

تأثير الرطوبة والإجهاد المطبق على خصائص الزحف للتراب الانخفاسية

*أ.د علي سليمان العبدالله.

**م. محمد بسام عيد

الملخص

يهدف هذا البحث إلى إجراء دراسة مخبرية لتوضيح سلوك الزحف في التراب الانخفاسية بتغير محتوى الرطوبة والإجهاد المطبق.

أحضرت التربة من منطقة جوسيه (جنوب غرب مدينة حمص)، و حددت الخواص الرئيسية لها ، بعد ذلك تم إجراء سلسلة من اختبارات التشوه مع الزمن للتراب الانخفاسية ضمن جهاز الضغط الحر ،وأظهرت النتائج أن تغير محتوى الرطوبة والإجهاد المطبق على العينة لهما تأثير كبير على خصائص الزحف للتراب الانخفاسية، فعند محتوى رطوبة منخفض تكون قيمة التشوه مع الزمن في العينات صغير وتدخل العينة مرحلة الزحف الابتدائي ومرحلة الزحف المستقر، وعند تعرض التربة لنفس الإجهادات وبتغير محتوى الرطوبة تزداد قيمة التشوهات وتدخل العينات المعرضة لإجهاد أكبر مرحلة الزحف المتسارع وتكون مدته قصيرة مقارنةً مع الزحف المستقر، تم التوصل إلى نموذج رياضي يوصف سلوك الزحف للتراب الانخفاسية بتغير محتوى الرطوبة والإجهاد المطبق.

كلمات مفتاحية: التراب الانخفاسية، الخصائص الريولوجية، تشوه الزحف، الزحف المتسارع.

Effect of moisture content and stress applied on creep properties of Loose soils

Ali Alladbulba *

Mohammad Eid **

Abstract

This research aims to conduct a laboratory study to investigate the creep behavior of Loose soils with the change of moisture content and applied stress.

The soil was brought from the Joseh area (located southwest of Homs city), and its main properties were determined, after that a series of test (time dependent deformation) were carried out for the Loose soils within an unconfined compression test.

The results showed that the moisture content and the applied stress have a significant effect on the creep properties of Loose soils, at low moisture content the value of strain in the samples is small, and the sample enters the stage of primary creep and secondary creep.

The value of strain increases with increasing moisture content when samples are subjected to the same stresses, and the samples subjected to greater stress enter the stage of accelerated creep and its duration is short compared to the secondary creep.

A mathematical model has been created to describe the creep behavior of Loose soils with the change of moisture content and applied stress.

Key words: Loose soils, Rheological properties, creep deformation, accelerated creep

*Professor, Department of Geotechnical Engineering, College of Civil Engineering, Al-Baath University.

** Postgraduate Student (PhD) Department of Geotechnical Engineering - College of Civil Engineering - Al-Baath University.

1. مقدمة

الترب الانخفاسية أو ما تسمى بتربة اللوس عبارة عن رواسب ريحيه - Aeolian deposit ذات اللون الأصفر الرمادي أو الأصفر المائل للبنى، وهي رواسب ذات مسامية عالية تتكون بشكل أساسي من جزيئات السيلت وكميات صغيرة من جزيئات الرمل والغضار، وأهم ما يميز هذه الترب بأنها تتمتع بمقاومة ميكانيكية عالية عندما تكون جافة وعند ترطيبها تنهار بنيتها بشكل سريع مسبباً هبوطات كبيرة.

تشغل هذه التربة حوالي 10% من مساحة العالم وتنتشر في سوريا في منطقة الفرات وعلى امتداد نهر العاصي من منطقة القصير مروراً بالرستن وصولاً إلى سهل الغالب. شكّلت هذه التربة مشاكل عديدة للمنشآت الهندسية المشيدة عليها حيث أصبح البعض من هذه المنشآت خارج عن الاستثمار ويمكن اعتبارها أيضاً إحدى الأسباب ممكن أن تسبب الانهيارات الأرضية، ويعود السبب في ذلك إلى خصائص الزحف الفريدة التي تتمتع بها التربة اللوسية، فقد يعمل تغير محتوى الرطوبة كعامل رئيسي يتحكم في المقاومة الميكانيكية لتربة اللوس ويؤثر على تقدم آلية الانهيار ويعزى ذلك في المرتبة الأولى إلى بنية اللوس المسامية.

[6] أجرى تجارب كيميائية على تربة اللوس وأكد أن تغير محتوى الرطوبة كان بالفعل عاملاً رئيسياً يتحكم في قوة القص ، وأن ترطيب تربة اللوس على المدى الطويل يؤدي إلى إذابة أيونات الملح ، مما يضعف من مقاومتها.

[11] درس تأثير التغيير في الرطوبة على البنية المجهرية لتربة اللوس ووجد أنه في ظل ظروف الغمر أو الترطيب ، سيكون لهيكل التربة تغير واضح مع زيادة محتوى الرطوبة ، مما يؤدي إلى تقليل السمنتة بين جزيئات التربة و تقليل مقاومتها.

دُرست هذه التربة من حيث تكوينها وتشكيلها وسلوكها وعلاقتها بالعديد من العوامل وكيفية التعامل معها، ووضعت العديد من النظريات والآليات التي تفسر سلوكها إلا أن سلوك الزحف لتربة اللوس بقي محط انظار العديد من الباحثين حتى الآن.

إن الخاصية الريولوجية للتراب الانخفاسية ترتبط ببعض المشكلات مثل قابلية الانهيار وقوة وقابلية الانضغاط لذلك فإن إجراء بحث حول الخصائص الريولوجية لتربة الانخفاسية ليس له أهمية تعليمية لحل المشكلات الجيولوجية فقط، بل له أيضاً بعض الأهمية الإرشادية والمبتكرة في البحث المتعلق بميكانيكا المواد الصلبة.

تعتبر الخصائص الريولوجية للجسم عن نفسها في شكل زحف، ارتخاء، تراجع في القوة بسبب تطبيق حمولة على المدى الطويل، ويُفهم زحف التربة بأنه عملية التشوه المستمر مع الزمن تحت حمل ثابت.

على الرغم من أن جميع الأجسام الحقيقية تكون - من حيث المبدأ - عرضةً للزحف فإن هذه الخاصية يمكن ملاحظتها فقط إذا توفر الوقت الكافي بالإضافة لتوفر درجة حرارة معينة، فالترربة والمعادن يمكن أن تزحف تحت درجة حرارة عالية والتشوه المرتبط بها يمكن أن يصبح ملموساً في غضون ساعات أو أشهر، ويمكننا القول إن الريولوجية هي العلم الذي يدرس زحف أو سيلان المواد ، وتأتي أهمية الريولوجيا انطلاقاً من نظريات المرونة واللدونة الكلاسيكية فإن حالة (إجهاد - تشوه) للجسم يمكن أن تعرف بشكل واضح بمقدار الحمل المطبق وطريقة تطبيقه، إذا بقي الحمل دون تغيير فإن الإجهاد الناتج والتشوه يبقى أيضاً دون تغيير.

في الأجسام الحقيقية يتغير سلوك (الإجهاد - التشوه) مع الزمن ويعتمد على تاريخ التحميل السابق وكنتيجه، يمكن اعتبار علاقة (الإجهاد - التشوه) علاقة متغيرة القيم أكثر منها علاقة ذات قيمة ثابتة حتى لو كان أحدهما (الإجهاد - التشوه) ثابتاً فإن الآخر سيكون متغيراً مع الزمن [8].

عند اختبار الأجسام المثالية، فإن نظرية المرونة واللدونة الكلاسيكية تفترض أن أشكال التشوه الناتجة عن إجهاد مجّمع والناتجة عن إجهاد بسيط تكون متماثلة، بينما في الأجسام الحقيقية تكون العلاقة بين الإجهاد والتشوه لا خطية علاوةً على أنها تتعلق بتراتبية الإجهادات وشروط التحميل، فدراسة هذه المسائل يقع خارج مجال نظرية المرونة واللدونة ضمن اختصاص الريولوجيا ونستطيع القول إن الغاية من الريولوجيا هو التحري حول ميكانيكية حالة التشوه والإجهاد والطريقة التي تتغير فيها هذه الحالة مع الزمن.

[2] درس تشوهات الزحف لترية اللوس بقيم مختلفة رطوبة مختلف ضمن جهاز الضغط ثلاثي المحاور مستخدماً ضغط حصر ثابت وأكد عند تطبيق إجهاد على تربة اللوس الانخفاسية تبدي العينة تشوهاً لحظياً ومع مرور الزمن يزداد التشوه ، وبتزايد قيمة الإجهاد الديفياتيوري تزداد قيمة التشوه اللحظي، وفي حال زيادة محتوى الرطوبة للعينة فإن عملية الزحف تنتقل إلى مرحلة الزحف المتسارع بشكل أسرع. وكلما زادت محتوى الرطوبة يحدث الانهيار عند إجهاد ديافياتيوري منخفض ويوقت أقصر، وفي حال كان الإجهاد الديفياتيوري أقل من قيمة إجهاد الخضوع فإن منحنى الإجهاد-التشوه يقترب من خط مستقيم ويظهر خصائص ريولوجية خطية، وبتزايد الإجهاد ليصبح أكبر من قيمة إجهاد الخضوع يظهر المنحنى منعطفاً واضحاً نحو محور التشوه مما يظهر سلسلة من الخصائص الريولوجية غير الخطية. وفي حال كان محتوى الرطوبة منخفض فمن المحتل حدوث انهيار قص وبتزايد محتوى الرطوبة يحدث انهيار لدن بدلاً من انهيار قص.

[4] درس خصائص الزحف لترية اللوس باستخدام جهاز الضغط ثلاثي المحاور بمحتوى رطوبة منخفض تحت تأثير قيم مختلفة لإجهاد الحصر مختلف، وأوضح أن ضغط الحصر ومحتوى الرطوبة لهما تأثير كبير على خصائص الزحف حيث أن تشوهات الزحف تزداد بزيادة محتوى الرطوبة تحت إجهاد حصر ثابت ، بينما تتناقص قيمة تشوهات الزحف بزيادة ضغط الحصر تحت محتوى رطوبة ثابت.

[5] درس خصائص الزحف لترية اللوس باستخدام جهاز الضغط ثلاثي المحاور لثلاثة أنواع من الترب اللوسية (تربة سليمة ذات محتوى رطوبة طبيعي وتربة معاد تشكيلها بأوزان حجمية مختلفة ومحتوى رطوبة مختلف وعينات سليمة مشبعة) تحت ضغوط حصر مختلفة. توصل إلى أن جميع الترب تبدي خصائص غير خطية ويكون التشوه في الترب المشبعة هو الأعلى ثم يليه العينات المعاد تشكيلها ثم العينات الأصلية، مؤكداً على أن الرطوبة والإجهاد المطبق والكثافة الجافة جميعها لها تأثير كبير على خصائص الزحف لترية اللوس.

[1] درس خصائص الزحف لتربة اللوس ضمن جهاز القص المباشر وجهاز الضغط ثلاثي المحاور من أجل نفس العينات ونفس محتوى الرطوبة وتوصل إلى أن قيمة التشوهات في جهاز الضغط ثلاثي المحاور لم تتجاوز 10% بينما في جهاز القص المباشر لم تبلغ قيمة التشوهات 4%.

[3] أجرى اختبارات زحف على تربة اللوس مستخدماً جهاز الانضغاط أحادي المحور، وجهاز الضغط ثلاثي المحاور بضغط حصر مختلفة ومحتوى رطوبة مختلف. فمن خلال تحليل المنحنيات تبين أنه، في حال كانت قيمة الإجهاد المطبق أقل من قيمة إجهاد الخضوع للعيونة تكون تشوهات الزحف منخفضة وتأخذ شكل مستقيم تقريباً وفي حال تجاوز قيمة الإجهاد لإجهاد الخضوع تبدأ مرحلة الزحف المتسارع ويميل الخط إلى منحنى مما يعكس سلسلة من الخصائص الريولوجية اللاخطية لتربة اللوس.

2. هدف البحث

دراسة تشوهات الترب الانخفاسية مع الزمن وبيان تأثير الرطوبة والإجهاد المطبق على تشوهات الترب الانخفاسية مع الزمن.

3. مواد وطرائق البحث

تم إحضار التربة التي أُجريت عليها التجارب من منطقة جوسيه في ريف القصير جنوب غرب مدينة حمص-. حيث جُففت التربة ونخلت على المنخل 2mm وتم تحديد الخواص الأساسية الفيزيائية والميكانيكية للتربة وفق نظام (ASTM) [7] وكانت النتائج كما هي مبينة في الجدول (1).

الجدول (1) الخواص الأساسية الفيزيائية والميكانيكية للتربة

تأثير الرطوبة والإجهاد المطبق على خصائص الزحف للتربة الانخفاسية

جوسيه (ريف القصير)		موقع التربة
7.8	$\omega\%$	محتوى الرطوبة
1.67	$\gamma_b \text{ gr/cm}^3$	الوزن الحجمي الرطب
1.55	$\gamma_d \text{ gr/cm}^3$	الوزن الحجمي الجاف
2.7	G_s	الوزن النوعي
1.79	$\gamma_{d \max} \text{ gr/cm}^3$	الوزن الحجمي الجاف الأعظمي
16.8	$\omega_{opt}\%$	الرطوبة الأمولية
0.7419	e_0	دليل الفراغات الابتدائي
28.38	$sr\%$	درجة الإثباع
27.8	$LL\%$	حد السيولة
17.4	$LP\%$	حدا اللدونة
10.4	$PI\%$	دليل اللدونة
24.6	$s\%$	رمل
52.6	$M\%$	سيلت
22.8	$C\%$	غضار
24.2	ϕ	زاوية الاحتكاك الداخلي
0.46	$c \text{ kg/cm}^2$	التماسك
CL	USCS	نظام تصنيف التربة

3-1 تجهيز العينات

لدراسة السلوك الريولوجي للتربة الانخفاسية أجريت تجارب التشوه مع الزمن باستخدام

جهاز الضغط الحر على عينات سليمة من التربة وزنها الجمي الجاف = γ_d

1.55 gr/cm^3 . تم اختيار قيم مختلفة لرطوبة العينات المستخدمة ($\omega =$) (5,8,12,16 %).

