



دراسة أعدت لنيل درجة الدكتوراه في الهندسة المدنية قسم الجيوتكنيك

بعنوان :

دراسة تحليلية و تجريبية لسلوك الترب الغضارية المنتفخة

المعرضة لدورات متكررة من الانتفاخ والتقلص

أعدتها الطالبة :

م. دارين حيدر أحمد

بإشراف :

الأستاذ الدكتور :محمد تقلا

الأستاذ الدكتور : علي العبدلله

مشرف مشارك

مشرف أساسي

فهرس المحتويات

ا. كلمة شكر

اا. ملخص البحث باللغة (العربية)

ااا. ملخص البحث باللغة الانكليزية .

الفصل الأول :المقدمة

3	1-1-مدخل
3	2-1 مشكلات التربة المنتفخة
5	3-1-هدف البحث .
6	4-1-منهجية البحث
7	5-1-مخطط عام للأطروحة

الدراسة المرجعية

الفصل الثاني:

التربة المنتفخة وأسباب الانتفاخ

8	2-1- مقدمة
8	2-2- مفهوم الانتفاخ وآليته
8	2-2-1- أسباب سلوك التربة المنتفخة
11	2-3- أنواع الترب المنتفخة وانتشارها
11	2-3-1-الغضار المعدني:
11	2-3-1-1مونتمورلاينيت
12	2-3-1-2 الكاولينيت

13	2-3-1-3 الإيليت
13	2-3-2- التربة المنتفخة في سورية
15	2-4- دراسة مرجعية للطرق التجريبية لدراسة التربة المنتفخة المعرضة لدورات متكررة من الانتفاخ والترطيب
31	2-5- دراسة مرجعية للطرق التحليلية لدراسة التربة المنتفخة المعرضة لدورات متكررة من الترطيب والتجفيف :

الفصل الثالث الدراسة التجريبية

47	3-1- دورات الانتفاخ والتقلص
47	3-2- تطبيق دورات الانتفاخ والتقلص
48	3-2-1- جهاز التسخين المصمم للتجفيف:
53	3-3- تجارب التربة:
53	3-3-1- نتائج تجارب الخواص الفيزيائية والقرائن المصنفة للتربة
53	3-3- تجارب الخواص الميكانيكية
65	3-3-1- تجربة القص المباشر
68	3-3-2- تجربة التشديد للتربة المدروسة
70	3-4- تطبيق دورات الترطيب والتجفيف

71	3-4-1- دورات الترطيب والتجفيف دون تحميل
74	3-4-2- تطبيق إجهاد 0.5 Kg/cm^2
80	3-4-3- تطبيق إجهاد 1 kg/cm^2
81	3-4-4- تطبيق إجهاد 1.5 kg/cm^2
82	3-4-5- تطبيق إجهاد 2 kg/cm^2
83	3-5- تطبيق دورات الترطيب والتجفيف وفق الرطوبة الأولية:
83	3-5-1- دورات الرطوبة دون تحميل :
84	3-5-2- دورات الترطيب والتجفيف مع تطبيق إجهاد 0.5
84	3-5-3- دورات الترطيب والتجفيف مع تطبيق إجهاد 1 Kg/cm^2
85	3-5-4- دورات الترطيب والتجفيف مع تطبيق إجهاد 1.5 Kg/cm^2
86	3-5-5- دورات الترطيب والتجفيف مع تطبيق إجهاد 2 Kg/cm^2 :
89	3-6- الاستنتاجات

الفصل الرابع الدراسة التحليلية

93	4-1- مقدمة :
----	--------------

94	-4-2-النموذج المستخدم BBM
94	-4-2-1-النمذجة المرنة اللدنة للتربة
95	-4-2-2-التحميل الآيزوتروبي
95	-4-2-3-الإجهاد الصافي الأولي تحميل - تفريغ
96	-4-2-4-المصفوفة المرنة اللدنة في نموذج برشلونة
98	-4-2-5-تأثير الامتصاص على صلابة التربة
99	-4-2-6- البارامترات المطلوبة لنموذج Cam clay
99	-4-2-7-معلمات الصلابة كما هو مستخدم في نموذج Cam Clay
99	-4-2-8-بارامترت قوة القص في نموذج camclay:
102	-4-3-بارامترات نموذج برشلونة Basic Model Barchelona
102	-4-3-1-بارامترات الصلابة المرتبطة بالامتصاص
102	-4-3-2-تنفيذ طريقة العناصر المحدودة
103	-4-3-4-العلاقات الحركية والتوازن

108	4-4-4- التحقق من صحة تطبيق نموذج Barchelona basic model
108	4-4-1- بارامترات نموذج BARCELONA Basic Model
109	4-4-2- ملاحظة حول تجاهل الامتصاص في حساب البلاكسس:
109	4-5- تحقيق المودل المستخدم
110	4-5-1- المودل المستخدم
111	4-5-2- الشروط الطرفية
111	4-5-3- التقسيم بطريقة العناصر المنتهية
112	4-6- تحقيق المودل المستخدم
112	4-6-1- تحقيق النموذج دون تحميل
113	4-6-2- تطبيق إجهاد 0.5 Kg/cm^2
115	4-6-3- تطبيق إجهاد 1 kg/cm^2 :
116	4-6-4- تطبيق إجهاد 1.5 kg/cm^2 :
116	4-6-5- تطبيق إجهاد 2 kg/cm^2 :
120	4-7- تطبيق دورات تغيير الرطوبة
120	4-7-1- دورات الرطوبة دون تحميل
121	4-7-2- دورات الرطوبة مع تحميل $0,5 \text{ kg/cm}^2$

- 122 -4-7-3 دورات الرطوبة 1 kg/cm^2
- 123 -4-7-4 دورات الرطوبة مع تحميل $1,5\text{ kg/cm}^2$
- 124 -4-7-5 دورات الرطوبة مع تحميل 2 kg/cm^2
- 124 -7-8 الاستنتاجات
- 127 5- الفصل الخامس: الاستنتاجات والتوصيات

ملحق الجداول

<u>الجدول</u>	<u>الصفحة</u>
الجدول (1-1) الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للتربة:	<u>65</u>
الجدول (1-2) المعطيات الأولية لتجارب التشديد في تربة الوعر :	<u>68</u>
الجدول (1-3) بارامترات المثال المرجعي المدروس	<u>100</u>

ملحق الأشكال

<u>الشكل</u>	<u>رقم الصفحة</u>
الشكل [1.1] تأثير التربة المنتفخة في شمال لوزيانا على الأساسات والأرصعة	5
الشكل [1.2] المينرلات المعدنية في الغضار	11
الشكل [2.2] حدود أتربرغ للتربة لتحديد الانتفاخ	12
الشكل [3.2] مسح ميكروغرام الكتروني للمونتمورلايت	13
الشكل [4.2] مسح ميكروغرام الكتروني للكاولينيت	14
الشكل [5.2] مسح ميكروغرام الكتروني للإيليت	14
الشكل [6.2] توزع التربة في سورية	15
الشكل [1.3] السلوك الدوري لأنواع من التربة	20
الشكل [2.3] منحنى التقلص -الانتفاخ للتربة خلال دورات الترطيب الكامل - التجفيف الكامل .	22
الشكل [3.3]تغير الارتفاع للعينات عند الترطيب والتجفيف	24
الشكل [4.3]تطور منحنى الانتفاخ -التقلص مع عدد من دورات الترطيب - التجفيف	25
الشكل [5.3]تغير نسبة الانتفاخ للتربة المعالجة بالجير	

26	الشكل [6.3] التشوهات العمودية بتطبيق دورات الترتيب والتجفيف
28	الشكل [7.3] مسح الصور المجهرية الإلكترونية للتربة قبل وبعد الانتفاخ الدوري
29	الشكل [8.3] تنوع المحتوى المائي مع الزمن في التقلص الكلي والجزئي
30	الشكل [9.3] منحنى المحتوى المائي -نسبة المسامية لدورة الانتفاخ - التقلص الرابعة
32	الشكل [10.3] مراحل الانتفاخ
34	الشكل [10.3] مراحل التقلص
35	الشكل [1.4] جهاز الحمل الحراري
38	الشكل [2.4] جهاز التبخر بالضغط
38	الشكل [3.4] جهاز التسخين لحلقة الآدومتر
39	الشكل [4.4] جهاز التبخر بالضغط
40	الشكل [5.4] السخان يحيط بحلقة الآدومتر
42	الشكل [6.4] الحساس الحراري
42	الشكل [7.4] يبين تموضع الحساس والسخان الحراري
43	الشكل [8.4] جهاز التسخين الحراري
43	الشكل [9.4] الحساس الحراري .
44	الشكل [10.4] الحساس الحراري
64	الشكل [1.6] منحنى التدرج الحبي
65	الشكل [3.6] جهاز القص المباشر
66	تجربة حدود أتربرغ [2.6] الشكل
67	الشكل [4.6] تشكل مستوي الانهيار في تجربة القص المباشر .

