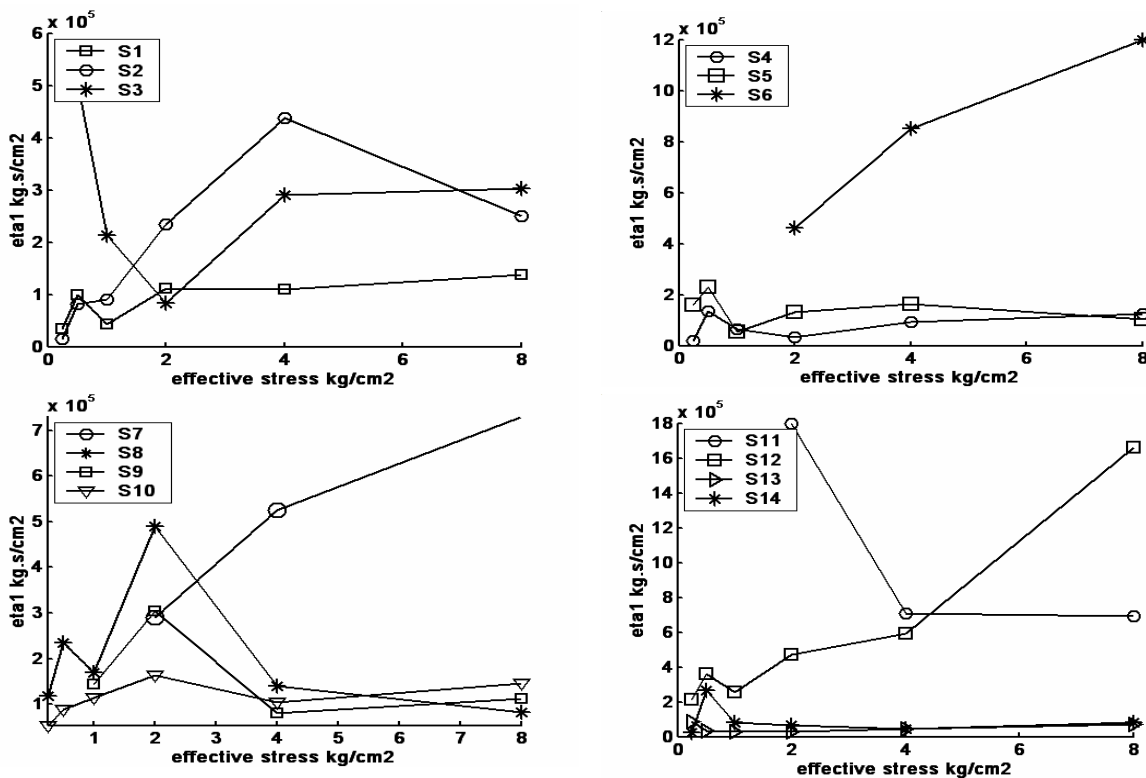
نتایج حاصل از پردازش اطلاعات مربوط به ۷۶ مرحله بارگذاری نشان می‌دهد که در تمامی نمونه‌ها و در تمامی پله‌های بارگذاری بین منحنی آزمایشگاهی خزش و منحنی مدل ماکسول توسعه یافته انطباق خوبی مشاهده می‌شود. این امر بدان علت است که نقاط  $\log q-t$  را میتوان با دقت قابل قبولی بر یک خط منطبق دانست.

همچنین مشاهده می‌شود که تقریباً در تمام نمونه‌ها افزایش تنش موثر همانطور که باعث افزایش  $l/m_v$  نمونه‌ها در مرحله تحکیم اولیه می‌شود باعث افزایش  $G_1$  در مرحله خزشی نیز می‌گردد. این دو پارامتر نشان دهنده مقاومت الاستیک خاک در بارگذاری فشاری با محدودیت جانبی می‌باشند. افزایش  $G_1$  در اثر افزایش تنش موثر نشان میدهد که خاک در مرحله خزشی نیز به صورت محیطی سخت شونده رفتار میکند. اما بین تغییرات  $\eta_1$  و  $\eta_2$  با تغییرات تنش موثر اشکال (۸ الی ۱۰) رابطه معناداری مشاهده نمی‌شود. بخش دیگر این تحقیق به مطالعه حساسیت منحنی خزش به تغییرات پارامترهای خزش اختصاص دارد. بدین