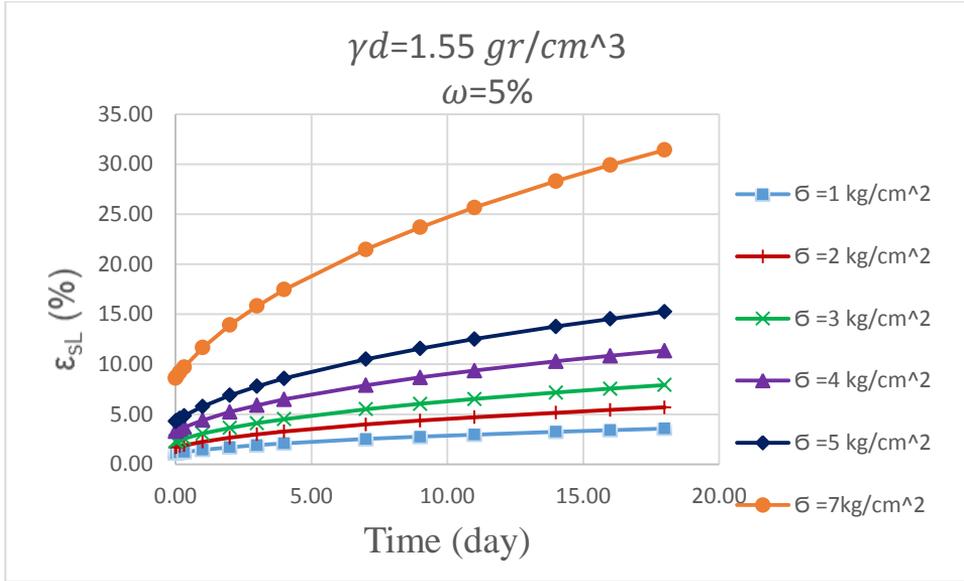
تم ترطيب كتلة ترابية حتى وصولها إلى رطوبة الإشباع تقريباً، ومن ثم تم لف وتغطية الكتلة وحفظها في حاوية رطبة في قعرها كمية من الماء لمدة سبعة أيام لتعيد العينة توزيع رطوبتها بشكل متجانس. قُسمت هذه الكتلة إلى أربع مجموعات حيث كل مجموعة سيكون لها رطوبة محددة. تم تجفيف المجموعات حتى وصولها إلى محتوى الرطوبة المطلوب بتعريض العينات لتيار هوائي ضعيف وجاف لعدة ساعات، وعلى مراحل ثم تم وزنها لحساب كمية الماء المتبخرة وبعد ذلك لُفت العينات بشرائح من النايلون ووضعت في حاوية رطبة لمدة سبعة أيام أيضاً لتتوزع الرطوبة بشكل متجانس، كررت العملية حتى الوصول إلى الرطوبة المطلوبة. [12]

3-2 دراسة تغير تشوهات التربة الانخفاسية مع الزمن

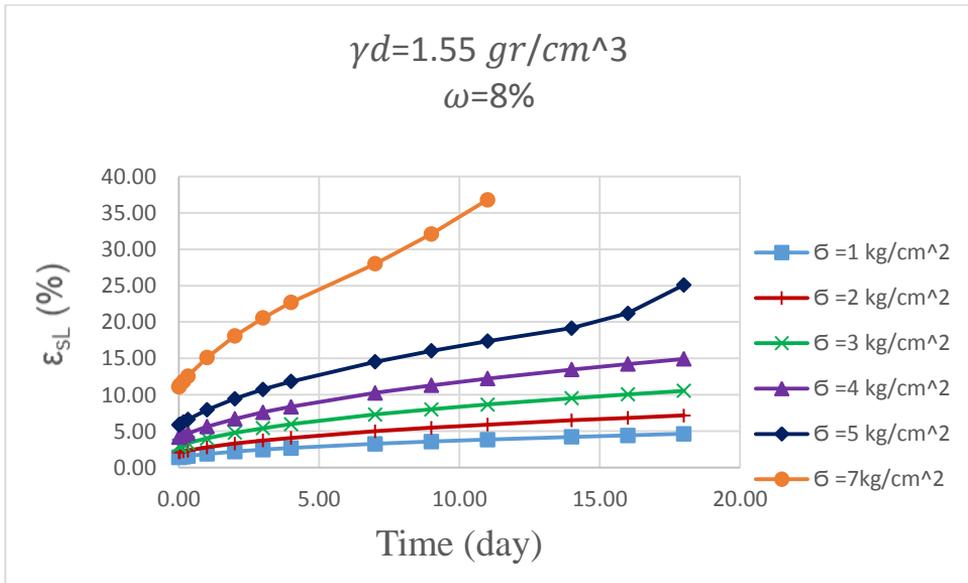
أُجريت تجارب التشوه مع الزمن باستخدام جهاز الضغط الحر على عينات سليمة البنية من التربة الانخفاسية أُخذت من كتله واحدة، قُسمت العينات إلى أربع مجموعات حيث كل مجموعة توافق رطوبة ابتدائية محددة وهي على التوالي $\omega = (5, 8, 12, 16) \%$ ، تم التحكم بالرطوبة الابتدائية للعينات من ناحية الترطيب أو التجفيف بالطريقة المشار لها في الفقرة السابقة.

أُجريت التجربة على عينات سليمة وزنها الحجمي الجاف $\gamma_d = 1.55 \text{ gr/cm}^3$ ثم طُبّق عليها إجهاد ثابت ($\sigma = 1,2,3,4,5,7 \text{ kg/cm}^2$) وبعد ذلك تم قياس التشوهات مع الزمن.

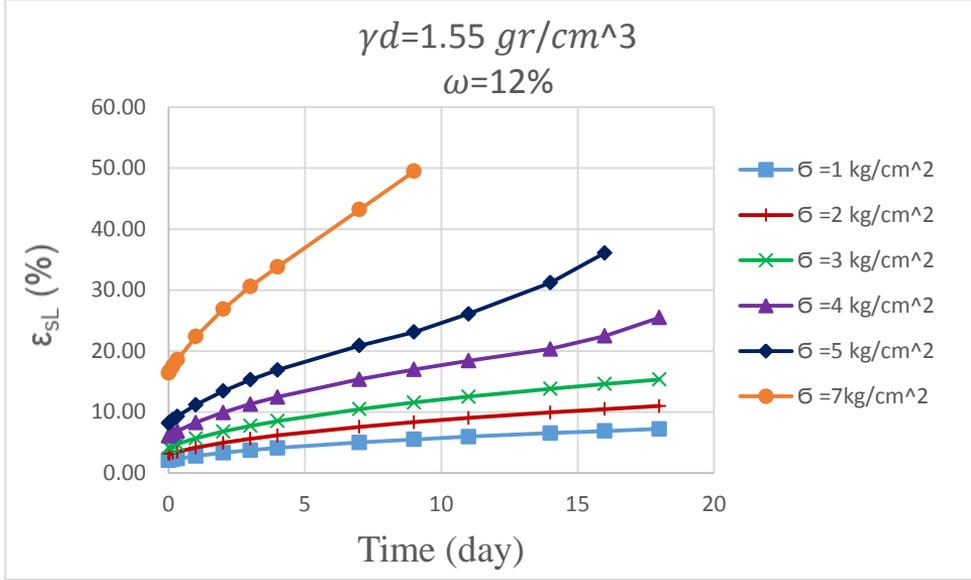
توضح الأشكال التالية (1,2,3,4) تغير تشوهات التربة الانخفاسية مع الزمن عند محتوى رطوبة $\omega = (5, 8, 12, 16) \%$ ، علماً أن كل منحنى يوافق قيمة إجهاد ثابت وكل مجموعة توافق قيمة محددة من الرطوبة.



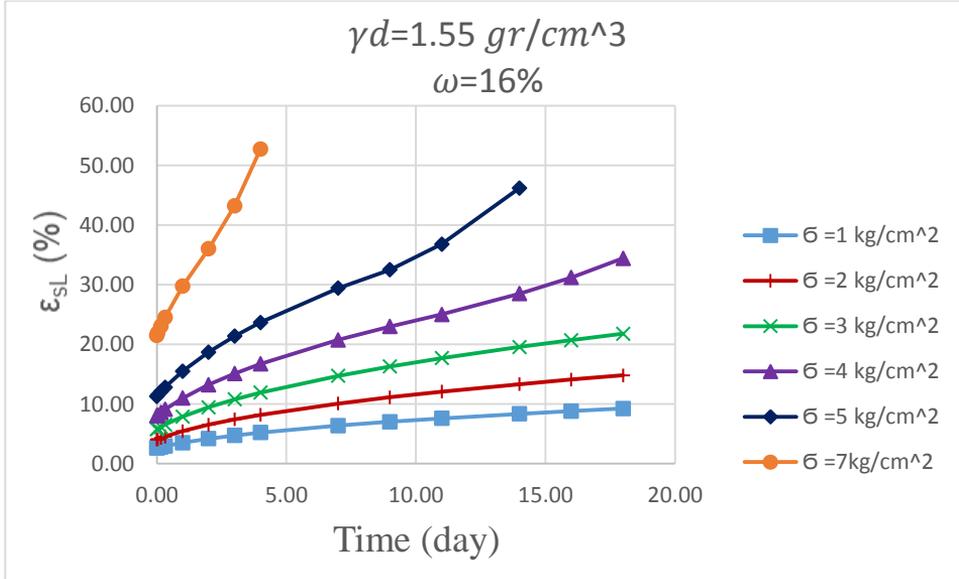
الشكل (1) تغير تشوهات التربة الانخفاسية مع الزمن من أجل ($\omega = 5\%$)



الشكل (2) تغير تشوهات التربة الانخفاسية مع الزمن من أجل ($\omega = 8\%$)



الشكل (3) تغير تشوهات التربة الانخفاسية مع الزمن من أجل ($\omega = 12\%$)



الشكل (4) تغير تشوهات التربة الانخفاسية مع الزمن من أجل ($\omega = 16\%$)

يمكننا تقسيم كل مخطط من المخططات السابقة إلى تشوهات لحظية يرمز لها $\epsilon(0)$ تحدث مباشرة بعد تطبيق الحمولة (الحمولة تبقى ثابتة طيلة فترة إجراء التجربة) وتوافق

التشوه عند اللحظة ($t=0$) وتسمى أيضاً التشوه الفوري أو البدائي، والجزء الآخر من التشوهات يتم مع الزمن ويرمز له $\varepsilon^-(t)$ ، وعليه فإن التشوهات مع الزمن للترب الانخفاسية يمكن أن نعبر عنها بالصيغة التالية :

$$\varepsilon(t) = \varepsilon(0) + \varepsilon^-(t) \dots \dots \dots (1)$$

كذلك وكما هو مبين من المخططات فإن تشوهات الزحف $\varepsilon^-(t)$ في أغلب العينات تتكون من جزأين في الجزء الأول تتناقص سرعة التشوهات مع الزمن (مرحلة الزحف الابتدائي) حتى تصل إلى قيمة ثابتة (مرحلة الزحف المستقر) حيث نطلق على تشوهات الزحف بتشوهات الزحف المتخامدة وتكون مدته طويلة نسبياً، ولكن عند زيادة محتوى الرطوبة وبزيادة الإجهاد المطبق تزداد سرعة التشوهات ويطلق عليها اسم التشوهات اللزجة - اللدنة (مرحلة الزحف المتسارع) ويمكن كتابة الصيغة (1) بالشكل التالي:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon(0) + \varepsilon_I^-(t) + \varepsilon_{II}^-(t) + \varepsilon_{III}^-(t) \dots \dots \dots (2)$$

وكل مرحلة من هذه المراحل تستمر (تطول أو تقصر) تبعاً لنوع التربة وقيمة الإجهادات المطبقة ورطوبة التربة.

يتمتع كل منحنى ضمن مرحلة الزحف المستقر بميل مستقيم ($\frac{d\varepsilon}{dt}$ = سرعة التشوه) يتعلق بقيمة الإجهاد المطبق وبمحتوى رطوبة العينة، وعند تطبيق إجهاد منخفض ومحتوى رطوبة منخفض تكون قيمة الميل منخفضة وأقرب إلى الصفر وتزداد قيمة الميل بزيادة قيمة الإجهاد ومحتوى الرطوبة.