69	الشكل [5.6] منحنى الانضغاطية .
67	الشكل [6.6] عينة التشديد بعد نهاية دورات الترطيب والتجفيف .
69	الشكل [7.6] منحنى دورات الترطيب - التجفيف الأساسي دون تحميل
71	الشكل [8.6] منحنى دورات الترطيب والتجفيف مع إجهاد 0.5 Kg/cm^2
72	الشكل [9.6] منحنى دورات الترطيب والتجفيف مع إجهاد 1 Kg/cm^2
73	الشكل [10.6] منحنى دورات الترطيب والتجفيف مع إجهاد 1.5 Kg/cm^2
74	الشكل [10.6] منحنى دورات الترطيب والتجفيف مع إجهاد 1.5 Kg/cm^2
75	الشكل [11.6] منحنى دورات الترطيب والتجفيف مع إجهاد 2 Kg/cm^2
76	الشكل [12.6] منحنى دورات الترطيب والتجفيف وفق رطوبة 14%
77	الشكل [13.6] منحنى دورات الترطيب والتجفيف وفق رطوبة 21%
78	الشكل [14.6] منحنى دورات الترطيب والتجفيف وفق رطوبة 14%
78	الشكل [15.6] منحنى دورات الترطيب والتجفيف وفق رطوبة 21%
79	الشكل [16.6] منحنى دورات الترطيب والتجفيف وفق رطوبة 14%
80	الشكل [17.6] منحنى دورات الترطيب والتجفيف وفق رطوبة 21%.
81	الشكل [18.6] منحنى دورات الترطيب والتجفيف وفق رطوبة 14%
82	الشكل [19.6] منحنى دورات الترطيب والتجفيف وفق رطوبة 21%
82	الشكل [20.6] منحنى دورات الترطيب والتجفيف وفق رطوبة 14%
83	الشكل [21.6] منحنى دورات الترطيب والتجفيف وفق رطوبة 21%
85	الشكل [22.6] منحنى دورات الترطيب والتجفيف دون تحميل.
86	الشكل [23.6] منحنى دورات الترطيب والتجفيف مع إجهاد 0.5 Kg/cm^2

87	الشكل [24.6] منحنى دورات الترطيب والتجفيف مع إجهاد 1 Kg/cm^2
88	الشكل [25.6] منحنى دورات الترطيب والتجفيف مع إجهاد 1.5 Kg/cm^2 .
89	الشكل [26.6] منحنى دورات الترطيب والتجفيف مع إجهاد 2 Kg/cm^2 .
90	الشكل [27.6] منحنى تشوه الانتفاخ -الحمولة المطبقة.
90	الشكل [28.6] منحنى تشوه التقلص -الحمولة المطبقة
91	الشكل [29.6] منحنى تشوه التقلص -الحمولة المطبقة
95	الشكل [1.7] خط التشديد العادي مع اعتبار الامتصاص -مقياس لوغاريتمي.
95	الشكل [2.7] سطح الخضوع (LC) في المستوى $S-P^*$ في نموذج BBM.
96	الشكل [3.7] سطح الخضوع بوقت واحد LC-SI في نموذج BBM.
96	الشكل [4.7] سطح الخضوع (LC) في مودل BBM.
97	الشكل [5.7] زاوية الاحتكاك في الحالة الحرجة كدالة لمؤشر اللدونة Kulhawy Mayne and (1990).
99	الشكل [6.7] شبكة العناصر المنتهية
102	الشكل [7.7] العلاقة اللوغارتمية بين الحالة الحجمية والإجهاد الحقيقي
103	الشكل [8.7] سطح الخضوع في مودل كام كلاي
104	الشكل [9.7] زاوية الاحتكاك في الحالة الحرجة كدالة لمؤشر اللدونة Kulhawy Mayne and
104	الشكل [10.7] مخطط تدفق الماء في دورات الترطيب والتجفيف
105	الشكل [11.7] المودل المستخدم
106	الشكل [12.7] شبكة العناصر المنتهية
106	الشكل [13.7] مقارنة بين المنحنى التجريبي والعدي

- 109 الشكل [13.7] مقارنة بين المنحني التجريبي والعدد
- 110 الشكل [15.7] مقارنة المنحني التجريبي و العددي لحمولة $P=0.5 \text{ Kg/cm}^2$
- 112 الشكل [16.7] تشوه شبكة العناصر المنتهية مع تطبيق الحمولة.
- 113 الشكل [17.7] مقارنة المنحني التجريبي و العددي لحمولة $P=1 \text{ Kg/cm}^2$
- 114 الشكل [18.7] مقارنة المنحني التجريبي و العددي لحمولة $P=1.5 \text{ Kg/cm}^2$.
- 115 لشكل [19.7] مقارنة المنحني التجريبي و العددي لحمولة $P=2 \text{ Kg/cm}^2$
- 115 الشكل [20.7] عينة التربة عند الانتفاخ.
- 116 لشكل [21.7] عينة التربة عند التجفيف.
- 117 الشكل [22.7] تشوه شبكة العناصر المنتهية عند التجفيف
- 118 الشكل [23.7] تشوه شبكة العناصر المنتهية عند التجفيف بعد 21 يوم.
- 118 شكل [24.7] تغير ضغط الماء المسامي مع الزمن .
- 119 الشكل [25.7] تغير ضغط الماء المسامي مع الزمن
- 120 الشكل [26.7] درجة الإشباع للمودل مع الزمن.
- 120 الشكل [27.7] مقارنة المنحني التجريبي و العددي مع تغير الرطوبة .
- الشكل [28.7] مقارنة المنحني التجريبي و العددي مع تغير الرطوبة .
- 121 الشكل [29.7] مقارنة المنحني التجريبي و العددي مع تغير الرطوبة .
- 122 الشكل [30.7] مقارنة المنحني التجريبي و العددي مع تغير الرطوبة .
- 122 الشكل [31.7] مقارنة المنحني التجريبي و العددي مع تغير الرطوبة .

- 123 الشكل [32.7] مقارنة المنحني التجريبي و العددي مع تغيير الرطوبة .
- 124 الشكل [33.7] مقارنة المنحني التجريبي و العددي مع تغيير الرطوبة
- 124 الشكل [34.7] مقارنة المنحني التجريبي و العددي مع تغيير الرطوبة .
- 125 الشكل [35.7] مقارنة المنحني التجريبي و العددي مع تغيير الرطوبة .
- 125 الشكل [36.7] مقارنة المنحني التجريبي و العددي مع تغيير الرطوبة .