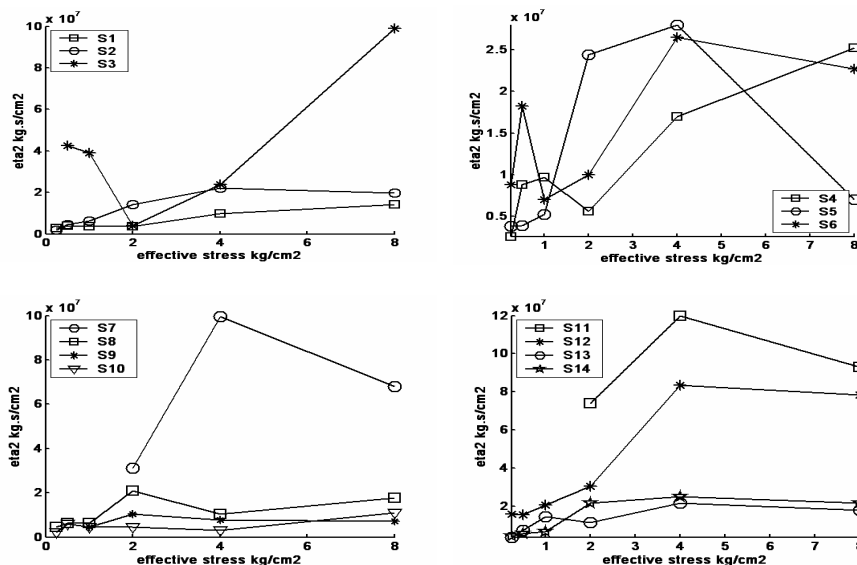
شکل ۸- نمودار  $p' - G_1$



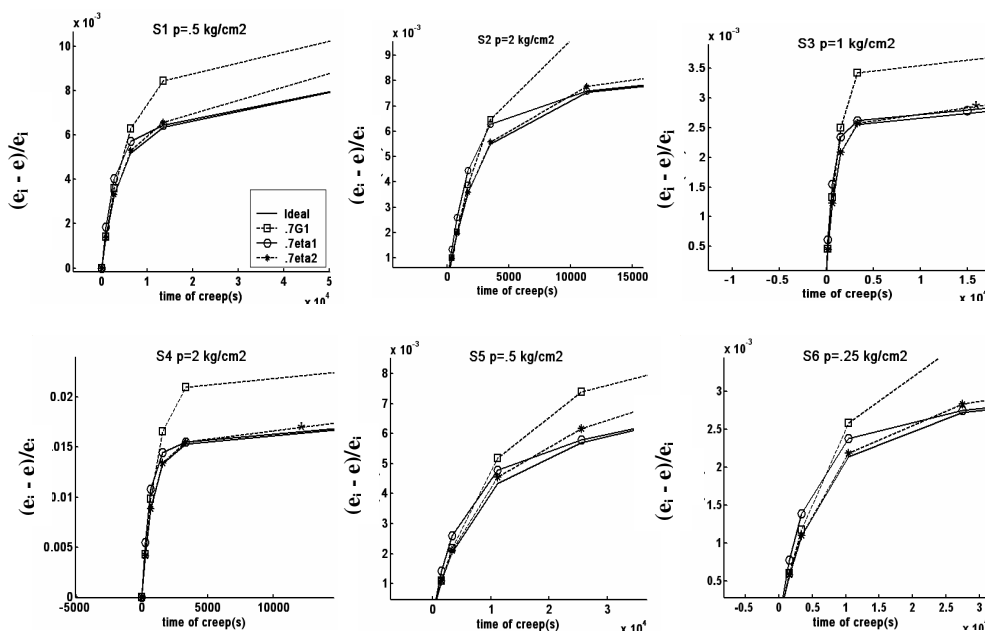
شکل ۹- نمودار  $p' - \eta_1$

منحنی خزش نمونه به مقدار  $G_1$  بستگی بیشتری دارد. این قبیل نتایج میتواند در اصلاح رفتار خزشی خاک مورد استفاده قرار گیرد. با دانستن جهت تغییرات مقادیر خزش و با استفاده از تغییر هر کدام از پارامترهای مذکور میتوان مقدار خزش را در جهت دلخواه تغییر داد. در شکل (۱-۱۱ و ۲-۱۱) نمودار حساسیت منحنی خزشی به پارامترهای مربوطه در برخی از مراحل بارگذاری ارائه شده است.