إن تشوهات الزحف التي نحصل عليها هي تشوهات لدنة غير قابلة للاسترجاع والعلاقة بين تشوهات الزحف والإجهادات هي علاقة غير خطية وبناءً عليه تم اقتراح صيغة رياضية للتعبير عن تشوهات الزحف التي تتم مع الزمن بالشكل الآتي:

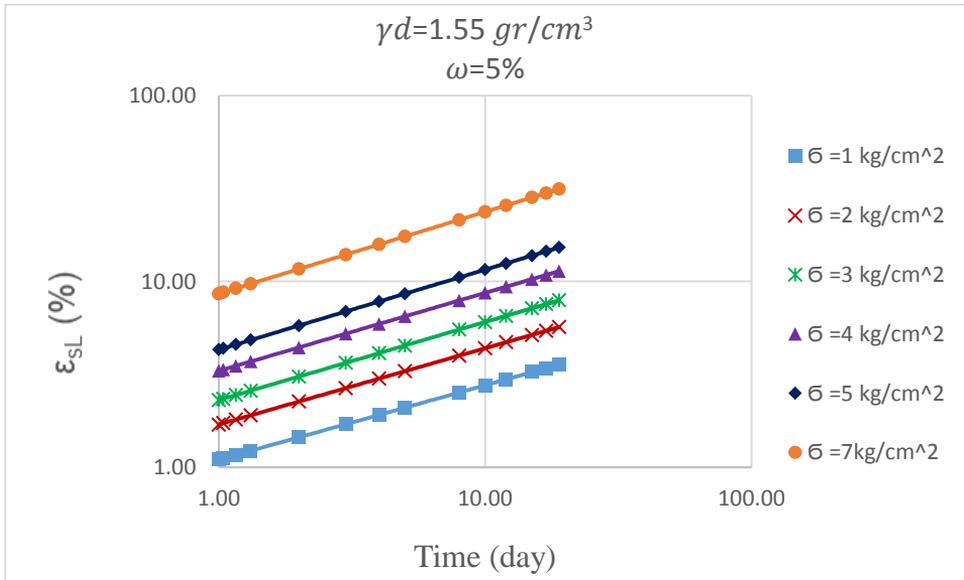
$$\varepsilon_{sl} = c * (t + 1)^\alpha \dots \dots \dots (3)$$

نأخذ لوغاريتم الطرفين :

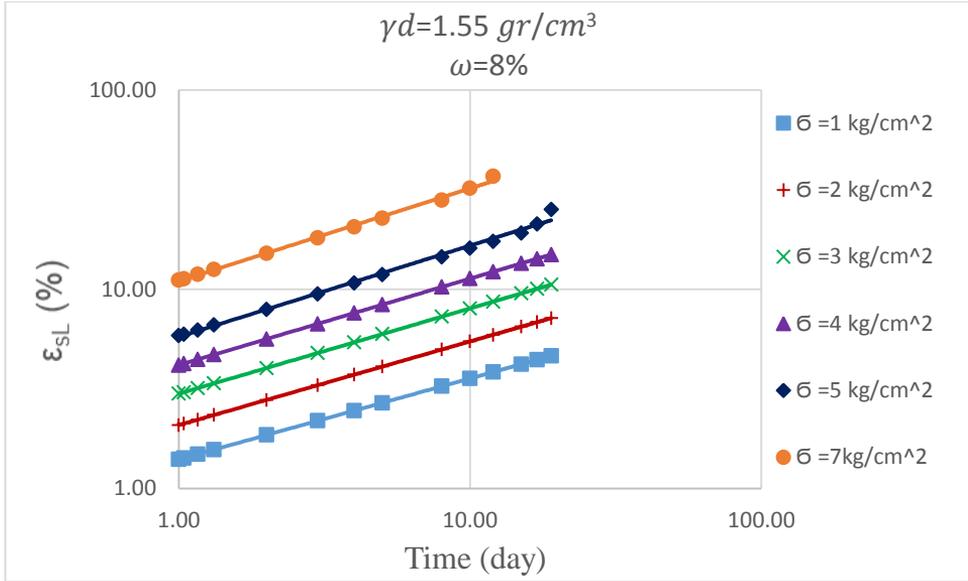
$$\ln \varepsilon_{sl}(t) = \alpha \ln(t + 1) + \ln c \dots \dots \dots (4)$$

الثوابت α, c تدعى ثوابت زحف ونحصل على قيمتها برسم النتائج المخبرية لتشوهات الزحف مع الزمن بجملة احداثيات لوغاريتمية يكون فيها محور الترتيب (ε_{sl}) ومحور الفواصل $(t + 1)$.

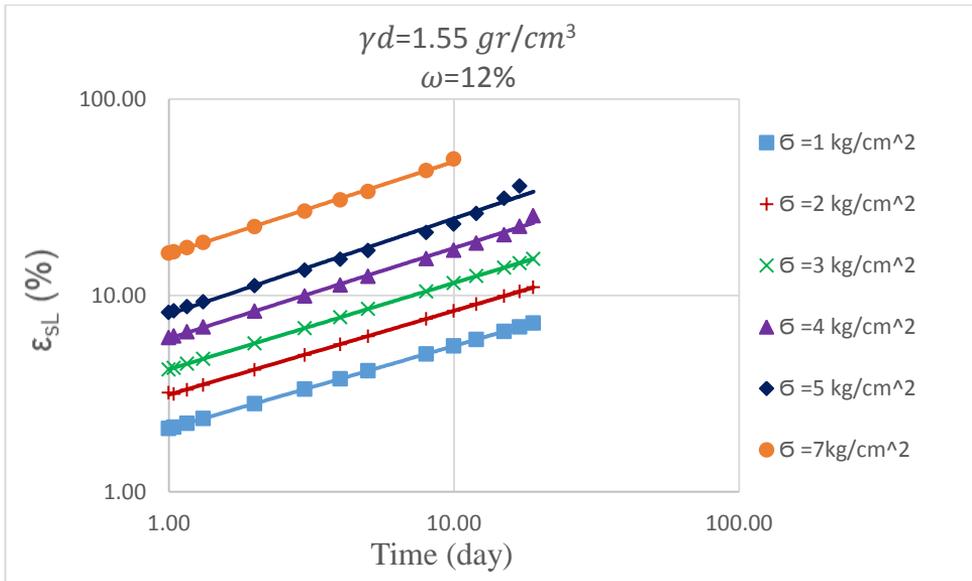
تبين الأشكال (5,6,7,8) تشوهات الزحف مع الزمن عند محتوى رطوبة $\omega = 5\%$ (5, 8, 12, 16) % إن وقوع النقاط على استقامة واحدة يشير إلى إن الصيغة (3) تعبر بشكل جيد عن تطور تشوهات الزحف مع الزمن للترب الانخفاسية.



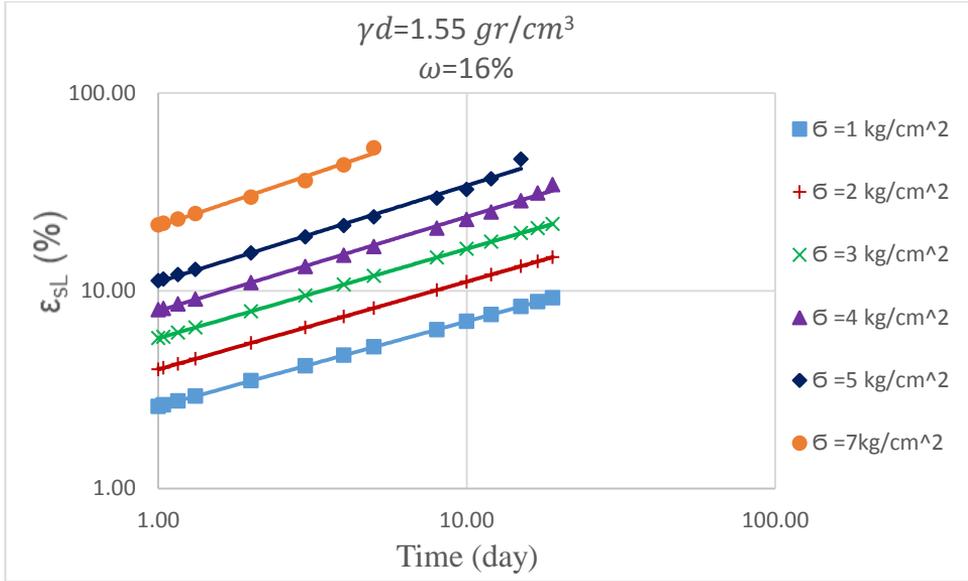
الشكل (5) تحديد الثوابت α, c من أجل رطوبة $\omega = 5\%$



الشكل (6) تحديد الثوابت α, c من أجل رطوبة $\omega = 8\%$



الشكل (7) تحديد الثوابت α, c من أجل رطوبة $\omega = 12\%$



الشكل (8) تحديد الثوابت α, c من أجل رطوبة $\omega = 16\%$

إن ميل المستقيمات يمثل قيمة الثابت α ، وتقاطع المستقيمات مع محور الترتيب يمثل قيمة الثابت c ، نرد في الجدول (2) قيم ثوابت الزحف الواردة في العلاقة (3) ومن هذا الجدول يمكن ملاحظة أن قيمة الثابت α ثابتة تقريباً وتتراوح بين (0.4-0.469) . أما الثابت c فقد تبين من الجدول أن قيمته ترتبط بالإجهاد المطبق على العينة وكذلك بالرطوبة المعتمدة حيث تتزايد قيمته مع زيادة الإجهاد المطبق على العينة وبزيادة الرطوبة.

الجدول (2) قيم ثوابت الزحف α, c الواردة في العلاقة (3)

$\sigma \text{ kg/cm}^2$	$\omega = 5\%$		$\omega = 8\%$		$\omega = 12\%$		$\omega = 16\%$	
	c	α	c	α	c	α	c	α
1	1	0.4	1.44	0.41	2.3	0.42	2.5	0.43
2	1.7	0.41	2.15	0.42	3.3	0.43	4.2	0.444
3	2.25	0.42	3.05	0.43	4.55	0.44	5.84	0.452

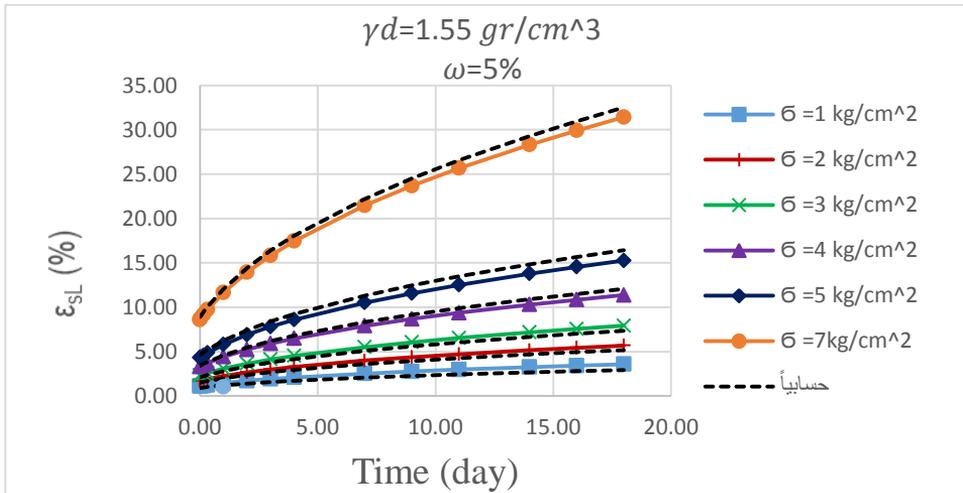
4	3.26	0.425	4.2	0.44	6.5	0.445	8.2	0.458
5	4.63	0.43	5.9	0.44	9.1	0.45	11.4	0.462
7	8.55	0.44	10.8	0.45	17.3	0.46	21.3	0.469

حيث C : يمثل تقاطع المستقيمات مع محور الترتيب.

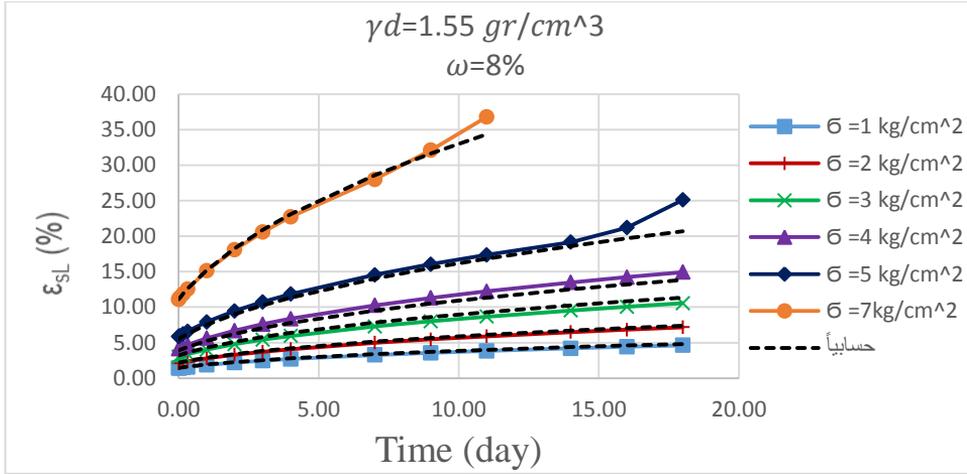
α : ميل المستقيمات

نورد في الأشكال التالية (9,10,11,12) قيم التشوهات مع الزمن المأخوذة من التجربة ويرمز لها بالخط المستمر والمنحني المنقط الآخر قيم التشوهات مع الزمن المحسوبة من الصيغة (3) .