((Analytical and experimental study of the behaviour of expansive clay exposed to several shrinking and swelling cycles))

This research includes an empirical and numerical study of swollen soil subjected to repeated cycles of swelling and shrinkage. The problem of this soil appears when it is moistened and dried, as a result of the volume changes that occur to it, which leads to damages in foundations and engineering structures. Oedometer Experiments were realised by immersing the sample in water to moisten and to dry the sample. A special device was designed that dries the sample at the required temperature and for specified period of time, until the soil reached the equilibrium stage after several wetting and drying cycles. The effect of some factors on the soil behavior such as the applied external pressure and the initial moisture content was studied. A numerical analysis was carried out (using the finite element method) of the impregnated soil used in the experimental study, and we found a good convergence was found between the measurements and the numerical results. Whereas, the Plaxis program was used to analysis model the behavior of swollen soils subjected to multiple cycles of wetting and drying, using Barcelona Basic Model, based on the experimental parameters of the model. As a result, this research presented a method for studying the behavior of swollen soil and the number of cycles needed to stabilize soil deformations in order to avoid their danger to buildings and facilities.

((دراسة تحليلية و تجريبية لسلوك الترب الغضارية المنتفخة المعرضة لدورات متكررة من الانتفاخ والتقلص "

يتضمن هذا البحث دراسة تجريبية وتحليلية لسلوك التربة المنتفخة المعرضة لدورات متكررة من الانتفاخ والتقلص ، وتظهر مشكلة هذه التربة عند ترطيبها وتجفيفها ، نتيجة للتغيرات الحجمية التي تحدث لها مما يؤدي لأضرار في الأساسات والمنشآت الهندسية ، أجريت التجارب على تربة منتفخة من سورية ، حيث طبقت دورات من الترطيب والتجفيف في تجربة الأدومتر ،حتى وصول التربة لمرحلة التوازن بعد عدة دورات ترطيب وتجفيف. وتم دراسة تأثير بعض العوامل على سلوك التربة مثل الضغط الخارجي المطبق ومحتوى الرطوبة الأولية. في مرحلة ثانية تم إجراء تحليل بطريقة العناصر المنتهية لسلوك التربة المنتفخة المدروسة حيث وجد تقارباً جيداً بين كل من النتائج التجريبية والعديدية. وتم استخدام برنامج Plaxis لنمذجة سلوك التربة المنتفخة المعرضة لدورات متعددة من الترطيب والتجفيف وذلك باستخدام موديل برشلونة (Barcelona Basic Model) بالاعتماد على بارامترات النموذج التجريبية، بالنتيجة قدم هذا البحث طريقة لدراسة سلوك التربة المنتفخة وبعدد الدورات اللازمة لاستقرار تشوهات التربة تقادياً لخطورتها على الأبنية والمنشآت.

الفصل الأول

مقدمة:

1-1-مدخل

التربة القابلة للانتفاخ هي التربة التي يتغير حجمها نتيجة تغير المحتوى المائي لها، حيث يزداد حجمها وتنتفخ عندما تمتص الماء، وينقص حجمها وتقلص عندما تجف، وهي مستقرة في حالتها شبه الجافة والجافة، لكنها تصبح غير مستقرة وتبدي تغييرات حجمية ملحوظة عند تعرضها للتربيط بتأثير الماء والتجفيف بتأثير الحرارة، مما يؤثر سلباً على المنشآت الهندسية والأبنية المقامة عليها، وهي منتشرة في مناطق مختلفة في سورية وفي باقي البلدان الأخرى في العالم مثل الصين ، كندا ، الولايات المتحدة الأمريكية ، إسبانيا .

1-2-مشكلات التربة المنتفخة:

التربة المنتفخة تكون مستقرة عندما تكون بعيدة عن تأثير الماء فحين تكون جافة تكون مستقرة ولا تظهر أي تغييرات في الحجم، لكن تسرب الماء إلى التربة و تغيير نسبة الرطوبة بسبب الأمطار، أو التسرب من شبكات أنابيب المياه والصرف الصحي وأقنية جر المياه، والري في الأراضي الزراعية، أو ارتفاع منسوب المياه الجوفية، يؤدي لتغييرات حجمية ملحوظة، وانتفاخ التربة . بشكل مماثل، إذا انخفض محتوى الرطوبة بسبب، سحب المياه الموجودة في التربة من جذور الأشجار، التدفئة المحلية بسبب أنظمة التدفئة المركزية، مثل المراجل والأفران والتجميدات المتعلقة بها، وتبخر المياه نتيجة ارتفاع درجة حرارة الوسط المحيط، تقلص التربة وتبدي أيضاً تغييرات حجمية، كل ذلك يؤدي إلى تغييرات متكررة في حجم التربة المنتفخة مما يسبب ضرراً إنشائياً كبيراً في المنشآت المشيدة عليها أوصمها (1).

ويمكن تلخيص المشكلات الناتجة عن التربة المنتفخة كما يلي:

إن تغير الحجم يؤدي إلى تشوهات في التربة تكون على شكل هبوط بسبب انكماش التربة نتيجة جفافها أو على شكل دفع بسبب انتفاخ التربة نتيجة امتصاصها للماء وزيادة رطوبتها. يؤدي انتفاخ التربة إلى تصدعات وانهيارات إنشائية تتضمن ارتفاع في الأرصفة وتشققات في الأسوار

والشناجات وتشوهات في البلاطات الأرضية وهياكل الأبواب وقد تكون هذه التشوهات خفيفة أو متوسطة أو كبيرة حسب مقدار الانتفاخ.

-إن تغير المناخ الذي يشهده العالم من ارتفاع درجات الحرارة أو انخفاضها أدى إلى تعرض التربة بأنواعها في مختلف المنشآت الهندسية لهذه التغيرات وبالتالي خضوعها لعمليات الترتيب والتجفيف الدورية (2).

- نظراً للاستخدام الواسع للتربة الغضارية حيث تستخدم في نواة السدود ، ومنشآت هندسية متنوعة ، وتشوهات الانتفاخ والتقلص قد تحدث في التربة المحيطة بأساسات التربة المنتفخة بسبب الترتيب والتجفيف الدوري الناجم عن التغيرات الموسمية (3) في مستوى المياه الجوفية ، مما يؤدي لتدمير المباني والمنشآت الهندسية في مناطق التربة المنتفخة ، فمثلاً عندما تكون التربة المنتفخة تحت الطرق وهياكل الأرصفة وخلال فترات موسم الجفاف الحاد تتقلص التربة ويقل حجمها، وبالتالي تؤدي دورات الانتفاخ و الانكماش إلى حدوث تشققات وتكسير الغطاء الأسفلتي للطرق. تأثير سلوك التربة المنتفخة سئ جداً في هياكل الأساسات والأرصفة والمنشآت، ويؤدي لتشوهات تقاضلية في الأساسات كما في الشكل، [1.1] حيث قدرت الخسائر في الولايات المتحدة بنحو 2.3 مليار دولار في السنة في عام 1972 بسبب التربة المنتفخة ، والتي تجاوزت الضرر المشترك الناجم عن الزلازل (4) (5).



الشكل [1.1] تأثير التربة المنتفخة في شمال لويزيانا على الأساسات والأرصفة (4)

- في المناطق القاحلة وشبه القاحلة في العالم، تختلف كمية الرطوبة وهطول الأمطار إلى حد كبير في مواسم مختلفة، و تتعرض المنشآت مثل المباني الصغيرة والطرق السريعة المبنية على التربة المنتفخة للانتفاخ الدوري ودورات التقلص [6]، تتشكل فيها الشقوق والانهيارات بسبب

انتفاخ الغضار وتقلصه ، كذلك في الطرقات والأرصعة والمباني وأنظمة الري وخزانات وخطوط الصرف الصحي وخطوط المياه[7].

أما في سورية، فقد كان للمنشآت الهندسية المشيدة على التربة المنتفخة نصيب وافر من التأثيرات السلبية لهذه التربة ، وظهرت هذه المشكلة على الابنية السكنية والمصانع المشيدة في مناطق انتشار هذه التربة ، مثلاً في محافظة حمص وريفها ظهرت مشاكل في عدد من المصانع نتيجة هذه التربة، فالمشكلة موجودة وبحضور كبير على الساحة الهندسية لذلك تشكل دراسة هذا النوع من الترب وطرق البناء الآمنة عليها تحدياً مهم.