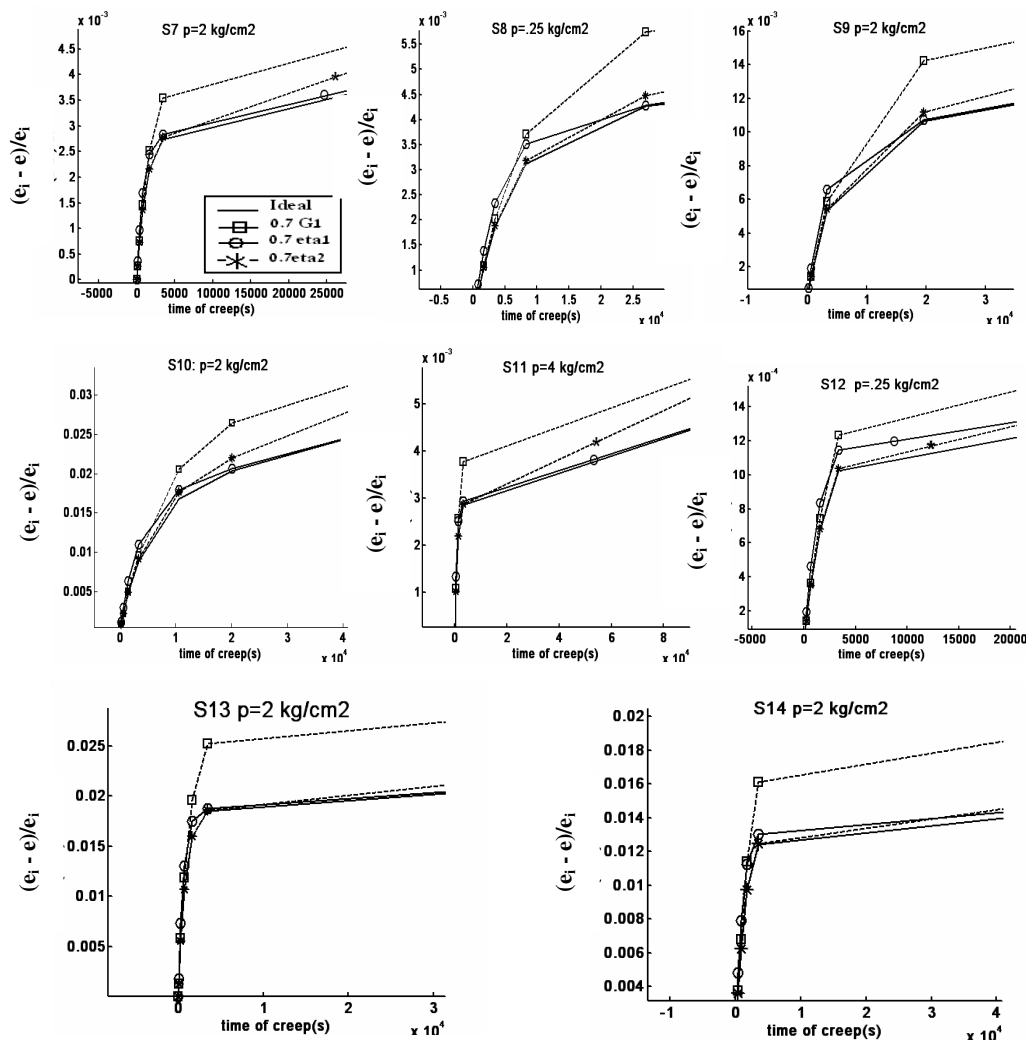
در اکثر نمونه‌ها  $\eta_2$  کاهش ۳۰٪ باعث افزایش ۲۵ الی ۱۵٪ خزش درازمدت میشود در حالیکه ۳۰٪ کاهش  $G_1$  خزش در زمان‌های طولانی را ۴۰ الی ۲۸٪ افزایش می‌دهد. منحنی خزش نمونه‌های رسی حساس نسبت به سایر نمونه‌های رسی تأثیر بیشتری از تغییر پارامتر  $\eta_2$  می‌گیرد. بدین ترتیب میتوان گفت که در دراز مدت