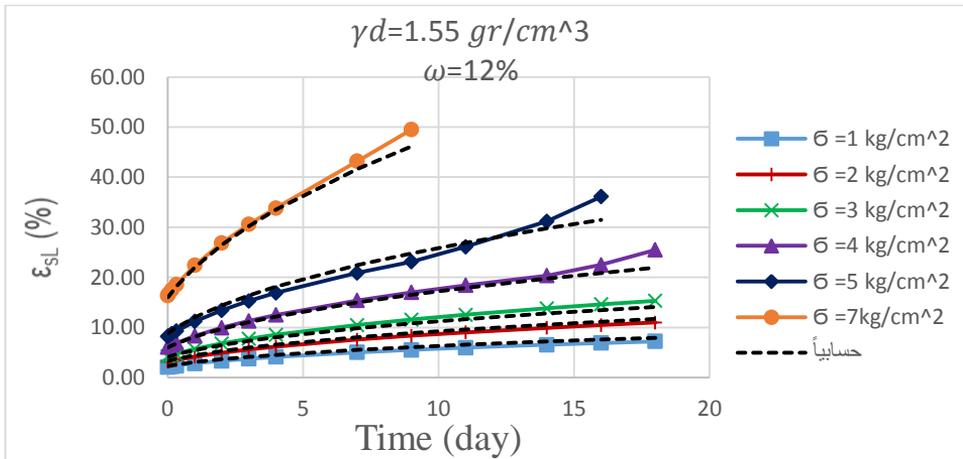
نلاحظ من الأشكال أن العلاقة المقترحة تتمتع بدقة جيدة في وصف تشوهات الزحف للتراب الانخفاسية ضمن مرحلتي (الزحف الابتدائي والزحف المستقر) وإن تقارب المنحنيين يعطي موثوقية للصيغة المقترحة ضمن مرحلة الزحف الابتدائي ومرحلة الزحف المستقر، ولكن عند دخول العينة مرحلة الزحف المتسارع تزداد سرعة التشوهات ويميل المنحني نحو محور التشوه فتصبح القيم المحسوبة من العلاقة (3) بعيدة نسبياً عن القيم المخبرية.



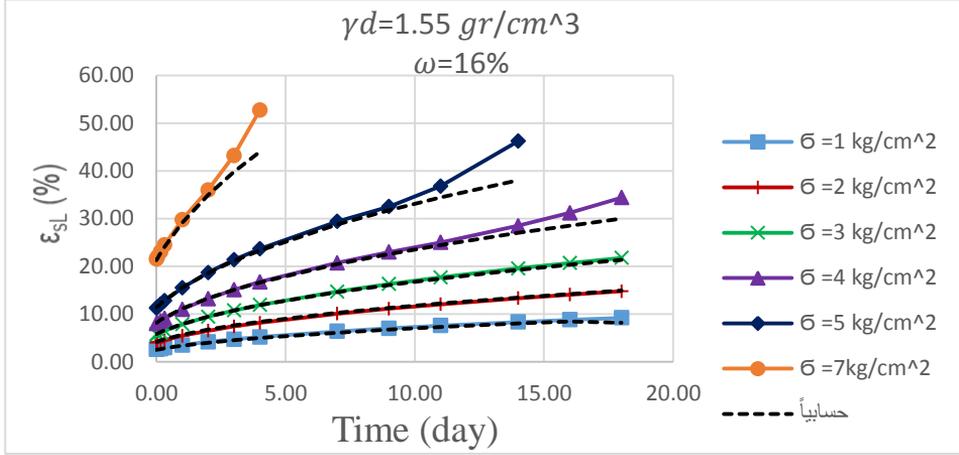
الشكل (9) القيم المخبرية والحسابية للتشوهات مع الزمن من أجل رطوبة $\omega = 5\%$



الشكل (10) القيم المخبرية والحسابية للتشوهات مع الزمن من أجل رطوبة $\omega = 8\%$



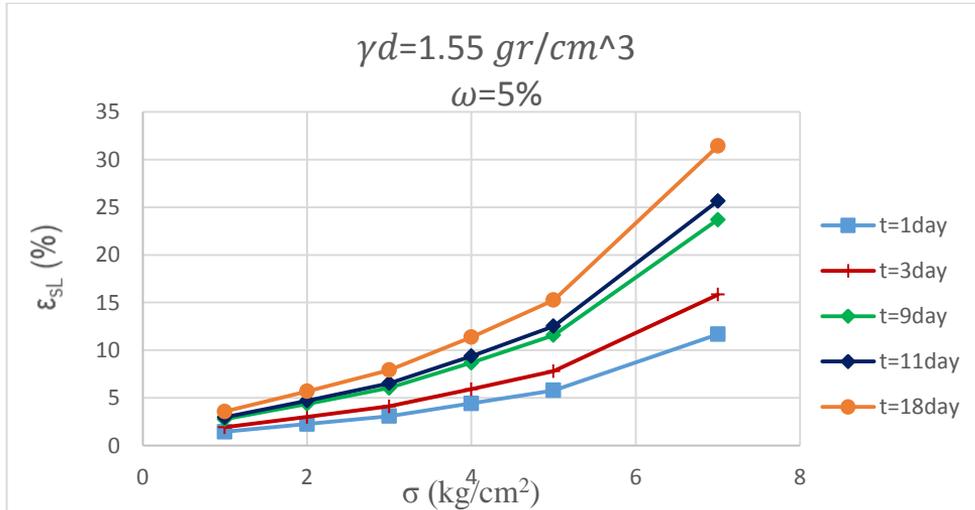
الشكل (11) القيم المخبرية والحسابية للتشوهات مع الزمن من أجل رطوبة $\omega = 12\%$



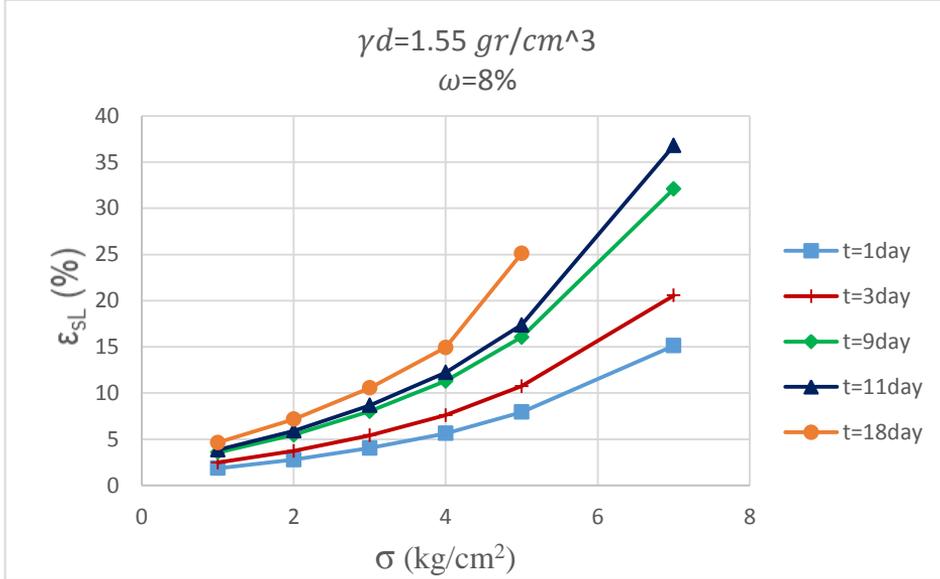
الشكل (12) القيم المخبرية والحسابية للتشوهات مع الزمن من أجل رطوبة $\omega = 16\%$

3-3 تأثير الإجهادات المطبقة على تشوهات التربة الانخفاسية مع الزمن

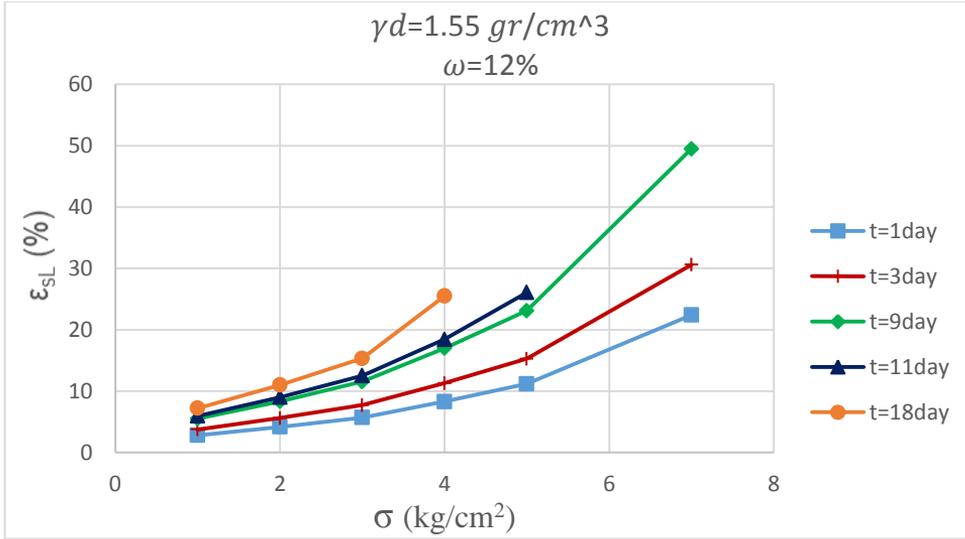
ليبيان تأثير الإجهادات المطبقة على التشوهات الحاصلة مع الزمن في التربة الانخفاسية قمنا برسم العلاقة بين التشوهات وقيم الإجهادات المطبقة من أجل أزمنة مختلفة (t=1,3,9,11,18 day) وكانت النتائج كما هو مبين في الأشكال (13,14,15,16).



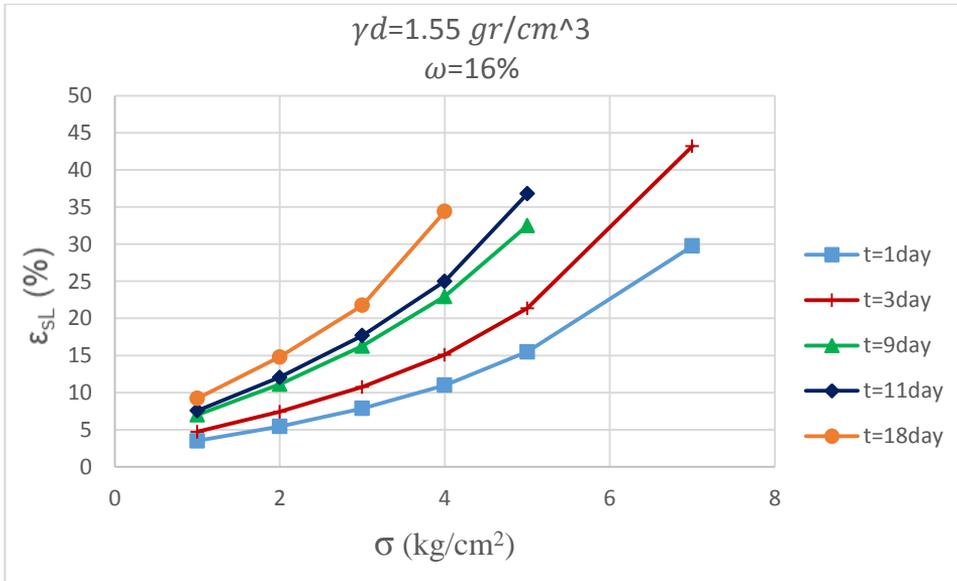
الشكل (13) العلاقة بين تشوهات الترب الانخفاسية مع الزمن والإجهادات المطبقة من أجل ($\omega = 5\%$)



الشكل (14) العلاقة بين تشوهات الترب الانخفاسية مع الزمن والإجهادات المطبقة من أجل ($\omega = 8\%$)



الشكل (15) العلاقة بين تشوهات الترب الانخفاسية مع الزمن والإجهادات المطبقة من أجل ($\omega = 12\%$)



الشكل (16) العلاقة بين تشوهات الترب الانخفاسية مع الزمن والإجهادات المطبقة من أجل ($\omega = 16\%$)

تبين نتائج منحنيات (الإجهاد والتشوه) بأن المنحني يأخذ شكل متزايد أي تزداد تشوهات الزحف بزيادة الإجهاد المطبق، ومع زيادة الزمن تزداد قيمة التشوهات وهذا يدل على وجود تابع متغير يزداد بزيادة الزمن. عند زيادة محتوى الرطوبة تصبح العلاقة بين (الإجهاد - التشوه) مع الزمن أكثر وضوحاً، في حال كانت الإجهادات المطبقة صغيرة فإن منحنى الإجهاد والتشوه يكون خطي ويزيادة قيم الإجهادات يتحول الشكل إلى منحنى وتصبح العلاقة غير خطية وهناك نقطة انعطاف للمنحنى نحو محور التشوه وهذا يدل على دخول العينة مرحلة الزحف المتسارع (تشوه لزج - لدن غير خطي).

تبقى العلاقة بين الإجهاد والتشوه علاقة خطية عند زمن منخفضة ومن أجل قيم مختلفة من الرطوبة ويزيادة الزمن تصبح العلاقة غير الخطية أكثر وضوحاً.