3-1- الهدف من البحث :

تغطي الترب الإنتفاخية جزءاً مهماً من أراضي الجمهورية العربية السورية يصل إلى حوالي % 10.5 من مجمل مساحة هذه الأراضي [8] ، و يلحظ تواجدها بشكل كبير في المناطق الوسطى والجنوبية.

و غالباً ما يرافق تواجد الترب الإنتفاخية مشاكل في الإنشاء تعود إلى الطبيعة الصعبة لهذه الترب من جهة و إلى نقص الخبرة في التعامل مع هكذا نوع من الترب و استيعاب سلوكها من جهة أخرى.

بإجراء دراسة لبعض المراجع حول الترب الإنتفاخية [9] [10] [11] يمكننا أن نجد عدداً واضحاً من الأفكار لا تزال بحاجة إلى دراسة أعمق و أكثر جدية ،حيث أغلب الدراسات الموجودة حول الترب الغضارية المنتفخة قد ركزت بشكل أساسي على دراسة معالجة الآثار السيئة الناتجة عن الانتفاخ في المنشآت والأساسات أو التكيف مع انتفاخ التربة من خلال تصميم أساسات خاصة بهذا النوع من التربة في حين أهملت أو تطرقت بشكل سريع لمسألة تجنب ومنع حدوث الانتفاخ.

لذلك فإن أهمية هذا البحث تنبع من أهمية منع وإبعاد احتمالية حدوث الانتفاخ في التربة الغضارية المنتفخة بأقل تكلفة ممكنة.

يهدف هذا البحث بشكل رئيسي إلى:

- دراسة سلوكية الترب المنتفخة المعرضة لدورات متعددة من الترطيب والتجفيف تجريبياً، ومحاولة الوصول لمرحلة التوازن حيث لا تبدي التربة أي تغييرات حجمية مهما تغيرت نسبة الترطيب والتجفيف حولها.

- تطوير نموذج رياضي مع عدد من المعاملات المحددة لسلوك الانتفاخ والتقلص قادر على محاكاة السلوك الديناميكي (التغيرات الحجمية عند الترطيب والتجفيف والتحميل) للتربة المنتفخة وتغيراتها الحجمية.

- الهدف الأساسي من هذا البحث هو الوصول إلى دراسة سلوكية التربة المنتفخة والتغيرات الحجمية في سلوكها وتطوير نموذج رياضي مع عدد من البارامترات المحددة لسلوك الانتفاخ والتقلص للتربة المنتفخة.

-1-4- منهجية البحث

تتضمن منهجية البحث البنود التالية:

- دراسة مرجعية مكثفة حول التربة المنتفخة وخصائصها العامة.
- برنامج تحريات من عدة تجارب لتحديد خواص التربة المنتفخة يخلص لتحديد نوعية التربة المدروسة.
- تصميم جهاز لتجفيف عينة التربة المدروسة، حيث تم تصميم جهاز يوصل بجهاز التشديد أحادي البعد (الآدومتر) يقوم بتطبيق دورات التجفيف على العينة المدروسة من أجل إيجاد ظروف مشابهة للموقع وتجفيف العينة وفق درجة الحرارة المطلوبة ولمدة الزمنية المطلوبة.
- تنفيذ سلسلة اختبارات تجريبية تشمل تطبيق دورات متعددة من الانتفاخ والتقلص في آن واحد على عينات التربة المنتفخة للوصول إلى مرحلة التوازن بحيث لا تعطي التربة تغيرات حجمية تحت ظروف الترطيب أو التجفيف . وذلك باستخدام جهاز الآدومتر المخبري ، حيث تم تنفيذ التجربة عدة مرات مع تغيير ظروف التجربة ، وذلك لاستنتاج تأثير بعض البارامترات على الانتفاخ والتقلص ، في البداية تم تنفيذ تجربة الآدومتر دون تحميل ، وبعد ذلك تم تطبيق سلسلة دورات الترطيب والتجفيف مع تحميل العينة بعدة حمولات ، ثم طبقت دورات الترطيب والتجفيف مع تغيير قيم الرطوبة البدائية باعتبارها من العوامل المؤثرة على قيم الانتفاخ والتقلص .
- تنفيذ دراسة عددية تحليلية بطريقة العناصر المنتهية للتربة المنتفخة المعرضة لدورات متعددة من الانتفاخ والتقلص، حيث وظفت النتائج المخبرية، ولنمذجة سلوك التربة المنتفخة استخدمنا نموذج برشلونة (BBM) في برنامج Plaxis 2020، من أجل دراسة سلوك التربة المنتفخة ومعرفة عدد الدورات اللازمة للوصول لمرحلة التوازن . بعد معايرة النموذج المستخدم مع النتائج التجريبية ووجدنا تقارب جيد بين المنحنيات مما يعطي مصداقية للنموذج المدروس.

- تنفيذ دورات الترطيب والتجفيف مع تطبيق حمولات متنوعة على عينة الآدومتر تحليلياً ، وكذلك مع تغيير القيم البدائية للرطوبة ، ويخلص هذا القسم لاستنتاج تأثير دورات الترطيب والتجفيف مع الزمن على التربة المنتفخة لمقارنة النتائج للقيم التجريبية .

- استنتاج المنحنيات اللازمة التي تربط بين قيم التشوه النسبي للتربة و عدد الدورات المطبقة خلال الأيام، واستنتاج المعادلات الرياضية التي تحكم هذه العلاقة .

-1-5- مخطط عام للأطروحة :

تتكون الأطروحة من خمسة فصول ، الفصل الأول عبارة عن مقدمة حول مشكلات التربة المنتفخة ، وهدف البحث ، وطريقة اجرائه ، والمخطط العام للأطروحة ، ويمثل الفصل الثاني الدراسة المرجعية ، حيث يبحث في موضوع الانتفاخ والتربة المنتفخة ، ويركز على الدراسات السابقة التي تناولت دراسة سلوكية التربة المنتفخة المعرضة لدورات متكررة من الانتفاخ والتقلص تجريبياً ، ودراسة مرجعية للتربة المنتفخة المعرضة لدورات متكررة من الانتفاخ والتقلص تحليلياً وعددياً ودراسة مرجعية للنماذج التي أعدت لدراسة سلوك التربة المنتفخة تحت دورات الانتفاخ والتقلص، والفصل الثالث يتضمن دراسة مرجعية لآلية تجفيف التربة المعرضة لدورات متعددة من الترطيب والتجفيف ، و شرح مفصل للجهاز الذي تم تصميمه لتطبيق التجفيف على عينة التربة المدروسة دون أن نغير في توضعها وظروف التجربة حيث يوصل مع جهاز الآدومتر المخبري ويقوم بتسخين حلقة الآدومتر وتجفيف العينة لدرجة الحرارة

60° - 70° والمدة المحددة(عشرة أيام لكل دورة)، وذلك لإيجاد ظروف مشابهة للظروف الحقلية التي تتعرض لها العينة، وكذلك يتضمن الفصل الثالث الدراسة التجريبية التي تضمنت تطبيق دورات الترطيب والتجفيف على التربة المنتفخة على مراحل متعددة، يتضمن الفصل الرابع الدراسة العددية والتحليلية حيث تمت نمذجة سلوك التربة المعرضة لدورات متعددة من الانتفاخ والتقلص باستخدام نموذج (Barchelona BASIC MODLE)(BBM)في برنامج Plaxis2020 . ويمثل الفصل الخامس أهم نتائج البحث التي توصلنا إليها نتيجة الدراسة العددية و التجريبية .