شکل ۱۰- نمودار  $p' - \eta_2$



شکل ۱۱- حساسیت منحنی خزش S1-S6 به پارامترهای خزشی



شکل ۱۱-۲- حساسیت منحنی خزش S7-S14 به پارامترهای خزشی

#### ۴- نتیجه‌گیری

بررسی رفتار خزشی نمونه‌های رسی متنوع نشان می‌دهد که:

۱- رفتار خزشی رسها، در دامنه وسیعی از تغییرات خواص خاک، بر مدل مایعات ماکسول توسعه یافته قابل انطباق است. به عبارت دیگر رفتار خزشی رسها بیشتر از مدل‌های رفتاری مایعات پیروی میکند تا رفتار جامدات.

۲- افزایش تنش موثر باعث افزایش  $G_1$  میشود. به عبارت دیگر میتوان گفت رسها در محدوده خزشی از خود رفتاری مشابه مواد سخت شونده بروز می‌دهند.

۳- بین تغییر تنش موثر با پارامترهای خزشی  $\eta_1$  و  $\eta_2$  رابطه معنی‌داری مشاهده نمی‌شود.

۴- در تمامی نمونه‌ها و در تمام پله‌های بارگذاری، در زمان‌های طولانی حساسیت منحنی ایده‌آل به تغییرات  $G_1$  بیشتر از دو پارامتر دیگر است.

۵- در اکثر نمونه‌ها، منحنی ایده‌آل حساسیت کمی به تغییرات  $\eta_1$  دارد. تغییرات منحنی در اثر تغییر این پارامتر در زمان‌های اولیه خزش بروز می‌کند اما بعد از گذشت زمان، این تغییرات به صفر میل می‌کنند.

- with an introduction to Linear Viscoelasticity, North-Holland Publishing Co., 1976.
- [8] Kano S., Moriwaki T., Yoshikuni H., Iwamoto A., "An interpretation on consolidation behavior of Pre-loaded clay ground based on an elasto-viscous model". 2<sup>nd</sup> international conference on ground improvement techniques, Singapore, 1998.
- [9] Li B., Ying H, Wang K., Xie K "One-Dimensional Consolidation of Clay Exhibiting Rheological Characteristics with Impeded Boundary under Time-Dependent Loading", 2<sup>nd</sup> International conference on GROND IMPROVEMENT TECHNIQUESE, Singapore, 1998.
- [10] Sadrekarimi J. "GEOTECHNICAL PROPERTIES OF LACUSTRINE CARBONATE SEDIMENT", International Journal of Engineering, Vol.15 No.4 347-356, 2002.
- [11] Chen W.F. and Han D.J, "Plasticity for structural engineers", 1st ed., Berlin, Springer, 1989.
- [12] Goodman R.E. "Introduction to rock mechanics", 2nd edition, New York, John Wiley & Sons. 1989.
- [13] Standard Test Method for One-Dimensional Consolidation, ASTM D 2435, 1994.
- [14] Magrab E. B., "Engineer's Guide to Matlab", Pearson Education, 2000.
- ۶- با بکارگیری مدل پیشنهادی می‌توان نشست ناشی از تحکیم ثانویه را با دقت بسیار بالاتری محاسبه نمود و پیشبینی‌های مهندسی در این موارد را با دقت بیشتری انجام داد.

#### مراجع

- [1] Terzaghi k. "Theoretical soil mechanics", Willy, New York, 1943.
- [2] Lambe, T.W. and Whitman R., "soil mechanics", Willy, 1969.
- [3] Tewatia S.K , Bharagav D.N, Chauhan G. and Sridharan A, "Velocity Method for Creep of Clayey Soils", Electronic Journal of Geotechnical Engineering Vol. 7, Bundle B, www.EJGE.com, 2002.
- [4] Das B.M., "Principles of Geotechnical Engineering", BOSTONE, PWS publish Co.1997.
- [5] Yoshikuni, H., Kusukabe O., Hirao T., Ikegami S., "Elasto-viscous modeling of time-dependant behavior of clay", XIII ICSMFE, New Delhi, India. 1994
- [6] Fiugge, W, "Viscoelasticity", 2nd ed. Springer-velay, New York, 1975.
- [7] Findley, W.N., Lai J.S. and Onaran, K, "Creep and Relaxation of Nonlinear Viscoelastic Materials,