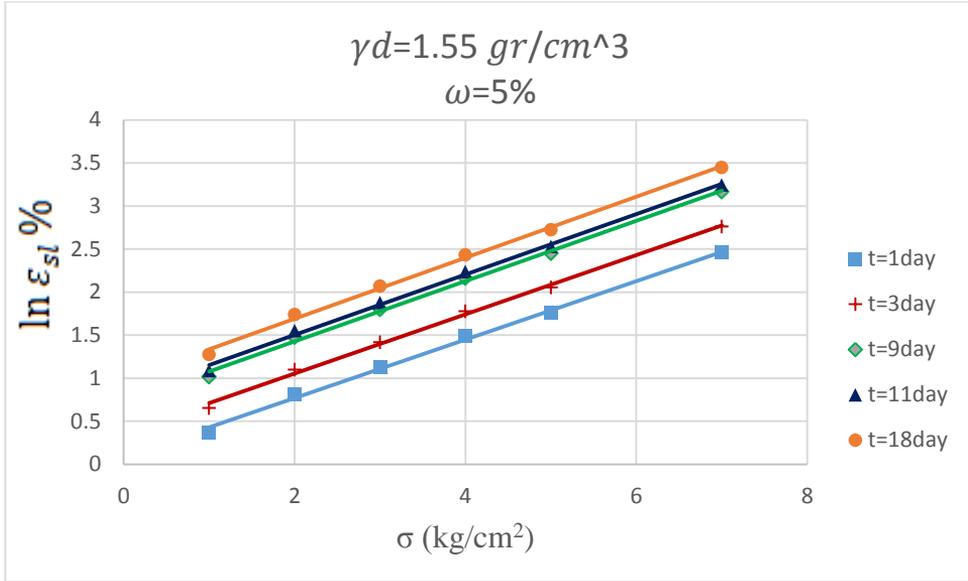
تم اقتراح علاقة رياضية للتعبير عن تأثير الإجهاد المطبق على تشوهات الزحف للتربة الانخفاضية:

$$\varepsilon_{sl}(t) = \xi e^{\kappa\sigma} \dots \dots \dots (5)$$

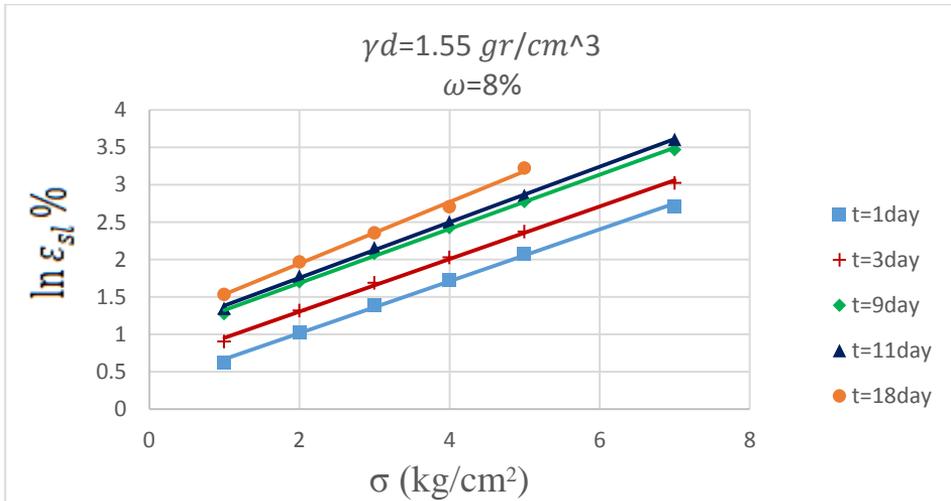
بأخذ لوغاريتم الطرفين يمكن أن نكتب العلاقة (5) بالشكل:

$$\ln \varepsilon_{sl}(t) = \ln(\xi) + \kappa * \sigma$$

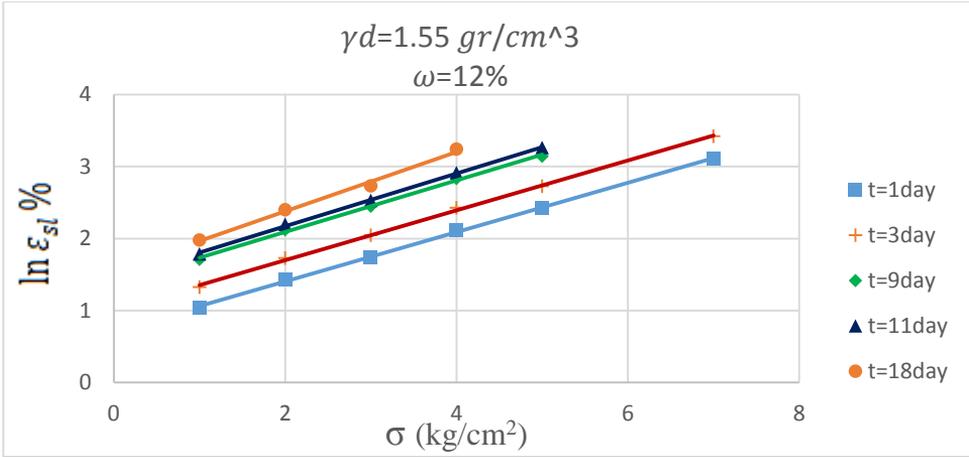
لتحديد قيم الثوابت ξ , κ نرسم العلاقة بين لوغاريتم التشوه $\ln \varepsilon_{sl}(t)$ والإجهاد المطبق حيث يمثل الثابت κ ميل المستقيم الواصل بين النقاط ، أما الثابت $\ln(\xi)$ هو تقاطع المستقيم مع محور الترتيب الممثل $\ln \varepsilon_{sl}(t)$ ، إن وقوع النقاط على استقامة واحدة يشير إلى أن العلاقة (5) تعبر تعبيراً جيداً عن تطور تشوهات الزحف بتغير الإجهادات المطبقة تبين الأشكال التالية (17,18,19,20) قيم الثوابت (κ, ξ)



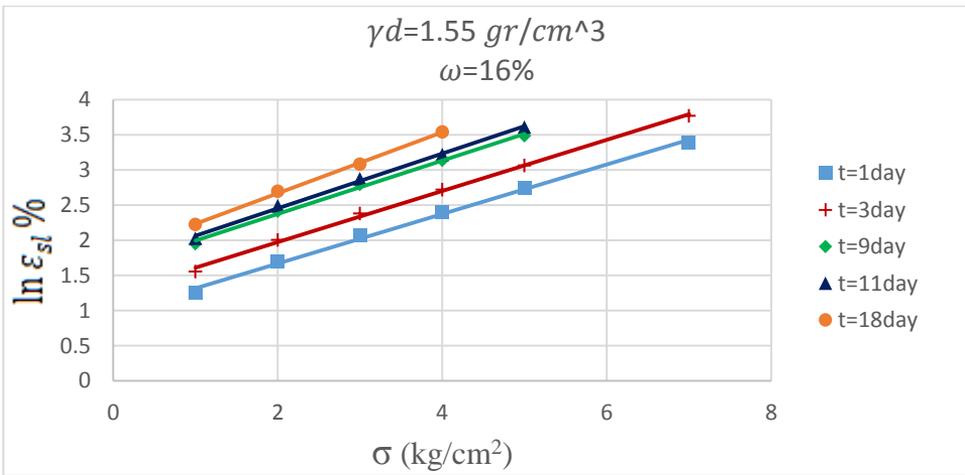
الشكل (17) تحديد ثوابت الزحف ξ , κ من أجل رطوبة ($\omega = 5\%$)



الشكل (18) تحديد ثوابت الزحف ξ , κ من أجل رطوبة ($\omega = 8\%$)



الشكل (19) تحديد ثوابت الزحف ξ , κ من أجل رطوبة ($\omega = 12\%$)



الشكل (20) تحديد ثوابت الزحف ξ , κ من أجل رطوبة ($\omega = 16\%$)

نرد في الجدول (3) قيم الثوابت الواردة في العلاقة (5) ومن هذا الجدول يمكن ملاحظة أن القيمة الثابت κ تتغير ضمن المجال (0.34-0.39) أما الثابت ξ فقيمته تزداد مع زيادة الزمن وزيادة محتوى الرطوبة .

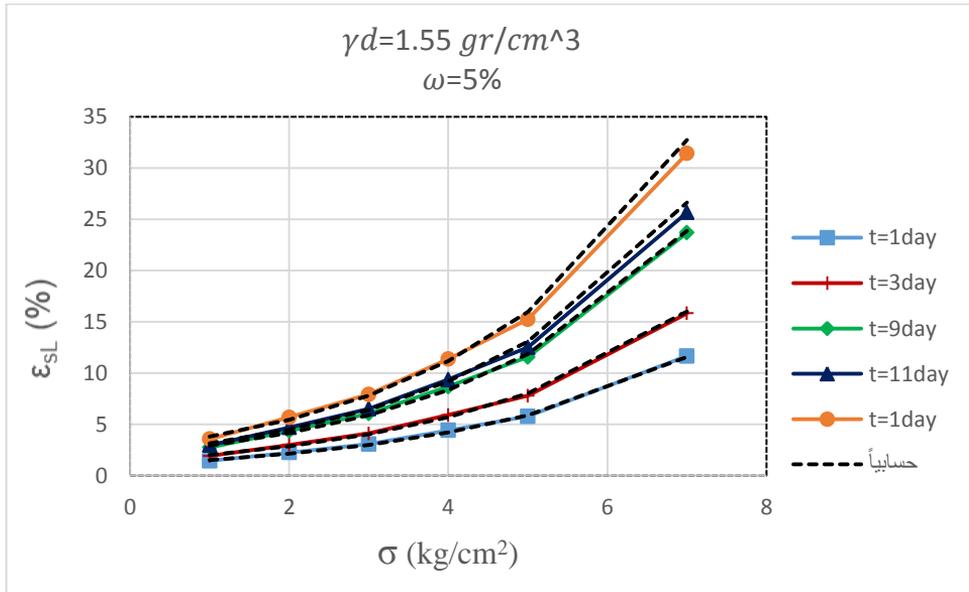
الجدول (3) قيم ثوابت الزحف ξ , κ الواردة في العلاقة (5)

Time	$\omega = 5\%$		$\omega = 8\%$		$\omega = 12\%$		$\omega = 16\%$	
	ξ	κ	ξ	κ	ξ	κ	ξ	κ
1day	1.09	0.34	1.37	0.347	2.086	0.35	2.61	0.352
3day	1.44	0.344	1.8	0.351	2.693	0.355	3.47	0.364
9day	2.02	0.35	2.65	0.362	3.91	0.365	4.8	0.375
11day	2.17	0.351	2.78	0.37	4.217	0.375	5.42	0.384
18day	2.6	0.354	3.5	0.375	5.5	0.38	6.8	0.39

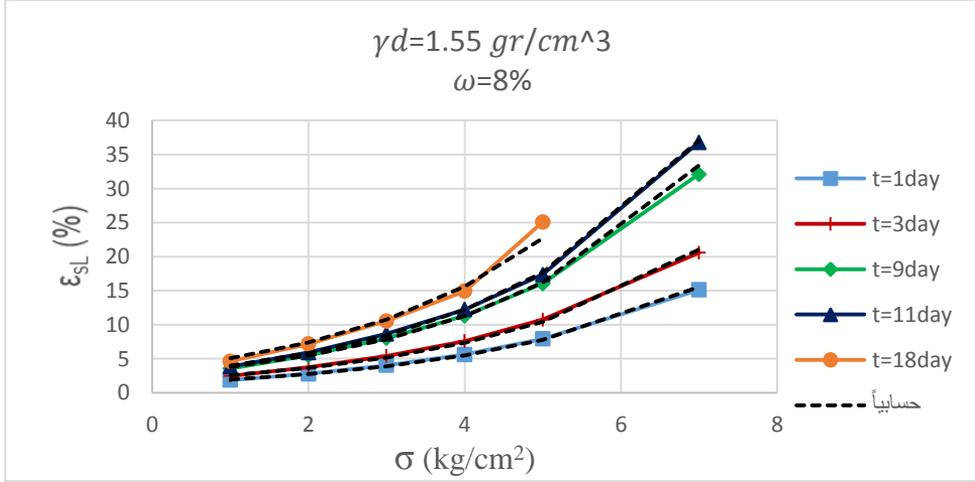
حيث $\ln \xi$: يمثل تقاطع المستقيمات مع محور الترتيب.

κ : ميل المستقيمات.

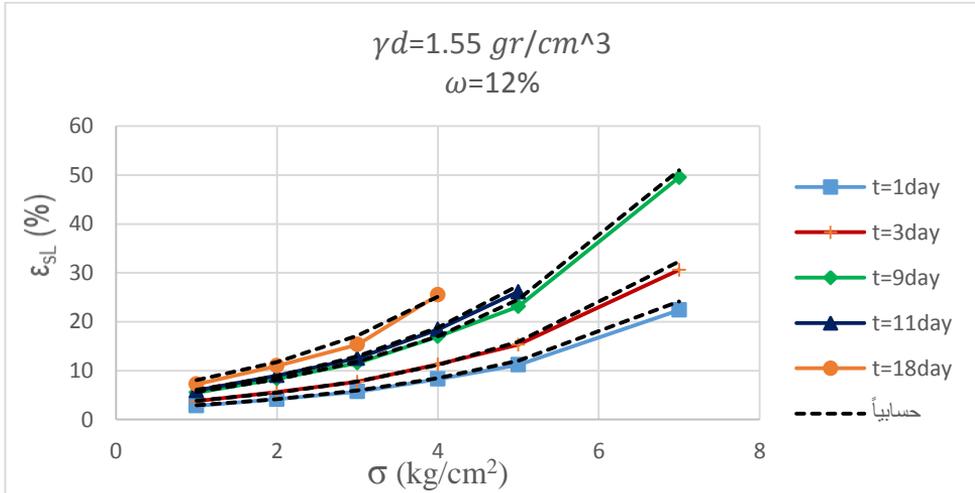
نرد في الأشكال التالية (21,22,23,24) قيم التشوهات مع الزمن المأخوذة من التجربة ويرمز لها بالخط المستمر والمنحني المنقط الآخر قيم التشوهات مع الزمن المحسوبة من الصيغة (5)، إن العلاقة المقترحة تتمتع بدقة جيدة في وصف العلاقة غير الخطية بين الإجهاد والتشوه مع الزمن.