الدراسة المرجعية

الفصل الثاني

الانتفاخ والتربة المنتفخة :

1-2 مدخل:

التربة المنتفخة هي التربة التي لديها إمكانية التقلص أو الانتفاخ تحت ظروف الرطوبة المتغيرة. تسمى التربة السلتنية والغضارية التي يزيد حجمها عند الترطيب بالماء بالتربة المنتفخة ، وتتكون هذه التربة من مجموعة عناصر ذات جزيئات مختلفة القياسات بالشكل ويسلك السطح الخارجي ، هذه العناصر تتكون من الغلسبار والميكا والكاولين ، حيث تكسب البنية البلورية والتركيب الكيميائي لهذه العناصر التربة الغضارية خواص مثل التدامج السطحي والتشرب بالماء ، كما أن ظاهرة الانتفاخ تحدث لأنواع مختلفة من المخلفات الصناعية مثل الخبث والرماد ، وبعض أنواع التربة السلتنية التي لا تنتفخ عند التبلل بالماء تنتفخ عند تعرضها لبعض المحاليل الكيميائية[9] فظاهرة الانتفاخ ذات جوانب متعددة وسنركز في بحثنا على التربة الغضارية المنتفخة بالماء.

2-2 مفهوم الانتفاخ وآليته:

تأخذ التربة المنتفخة سلوك ميكانيكي وكيميائي شديد التعقيد عند التأثير المتبادل مع الماء، وتحدث عملية الانتفاخ بشكل عام عند الترطيب غير المتقطع لطبقات التربة الغضارية وهي ناتجة عن ارتباط عمليتين : الأولى ناتجة من آثار امتصاص الرطوبة في فراغات التربة وظهورها بالجزيئات الصلبة للتربة إجهادات شادة سالبة ، أما العملية الثانية فهي ناتجة عن آثار امتصاص الماء إلى الجزيئات المعدنية للتربة ، حيث تكون كثافتها أكبر من الكثافة المتوسطة للتربة وبذلك يكون تزايد التشوهات مع الزمن بسرعة أقل منه في عملية التشرب [12].

1-2-2 أسباب ظاهرة انتفاخ التربة.

وجد الباحثون [13][14] أن غالبية الترب المنتفخة تتكون من المعادن الغضارية من عائلة Smectite (Montmorillonite) و Illite. وتم ربط مقدار الضرر الذي يمكن أن تلحقه التربة

المنتفخة بالبنية التحتية و المنشآت بمقدار الشحنة السالبة الصافية على الوجه بسبب جذب الماء، لذلك فإن التربة التي تحتوي على فلزات غضارية منتفخة حساسة للغاية للتغير الموسمي للرطوبة بسبب هطول الأمطار ، والتبخر من سطح التربة ، و / أو التبخر من النبات و سيكون الخطر الناتج عن التربة المنتفخة هو الأكبر في المناطق ذات المواسم الرطبة والجافة الواضحة [15]. لذلك ، فإن البنية التحتية المنفذة في هذه المناطق ستكون مهياً لمشاكل التربة المنتفخة إذا ما قورنت بالمناطق المعتدلة التي تحافظ على حالة رطوبة التربة بشكل موحد إلى حد ما طوال العام [13].

تلعب الطبقة الأيونية المزدوجة (Double Electric Layer) دوراً مهماً في ميكانيكية الانتفاخ، و هي متكونة من نظام متوازن كهربائياً يتكون من طبقة أيونية موجبة الشحنة متقابلة مع طبقة أيونية سالبة الشحنة، إذ تتجذب الأيونات الموجبة القابلة للتبادل الموجودة في ماء [16] التربة المسامي نحو الشحنات السالبة المتواجدة على سطح حبيبة الغضار ، تلعب هذه الطبقة دوراً مهماً في بعض الخصائص الهندسية للتربة مثل الخصائص الفيزيائية والميكانيكية وخصائص الانتفاخ [9] [17] حيث يقل تركيز الأيونات الموجبة في الطبقة المزدوجة عند الابتعاد عن سطح حبيبة الغضار ، إلى أن يصل إلى تركيز مساوٍ لتركيز الأيونات الموجودة في ماء التربة المسامي .

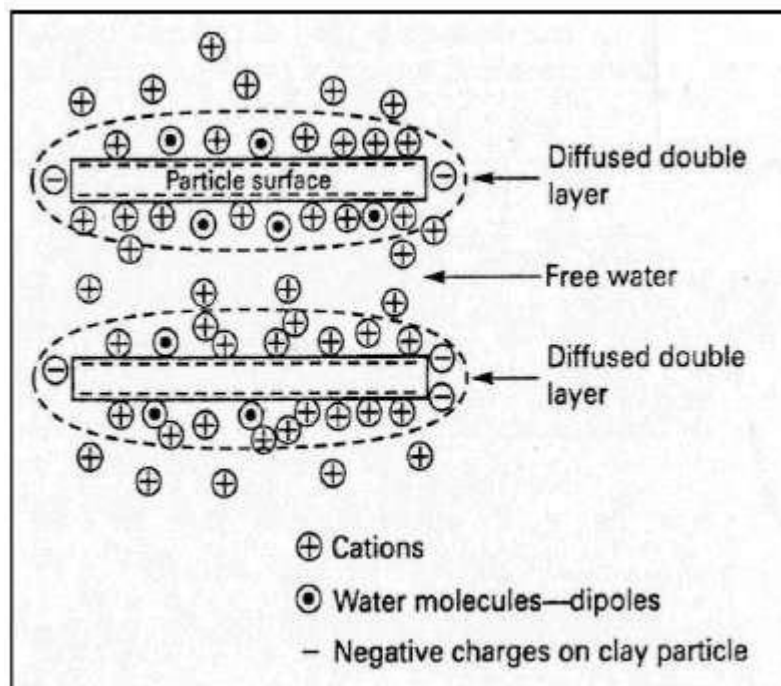
يشكل كل من سطح جزئي الغضار المشحون بالسالب وتركيز الأيونات الموجبة في ماء المسام مايعرف بالطبقة المزدوجة المنتشرة أو DDL ، تداخل DDLs بين جزيئات الغضار تولد قوى طاردة بين الجسيمات أو "ضغوط انتفاخ" ميكروسكيلي ، وبالتالي الانتفاخ المحتمل الذي يزداد كلما زاد سمك (DDL). يرتبط سمك طبقة DDL مع تكافؤ الكاتيونات وتركيز الكاتيونات ودرجة الحرارة ودرجة الحموضة كما يلي .

أ) تأثير تكافؤ الكاتيونات: تؤدي التكافؤات المنخفضة للكاتيونات إلى زيادة سمك DDL. وهكذا ، بالنسبة لنفس معادن التربة ، سيحدث المزيد من الانتفاخ في عينة تحتوي على كاتيونات صوديوم قابلة للتبادل (Na +) مقارنة بعينة تحوي على الكالسيوم (Ca²⁺ + أو المغنيسيوم Mg²⁺) [18].

ب) تأثير تركيز الكاتيونات: يرتبط الانتفاخ الأكبر بتركيزات كاتيونية أقل بالقرب من سطح جزيئات الغضار ويخلق القوة الطاردة بين أنظمة الطبقة المزدوجة المنتشرة بشكل عام، DDL أكثر سمكا ج) تأثير درجة الحرارة: تؤدي الزيادة في درجة الحرارة إلى زيادة سمك DDL لأن الحرارة المرتفعة، وبالتالي تغير درجة الحرارة له تأثير على مقاومة التربة وانضغاطها وانتفاخها [14].

د) تأثير الأس الهيدروجيني: يتأين بشكل إيجابي عند درجة حموضة منخفضة وسالب عند درجة حموضة عالية. ونتيجة لذلك، يمكن أن تتطور طبقات منتشرة إيجابية في حواف بعض الجسيمات

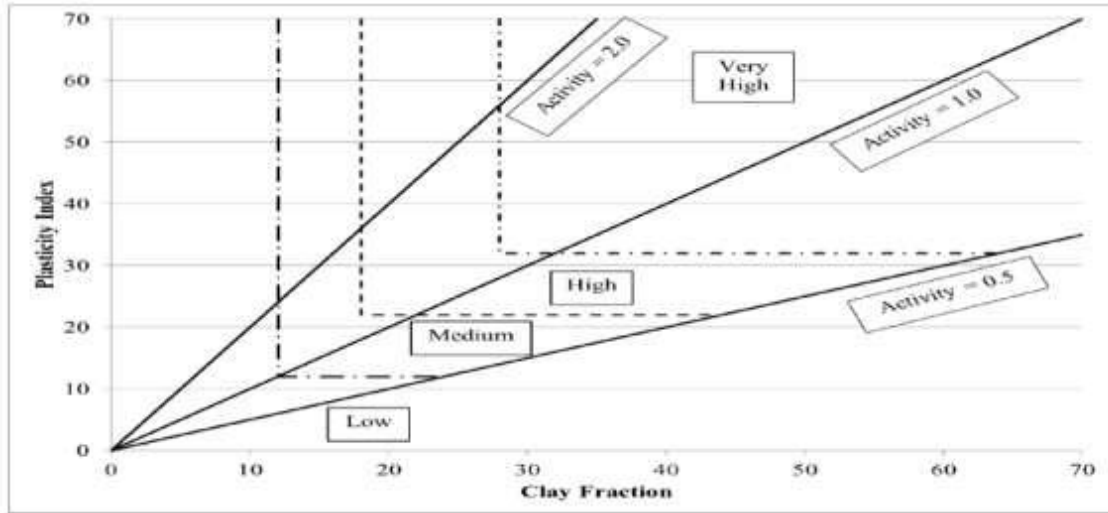
الغضارية في بيئة حمضية تعزز الشكل الإيجابي للتفاعل ، مما يؤدي في كثير من الأحيان إلى مزيد من الجذب [19] الشكل [1.2].



الشكل [1.2] المينرلات المعدنية في الغضار [3]

تشمل أكثر خصائص التربة شيوعاً المستخدمة في تحديد إمكانية انتفاخ التربة حدود أترغ والمحتوى الغروي ومؤشر اللدونة ونسبة الانتفاخ المحتملة ونسبة التقلص ومؤشر التقلص. ومع ذلك ،، بغض النظر عن التصنيفات المحتملة للانتفاخ، فقد وجد أنه بمجرد اعتبار إمكانية الانتفاخ "متوسطة" أو "هامشية" ، فإن احتمال حدوث خطر جيوتقني تكون كبيرة [13].

في عام 1958 ، اقترح [20] منهجية لتصنيف أنواع التربة القابلة للانتفاخ. تستخدم هذه المنهجية النسبة المئوية للغضار (النسبة المئوية المارة من المنخل 0.002mm) ومؤشر اللدونة يظهر في الشكل [2.2] إمكانية الانتفاخ المتعلقة بمؤشر اللدونة وجزء الغضار.



الشكل [2.2] حدود أتربرغ للتربة لتحديد الانتفاخ [20]

في العقود الماضية ، تم تحقيق خطوات كبيرة في تصنيف التربة المنتفخة من خلال إنشاء تقنيات الاختبار وطرق الاختبار للتنبؤ بخصائص الانتفاخ.

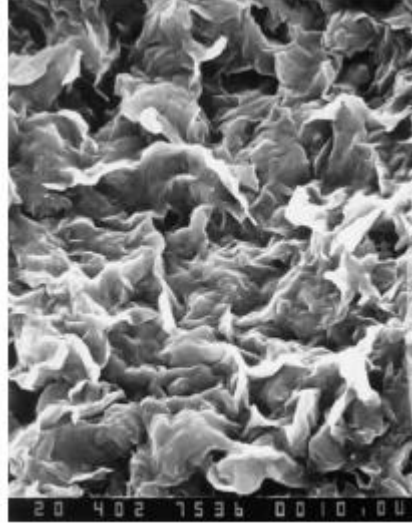
3-2- أنواع الترب المنتفخة وانتشارها

1-3-2- الغضار المعدنية:

ترتبط ظاهرة الانتفاخ بترطيب الغضار ولكن هذا لا يعني بالضرورة أن كل أنواع الغضار يجب أن ينتفخ بالماء [21]. من الناحية الكيميائية المعدنية يمكن تعريف الغضار من خلال النظر في حجم وفئة المعادن. مكونات التربة أصغر من حجم معين ، بشكل عام 0.002mm (2 microm) تشير إلى الغضار في التصنيفات الهندسية. أو كمصطلح من ناحية المينيرالات ، الغضار يشير إلى مينيرالات غضارية محددة تتميز بصافي سلبي بشحنة كهربائية سالبة ، لدونة عند مزجها بالماء ، وحجم جزيئات صغير ، و مقاومة عالية للعوامل الجوية ولدينا ثلاثة أنواع من هذه المعادن :

1-3-2-1- مونت موريلونيت:

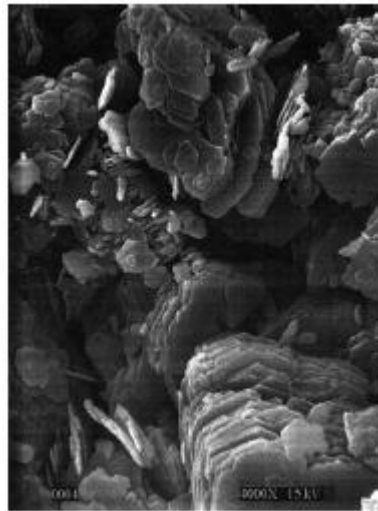
Montmorillonite هو عضو في مجموعة smectite. يتكون في المياه البحرية أو من عوامل التجوية أو من الرماد البركاني في ظروف التصريف السيئة [8]. هيكله الأساسي هو نفسه لعنصر الإليت كما يوضح الشكل [3.2]. إن الرابطة ضعيفة جدا بين الجزيئات المكونة لهذا العنصر يمكن كسرها عن طريق الماء أو غيرها من المحاليل العضوية الموجبة ، وبالتالي له يتمتع بإمكانية انتفاخ كبيرة [21].



الشكل [3.2] مسح ميكروغرام الكتروني للمونتمورالانيت [21]

2-1-3-2 - الكاولينيت :

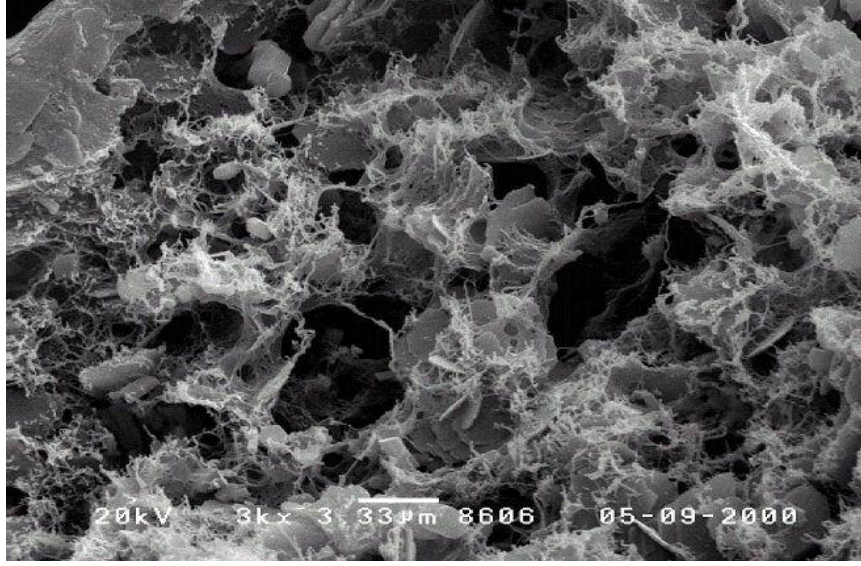
في هذا العنصر يتم الجمع بين ورقة واحدة من السيليكا وورقة واحدة من gibbsite في رابطة هيدروجينية قوية نسبياً لتكوين الكاولينيت الشكل [4.2]، ينتج الكاولينيت الناقلية الهيدروليكية بقيمة أكبر من أو تساوي 6-10cm/sec، كما أن لديها نشاطاً منخفضاً وحداً منخفضاً من السائل إن فصل طبقات الكاولينيت صعب للغاية حيث تتحد بواسطة روابط هيدروجينية قوية ، وبالتالي فهي مستقرة نسبياً ولا يمكن للماء أن يفصل بين هذه الطبقات وكنتيجة لذلك يكون انتفاخ قليل عند الترطيب بالماء [21].