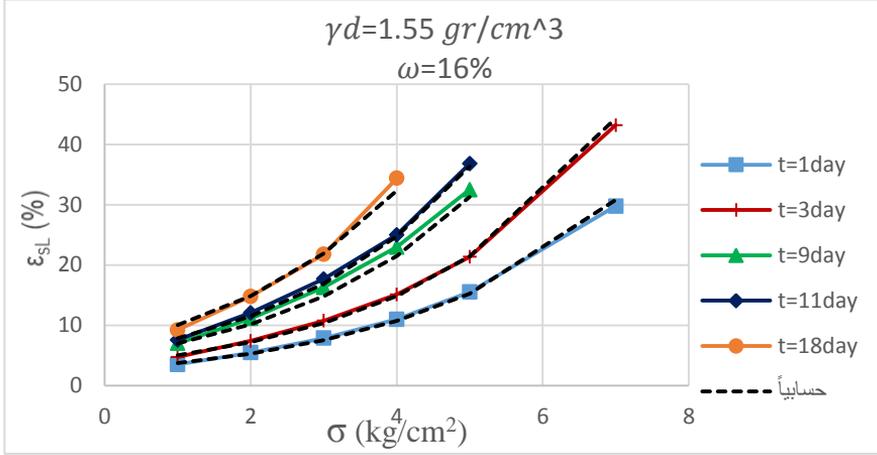
الشكل (21) القيم المخبرية والحسابية للتشوهات مع الزمن من أجل رطوبة $\omega = 5\%$



الشكل (22) القيم المخبرية والحسابية للتشوهات مع الزمن من أجل رطوبة $\omega = 8\%$



الشكل (23) القيم المخبرية والحسابية للتشوهات مع الزمن من أجل رطوبة $\omega = 12\%$



الشكل (24) القيم المخبرية والحسابية للتشوهات مع الزمن من أجل رطوبة $\omega = 16\%$

3-4 تأثير محتوى الرطوبة على تشوهات الترب الانخفاسية مع الزمن

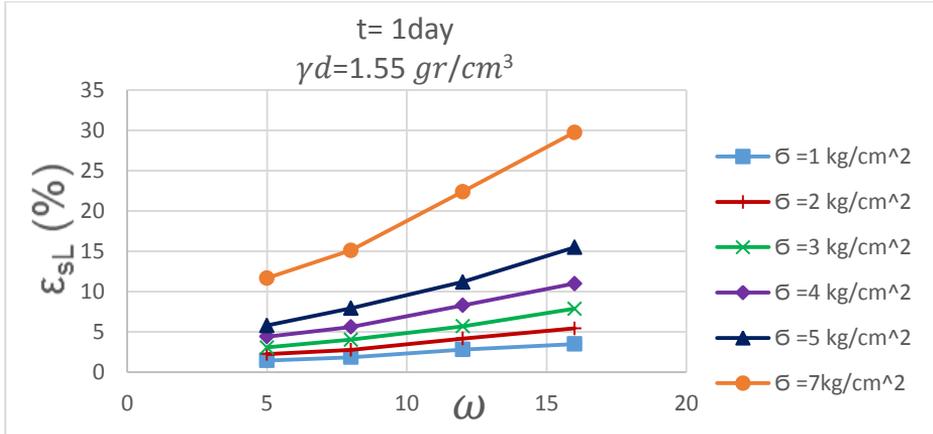
بهدف دراسة تأثير رطوبة التربة على التشوهات الحاصلة مع الزمن في التربة الانخفاسية قمنا برسم العلاقة بين التشوهات ومحتوى الرطوبة ($\omega = 5, 8, 12, 16\%$) من أجل كل إجهاد وعند فواصل زمنية محددة ($t=1,3,9,11,18$ day) وكانت النتائج كما هو مبين في الأشكال (25,26,27,28,29).

تم اقتراح صيغة رياضية يمكن من خلالها حساب تشوهات مع الزمن للترب الانخفاسية بدلالة محتوى الرطوبة:

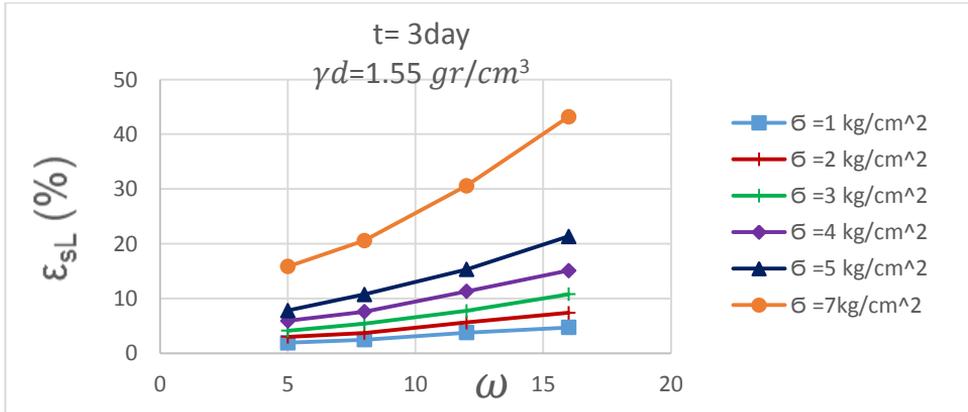
$$\varepsilon_{sl}(t) = \mu e^{\chi * \omega} \dots \dots \dots (6)$$

بأخذ لوغاريتم الطرفين تصبح المعادلة بالشكل:

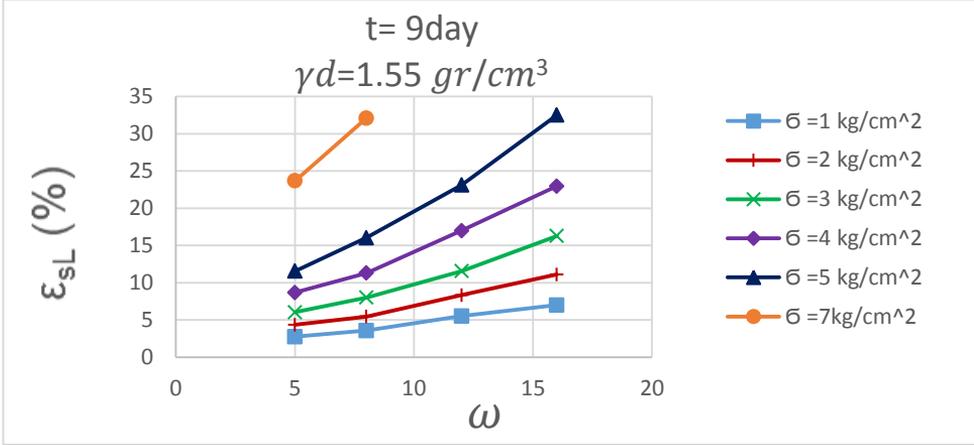
$$\ln \varepsilon_{sl}(t) = \ln \mu + \chi * \omega \dots \dots \dots (7)$$



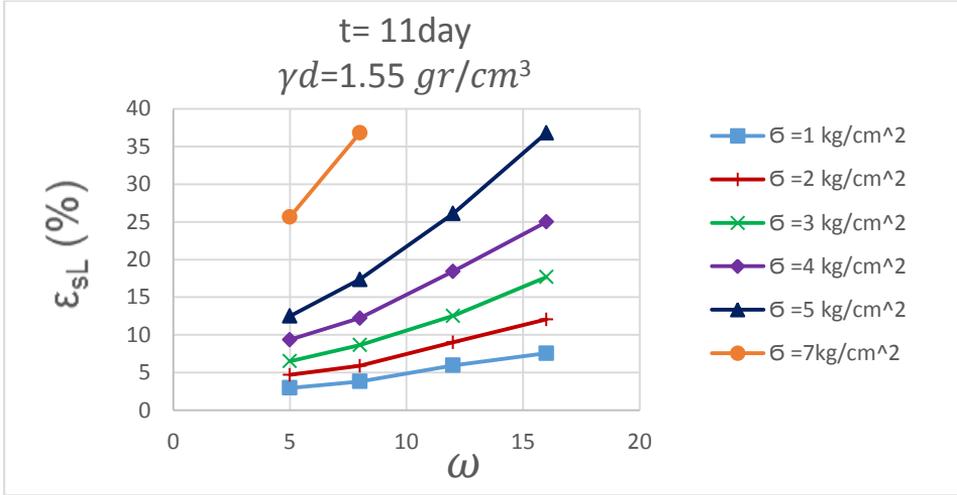
الشكل (25) تغير تشوهات الزحف تبعاً لمحتوى الرطوبة عند زمن (t=1day)



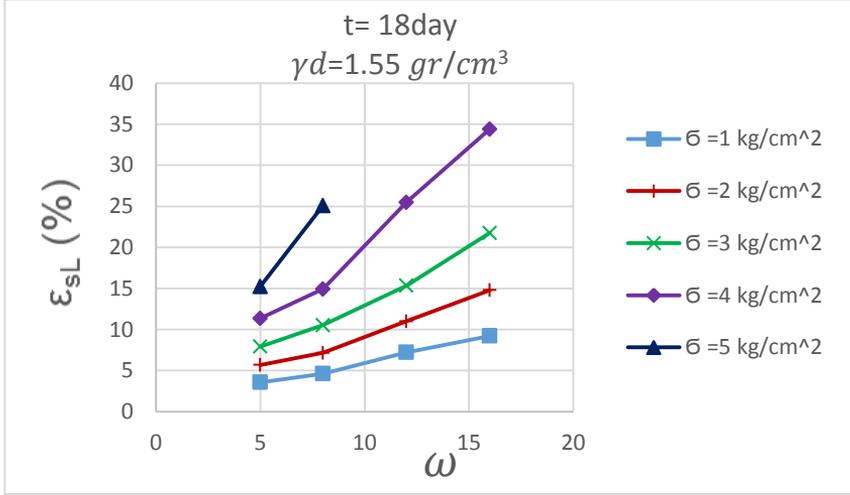
الشكل (26) تغير تشوهات الزحف تبعاً لمحتوى الرطوبة عند زمن (t=3day)



الشكل (27) تغيير تشوهات الزحف تبعاً لمحتوى الرطوبة عند زمن (t=9day)



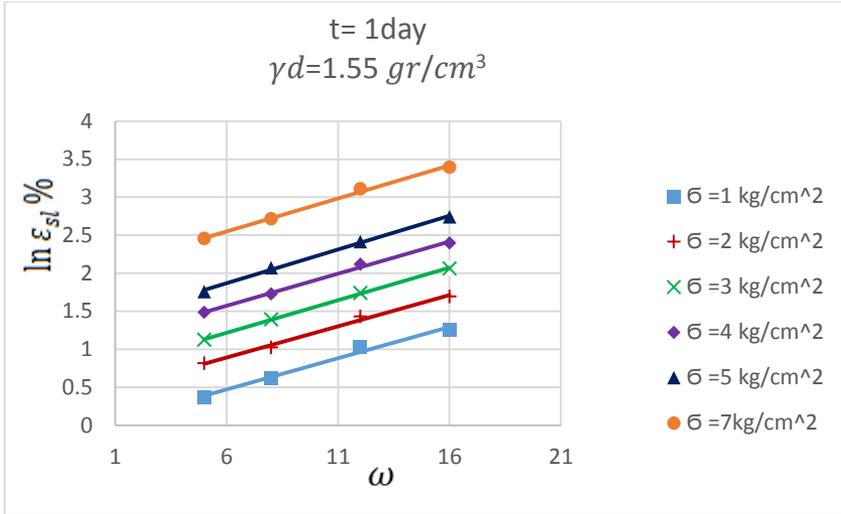
الشكل (28) تغيير تشوهات الزحف تبعاً لمحتوى الرطوبة عند زمن (t=11day)



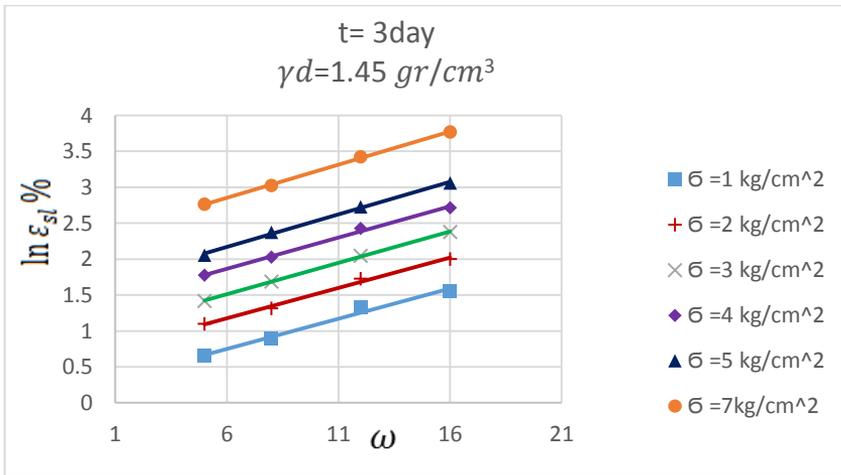
الشكل (29) تغير تشوهات الزحف تبعاً لمحتوى الرطوبة عند زمن (t=18day)

توضح المنحنيات السابقة أن تشوهات الزحف للتربة الانخفاسية تزداد بزيادة محتوى الرطوبة ويمكن أن نفسر ذلك بأن الروابط بين ذرات التربة الانخفاسية عبارة عن روابط غضارية وروابط إسمنتية حاصلة من الاملاح المتبلورة وكذلك الروابط عبر طبقة السيلكون المتواجدة على محيط الجزيئات الرملية فعند زيادة محتوى الرطوبة تضعف هذه القوى أو تتلاشى نهائياً نتيجة لارتخاء الروابط الغضارية و إذابة قسم من الروابط الملحية، أي أنه بزيادة محتوى الرطوبة للعينة يعمل الماء على إضعاف قوى الاحتكاك الداخلي ويقلل من التماسك مما يسبب تليين كبير للتربة ويجعل التربة أكثر عرضة للتشوه .