الشكل [4.2] مسح ميكروغرام الكتروني للكاولينيت

3-1-3-2 الإلييت :

لديه البنية الأساسية تتكون من ورق الجبس مدمجة مع ورقتين من السيليكات الشكل [5.2]، الروابط التي تربط الجزيئات المجمعة معًا ضعيف نسبيًا وخاصة عندما يتعرض للترطيب بالمياه، لذلك إن إيليت له خاصية انتفاخ لكن أثره السلبي يكون أقل من غيره [21].

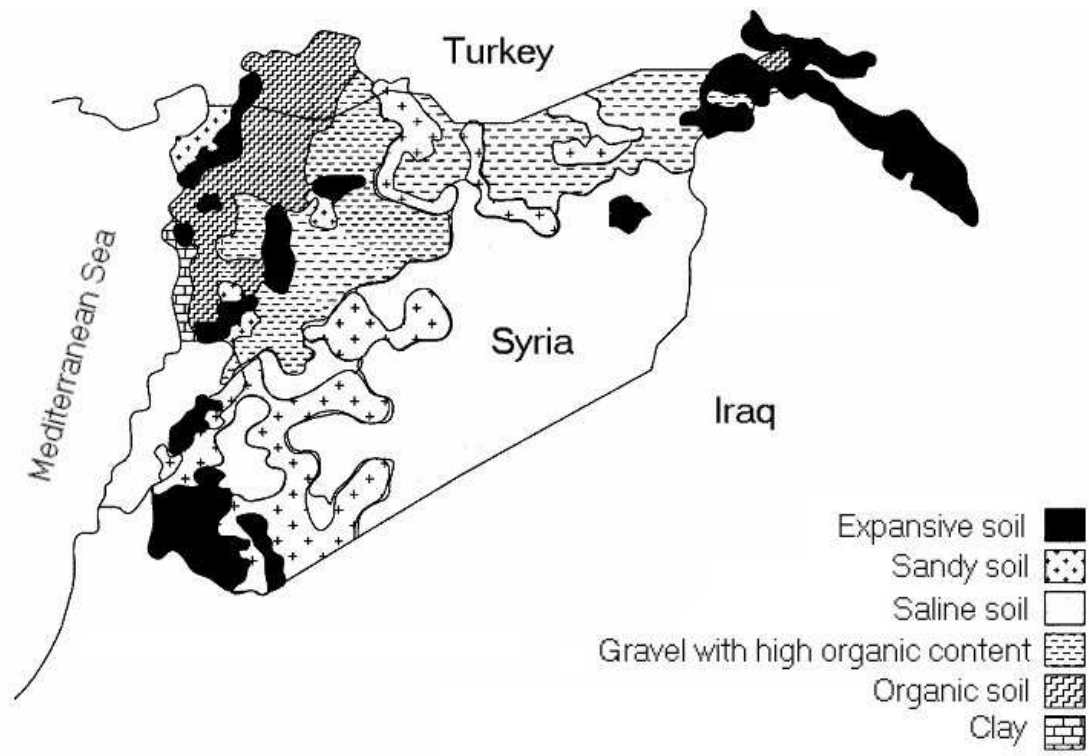


الشكل [5.2] مسح ميكروغرام الكتروني للإلييت

وبالإضافة لذلك توجد عوامل أخرى تؤثر على احتمالية انتفاخ التربة مثل :
العوامل البيئية المؤثرة ، وحالة الإجهادات .

2-3-2- التربة المنتفخة في سورية :

تنتشر التربة الغضارية في أراضي واسعة من الجمهورية العربية السورية كما يوضح الشكل [6.2]، حيث توجد على العتبة الجيولوجيا البازلتيّة الممتدة جنوب البلاد وكذلك العتبة الممتدة ضمن منطقة شمال شرق سورية [22] .



الشكل [6.2] توزيع التربة في سورية

2-3- دراسة مرجعية للطرق التجريبية المستخدمة لدراسة التربة المنتفخة المعرضة لدورات متكررة من الانتفاخ والترطيب :

درس العديد من الباحثين سلوكية التربة المنتفخة، والمعرضة لدورات متعددة من الترطيب والتجفيف تجريبياً وتحليلياً بشكل خاص بهدف تحديد مدى انتفاخ التربة وتأثير دورات الترطيب والتجفيف على الانتفاخ والتقلص ، سنستعرض فيما يلي أهم الدراسات التي تناولت هذا الموضوع بوصف مختصر لكل منها ، وقد لجأنا لهذا الشكل من العرض كون هذه الأبحاث أجريت في شروط خاصة بكل بحث ، على الرغم من التشابه العام للظواهر في خواصها . وفي بداية الدراسة المرجعية من المهم الإشارة إلى أن تطبيق دورات الترطيب والتجفيف يشمل نوعين من التجارب:

- I. اختبارات الغمر والتجفيف : في الاختبارات المنقوعة والمجففة بالتناوب ، يتم قياس المحتوى المائي في عينات التربة مباشرة [23] وبالتالي تحديد مسار الترطيب والتجفيف ، من خلال رسم علاقة التغيرات الحجمية مقابل محتوى الماء .
- II. الاختبارات الدورية التي يتم التحكم فيها بالامتصاص : في هذه الاختبارات يسمح للعينات بالانتفاخ أو التقلص في حالة توازن محدد مسبقاً للامتصاص المطبق ، وبالتالي فإن مسار الترطيب والتجفيف يتميز عادة بالعلاقة بين الإجهاد والامتصاص . بغض النظر عن الاختلاف في الترطيب الدوري ومسارات التجفيف [24].
- III. انكماش كامل - تقلص كامل: هنا يُسمح للعينات بالانتفاخ حتى اكتمال الانتفاخ الأولي أو عدم ملاحظة المزيد من الانتفاخ، ويجف تماماً أو حتى يصبح محتوى الماء أقل من حد التقلص.

- IV. التقلص الجزئي - الانتفاخ الكامل: يُسمح للعينات بالانتفاخ حتى اكتمال الانتفاخ الأولي أو عدم ملاحظة المزيد من الانتفاخ، وتجفف إلى محتواها الأولي من الرطوبة. أيضاً من الضروري الإشارة إن الاختلاف الأساسي الذي يميز التربة المشبعة عن غير المشبعة هو وجود (الماء، الهواء ، المادة الصلبة ، الغشاء المتقلص) ، فضلاً عن كون ضغط الماء المسامي ذا قيمة سالبة ، تلعب إجهادات المص دوراً رئيسياً في سلوك التربة غير المشبعة وهي ناتجة عن الفرق بين ضغط الماء والهواء ضمن مسام التربة : $S=U_a-U_w$