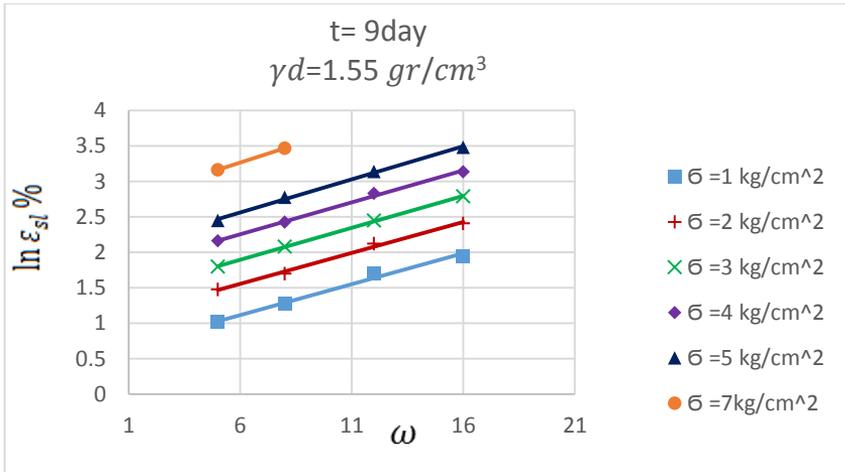
ولتحديد قيم الثوابت نرسم العلاقة بين لوغاريتم التشوه و محتوى الرطوبة حيث يمثل محور الفواصل ω أما محور الترتيب يمثل $\ln \varepsilon_{sl}(t)$ فيكون ميل المستقيم يمثل الثابت χ أما تقاطع المستقيمات مع محور الترتيب يمثل $\ln \mu$. إن وقوع النقاط على استقامة واحدة يعطي موثوقية جيدة للعلاقة المقترحة (6) كما هو وارد في الأشكال (30,31,32,33,34) والجدول (4) يبين قيم الثوابت μ, χ .



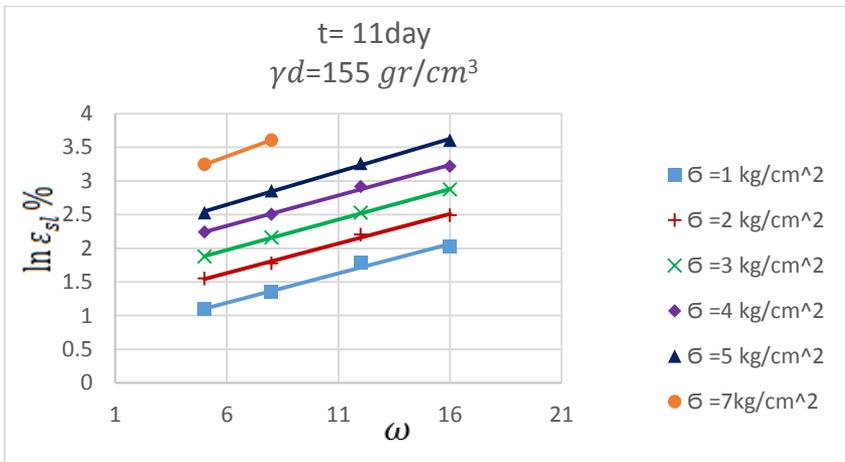
الشكل (30) تحديد ثوابت الزحف μ, χ عند زمن (t=1day)



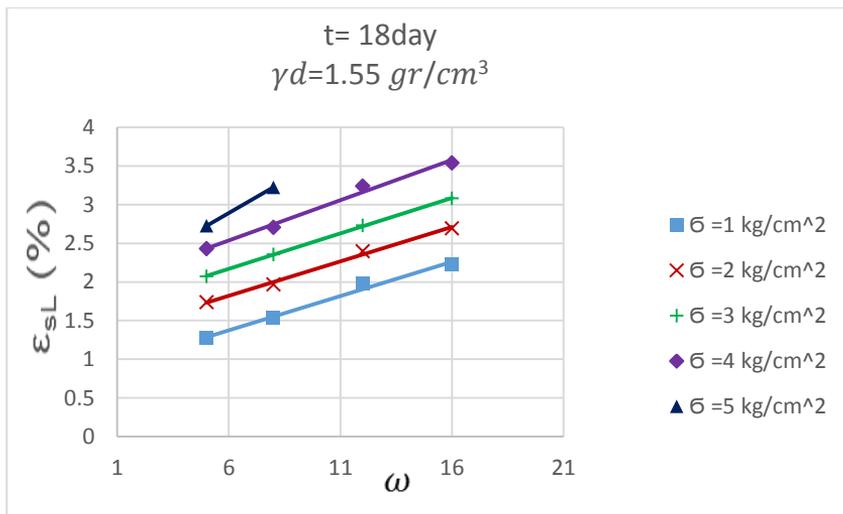
الشكل (31) تحديد ثوابت الزحف μ, χ عند زمن (t=3day)



الشكل (32) تحديد ثوابت الزحف μ, χ عند زمن (t=9day)



الشكل (33) تحديد ثوابت الزحف μ, χ عند زمن (t=11day)



الشكل (34) تحديد ثوابت الزحف μ, χ عند زمن (t=18day)

الجدول (4) قيم ثوابت الزحف μ, χ الواردة في العلاقة (6)

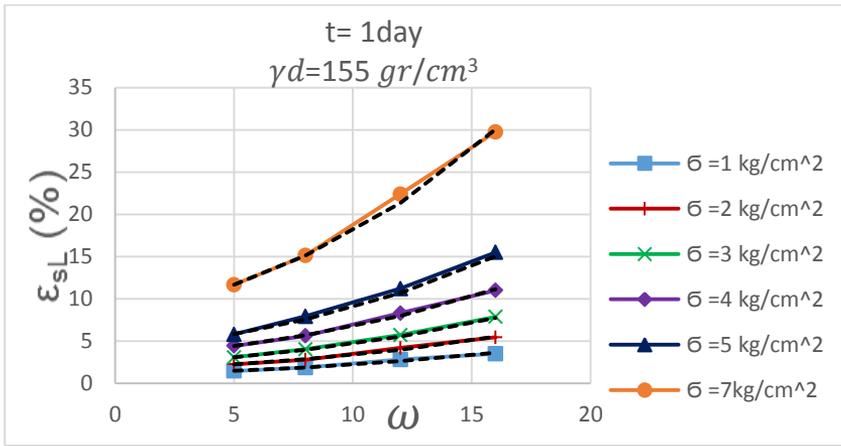
$t = 1\text{day}$		$t = 3\text{day}$		$t = 9\text{day}$		$t = 11\text{day}$		$t = 18\text{day}$	
μ	χ	μ	χ	μ	χ	μ	χ	μ	χ
0.975	0.082	1.27	0.082	1.81	0.086	1.95	0.087	2.33	0.088
1.486	0.082	1.95	0.084	2.807	0.087	3.01	0.087	3.6	0.088
2.02	0.084	2.67	0.086	3.88	0.087	4.177	0.088	5.5	0.089
2.9	0.084	3.84	0.086	5.56	0.088	5.9	0.088	7.5	0.095
3.8	0.086	5.06	0.087	7.5	0.089	7.95	0.095	8.1	0.14
7.6	0.086	10.1	0.088	15.2	0.089	16.5	0.095	-	-

حيث $\ln \mu$: يمثل نقاط المستقيمات مع محور الترتيب.

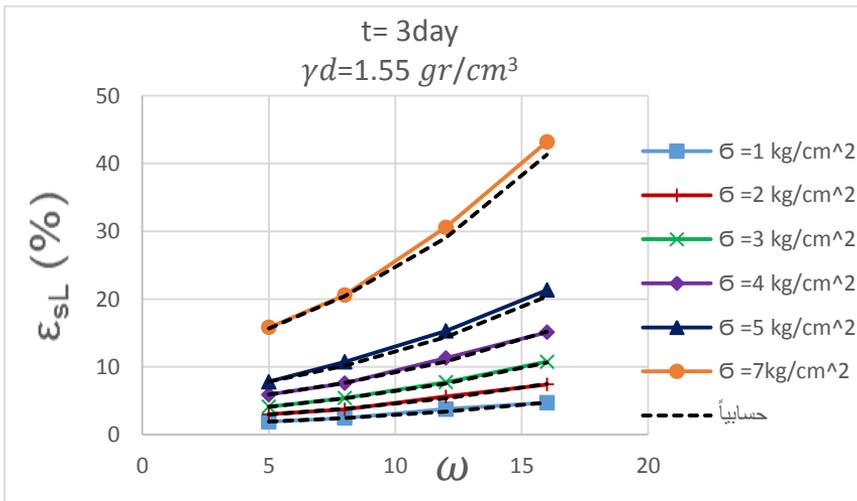
χ : ميل المستقيمات.

نلاحظ من الجدول (4) أن قيمة العامل (χ) تتراوح ضمن المجال (0.1-0.082) أما قيمة العامل (μ) تتزايد بزيادة قيمة الإجهاد المطبقة وبزيادة الزمن.

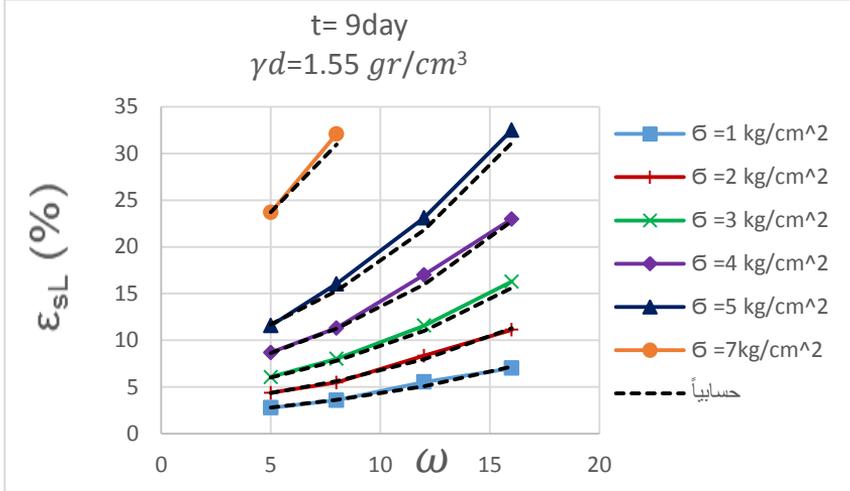
تمت المقارنة بين القيم التجريبية لتشوهات مع الزمن للتربة الانخفاسية والقيم النظرية لهذه التشوهات والمحسوبة من العلاقة (6). إن تقارب المنحنيات التجريبية والحسابية يعطي موثوقية جيدة للعلاقة المقترحة، تبين الأشكال التالية (35,36,37,38,39) المقارنة بين القيم التجريبية والقيم النظرية الحسابية.



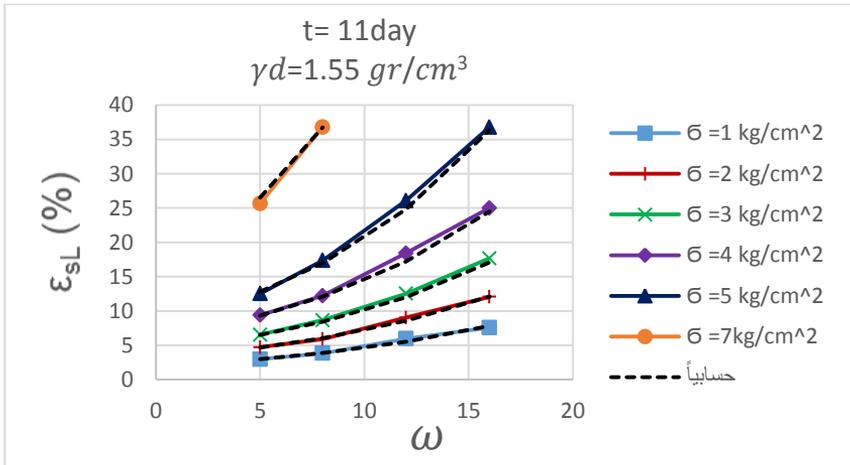
الشكل (35) القيم المخبرية والحسابية للتشوهات عند زمن (t=1day)



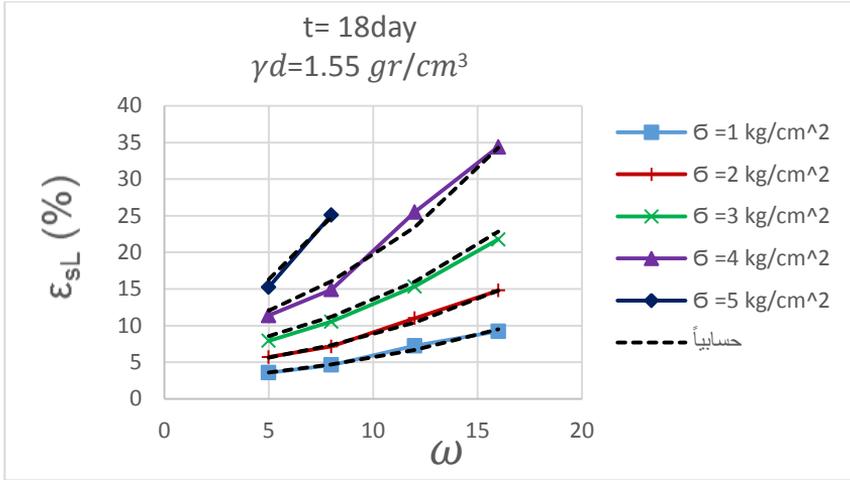
الشكل (36) القيم المخبرية والحسابية للتشوهات عند زمن (t=3day)



الشكل (37) القيم المخبرية والحسابية للتشوهات عند زمن (t=9day)



الشكل (38) القيم المخبرية والحسابية للتشوهات عند زمن (t=11day)



الشكل (39) القيم المخبرية والحسابية للتشوهات عند زمن (t=18day)

3-4 المعادلة العامة لتشوه الترب الانخفاسية مع الزمن

لقد وجدنا من دراستنا السابقة أن تشوهات مع الزمن للترب الانخفاسية تتعلق بعدة عوامل منها الإجهاد المطبق على العينة ومحتوى الرطوبة البدائي للعينة، تم دراسة هذه العوامل واستنتاج صيغة رياضية يُعبر عنها بالعلاقة التالية:

$$\varepsilon = f(\sigma, t, \omega,) \dots \dots \dots (8)$$

وبحسب التجارب التي أجريت فإن جميع توابع العلاقة سبق وتم تحديدها وبناءً عليه فإن المعادلة (8) تأخذ الشكل:

$$\varepsilon_{sl} = v * e^{\mu * \omega} * e^{\kappa * \sigma} * (1 + t)^{\alpha} \dots \dots \dots (9)$$

تم أخذ أفضل القيم للمعاملات μ, κ, α من الجداول السابقة والتي تناسب جميع المنحنيات:

$$\mu = 0.082, \kappa = 0.345, \alpha = 0.445$$

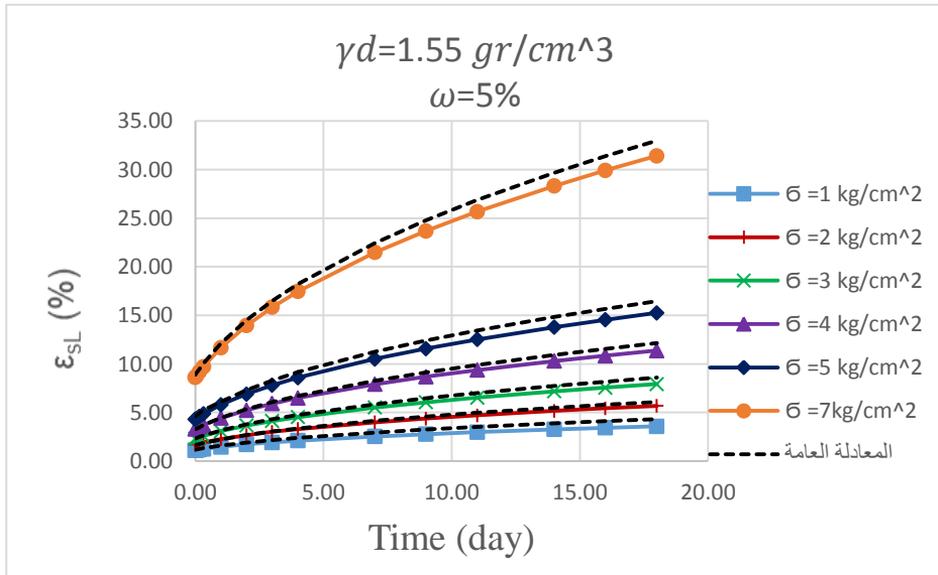
أما الثابت v هو ثابت تجريبي يتعلق بالوزن الحجمي الجاف للعينة = 0.546

t : الزمن باليوم.

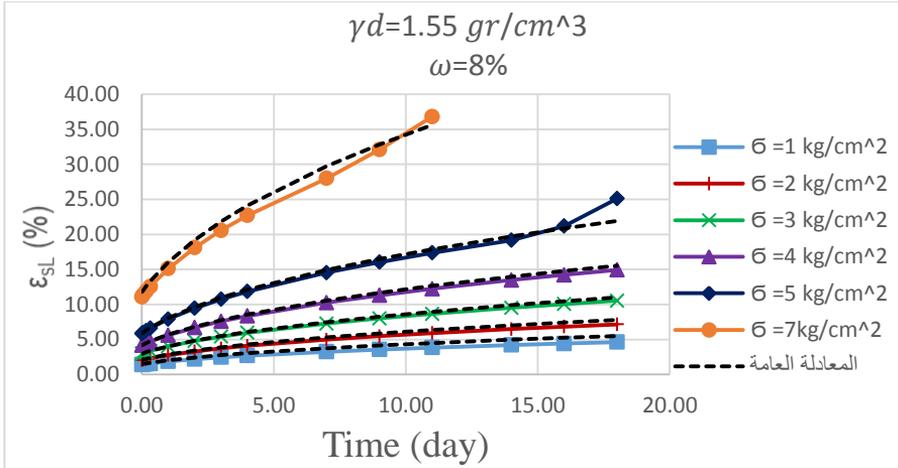
σ : الإجهاد المطبق kg/cm^2

ω : محتوى الرطوبة للعينة.

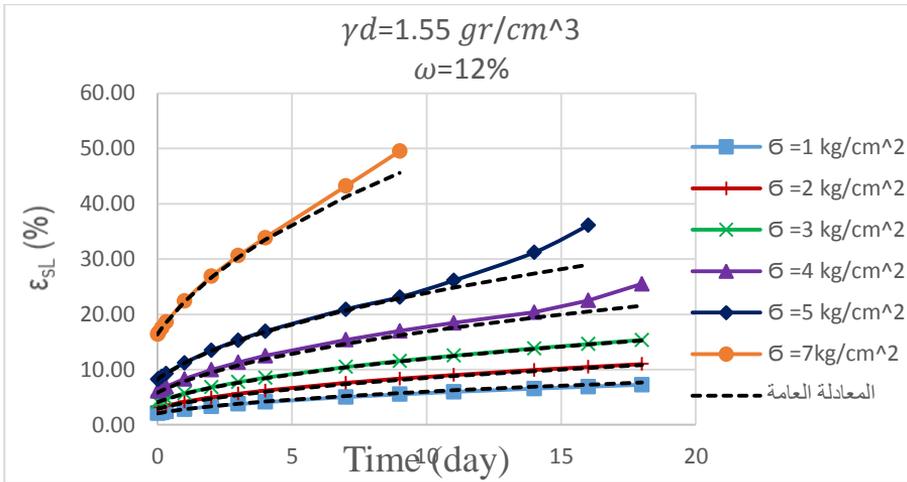
يرسم قيم التشوه مع الزمن والنتيجة عن المعادلة (9) ومقارنتها مع القيم التجريبية للتشوه، يمكن ملاحظة التقارب الكبير بين المنحنيات والتي تبينه الأشكال (40,41,42,43) حيث لم يتعدى الفارق بين القيم التجريبية والنظرية للتشوه كحد أقصى (2%) مما يعطي درجة عالية من الموثوقية للعلاقة المقترحة ويمكن أن نعتبر أن المعادلة (9) توصف بدقة جيدة سلوك الزحف للتربة الانخفاسية ضمن مرحلتي الزحف الابتدائي ومرحلة الزحف المستقر فقط.



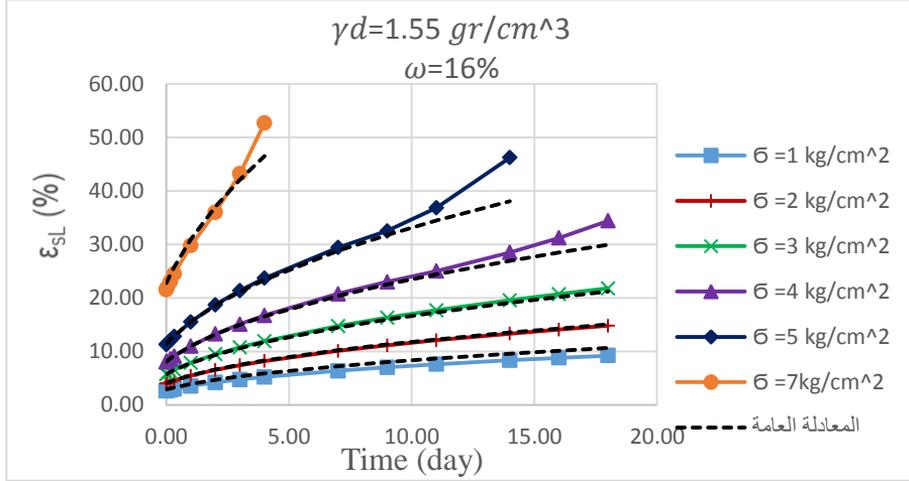
الشكل (40) القيم المخبرية والحسابية للتشوهات مع الزمن من أجل رطوبة $\omega = 5\%$



الشكل (41) مقارنة بين القيم المخبرية والحسابية للتشوهات مع الزمن من أجل رطوبة $\omega = 8\%$



الشكل (42) مقارنة بين القيم المخبرية والحسابية للتشوهات مع الزمن من أجل رطوبة $\omega = 12\%$



الشكل (43) مقارنة بين القيم المخبرية والحسابية للتشوهات مع الزمن من أجل رطوبة $\omega = 16\%$

4. النتائج والتوصيات:

1. تحت تأثير إجهاد ثابت تزداد قيمة التشوهات بزيادة الزمن وقد تم استنتاج صيغة رياضية تعبر عن هذه العلاقة، المعادلة (3).
2. استنتاج صيغة رياضية توضح تأثير الإجهاد المطبق على تشوهات الزحف في التربة الانخفاسية وتم التعبير عنها بالعلاقة (5).
3. تؤثر رطوبة التربة الانخفاسية على تشوهات الزحف الحاصلة في التربة وقد تم التعبير عن هذا التأثير بالعلاقة (6).
4. استنتاج صيغة رياضية توصف تشوهات الزحف في التربة الانخفاسية تأخذ بعين الاعتبار جميع العوامل المؤثرة على هذه التشوهات (الزمن، الإجهاد المطبق،

الرطوبة) كما هو موضح في العلاقة (9) وقد أعطت هذه العلاقة تقارباً بين قيم التشوهات المحسوبة من هذه الصيغة وبين القيم المخبرية مما يعطي موثوقية لهذه الصيغة.

5. نوصي بإجراء دراسة حول تغير تشوهات الزحف للتربة الانخفاسية بتغير الوزن الحجمي الجاف.

6. نوصي بدراسة تأثير الروابط بين الذرات على تشوهات الزحف من خلال إجراء تجارب على عينات سليمة من التربة وعينات مخربة البنية.

7. نوصي بتقييم نتائج تشوهات الزحف في التربة الانخفاسية التي حصلنا عليها باعتماد نماذج رياضية موضوعة (نموذج سنيغ - ميتشل، ونظرية الزحف المتوارث الخطية) ومقارنتها مع النموذج الرياضي الذي قمنا باستنتاجه.

References:

1. **LONG Jian-hui 2010** " Creep property of soil in sliding zone of loess landslide.
2. **Furong Yan and Xiaodan Yue 2019** " Analysis on Creep Characteristics and Microscopic Mechanism of Loess Q2 "
3. **Xie X., Zhao F. S. & Wang D. H. 2009.** Nonlinear rheological model for Q2 loess in Xi'an region. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*. 29(5): 41-46
4. **Zhao Duan and Jianbing Peng 2016** " An Experimental Study on Creep Characteristics of Q2 Loess in the Guanzhong Area of China "
5. **WANG Song-he, LUO Ya-sheng 2009**" Experimental study on creep characteristics of loess under complex stress"
6. **Fan, X., Xu, Q., Scaringi, G., Li, S., Peng, D., 2017.** A chemo-mechanical insight into the failure mechanism of frequently occurred landslides in the Loess Plateau, Gansu Province, China. *Eng. Geol.* 228, 337-345.
7. **ASTM.D. 4318-93**, Standard Tests Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils.
8. **Barnes, H.A., Hutton, J.F., Walters, K.1989.** An introduction to rheology,Rheology series, Amsterdam, Elsevier, Netherlands,199 p
9. **Zhao X. M., Duan Z. & He Q. F. 2012.** Triaxial test on the creep characteristics of Q2 loess in Yan'an. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*. 29(11): 77-81.
10. **Zhu C. H., Li N. & Liu J. P. 2011.** Research on the creep behavior of compacted Q3 MaLan loess. *Journal of Xi'an University of Technology*.
11. **Luo, H., Wu, F., Chang, J., Xu, J., 2018.** Microstructural constraints on geotechnical properties of Malan Loess: A case study from Zhaojiaan landslide in Shaanxi province,China. *Eng. Geol.* 236, 60–69.

12. **Xingang Wang, Jiading Wang 2019** "Moisture content effect on the creep behavior of loess for the catastrophic Baqiao landslid