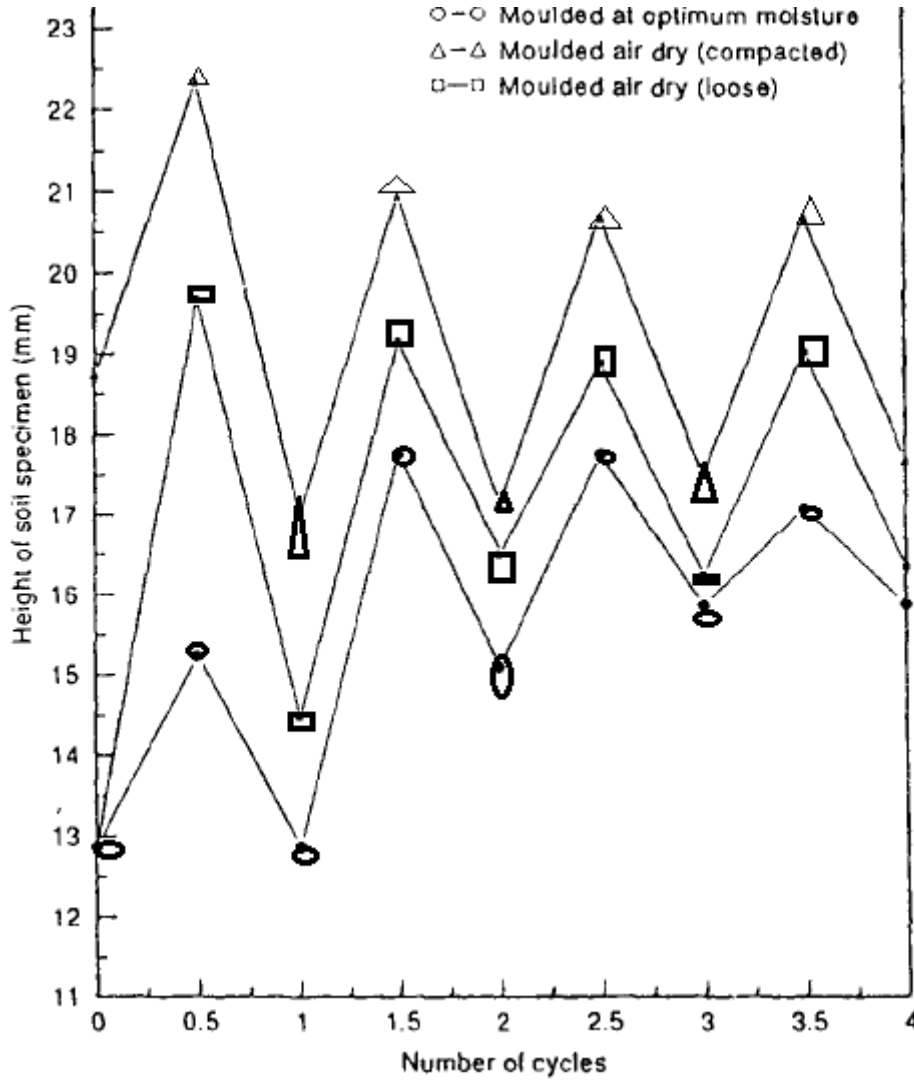
-تناولت أبحاث عديدة دراسة تأثير دورات الترطيب / التجفيف المتعددة على سلوك تغيير الحجم للتربة الغضارية حيث قام [13] بتطبيقها على نوعين من التربة الغضارية المنتفخة باستخدام جهاز

الآدومتر، مع تطبيق حمولات ثابتة لتمثيل الشروط الطبيعية التي تتعرض لها التربة في الموقع، فخلال دورة الترطيب تم تحميل العينة وغمرها بالماء ثم تسجيل التغيرات الشاقولية التي تحدث. فوجد أن التربة المنتفخة تبدي تغيراً إيجابياً في الحجم (زيادة في الحجم أو الانتفاخ) عند إضافة الماء طالما أن الضغط الصافي المطبق لا يتجاوز ضغط العتبة الذي يعرف عادةً باسم ضغط الانتفاخ ، كذلك وجد أن ضغط الانتفاخ قد انخفض بنسبة 77% بعد أن طبق دورات الترطيب والتجفيف بدءاً من الدورة الأولى حتى دورة التوازن الأخيرة للتربة الأولى ، وبنسبة 69% للتربة الثانية ، وإن التغيرات الكبيرة في الإجهادات المتولدة خلال دورات الترطيب والتجفيف تعود إلى الظروف الأولية من الرطوبة و الكثافة الجافة والامتصاص ، كما استنتج أن التربة المنتفخة المضغوطة إذا عرضت لدورة ترطيب واحدة قبل البناء سيكون الانخفاض في قيمة ضغط الانتفاخ بنسبة 66-16%.

وتبين أن عينات التربة المعاد تشكيلها (Remolded) مع زيادة عدد الدورات عند مستويات الإجهاد المنخفضة تنتفخ بشكل كبير مع كل دورة، مما يخلق زيادة كبيرة في الإجهادات على السطح القريب، وعند مستويات الإجهاد المرتفعة، ستتدهار أو تتضغط بشكل كبير مع كل دورة، مما يخلق زيادة كبيرة في إجهاد الانهيار.

-اهتم [1] بدراسة التربة المنتفخة التي تغطي حوالي 20% من إجمالي مساحة الأرض في الهند، نتيجة المعاناة الدائمة من سلوكها الدوري في الانتفاخ والتقلص، تسمى هذه التربة في الهند تربة القطن الأسود، وقد أنجز دراسة مخبرية لهذه التربة لمحاكاة سلوكها الدوري في الترطيب والتجفيف، لفهم سلوك التربة المنتفخة بشكل أفضل (قبل تقييم الانتفاخ تحت ضغوط الأساس المتوقعة). سجل حركة الأساسات والتربة على مدى سنة ولاحظ أن الانزياحات الدورية مرتبطة مع فترات سقوط المطر والتبخر، اعتماداً على العمق من السطح، حيث يحدث فارق زمني للانتفاخ الذي يتناقص مع العمق تبعاً لسقوط المطر وللتقلص مع التبخر.

وقد اكد على ضرورة تحديد نمط التقلص-الانتفاخ في بداية الاختبار، بناءً على مجال الامتصاص أو محتوى الرطوبة مع العمق، إذ إن الانتفاخ الكامل يحدث على الأقل في الطبقات العليا، لكن التقلص الكامل نادراً ما يحدث في الموقع بلا عوائق إلا خلال فترة الجفاف الطويلة، لكن مع العمق ، فإن النمط الأكثر احتمالاً هو الانتفاخ الجزئي والتقلص الجزئي في كل دورة، وتوصل إلى مجموعة من الشروط الأولية في بداية التجارب ستؤدي إلى ثبات في سعة الانتفاخ مع الدورات ($S = 83\%$ درجة الإشباع ، الكثافة الجافة التي تساوي (δ_d^{max}) كما في الشكل [1.3]).



الشكل [1.3] السلوك الدوري لأنواع من التربة (10)

وقد استنتج **Subba Rao** بعد تطبيق عدة دورات من التقلص والانتفاخ أن تشوهات الانتفاخ والتقلص في البداية تكون مختلفة بالشكل والقيمة لكن بعد أربع أو خمس دورات عندما يتم الوصول إلى حالة التوازن (توقف الانتفاخ والتقلص) يصبح المقداران متماثلان، ولا تتأثر إمكانات الانتفاخ الرأسي للتربة المجففة بمحتويات الماء أو الكثافة الجافة، لكن إمكانية الانتفاخ الحجمي تزداد مع زيادة نسبة الفراغ الأولي للتربة.

كما وجد أن الغضار المضغوط المعرض لدورات ترطيب والتجفيف، تكون نسبة الفراغ النهائية مستقلة عن شروط الضغط الأولية.

توافقت نتائج هذه الدراسة مع دراسة أخرى [25] حول تأثير دورات الترطيب والتجفيف على التربة المنفخة، حيث نفذ [25] دراسة تجريبية لتقييم وتقدير تأثير دورات الترطيب / التجفيف المتعددة

على سلوك تغيير الحجم لتريتين مختلفتين من الولايات المتحدة الأمريكية من خلال اختبارات الآدومتر و تطبيق أربعة إجهادات ثابتة تنوعت بين (40% ، و 80% ، و 140% من ضغط الانتفاخ) .

أشارت نتائج الاختبار إلى ظهور تشوهات انتفاخ مرنة عند الضغوط الخفيفة وتشوهات لدنة عند الضغوط الأعلى، ويعود ظهور هذه التشوهات إلى التغيرات في نسبة الفراغ (أي الكثافة الجافة) مع تطبيق الدورات، وصلت التشوهات إلى مرحلة التوازن.

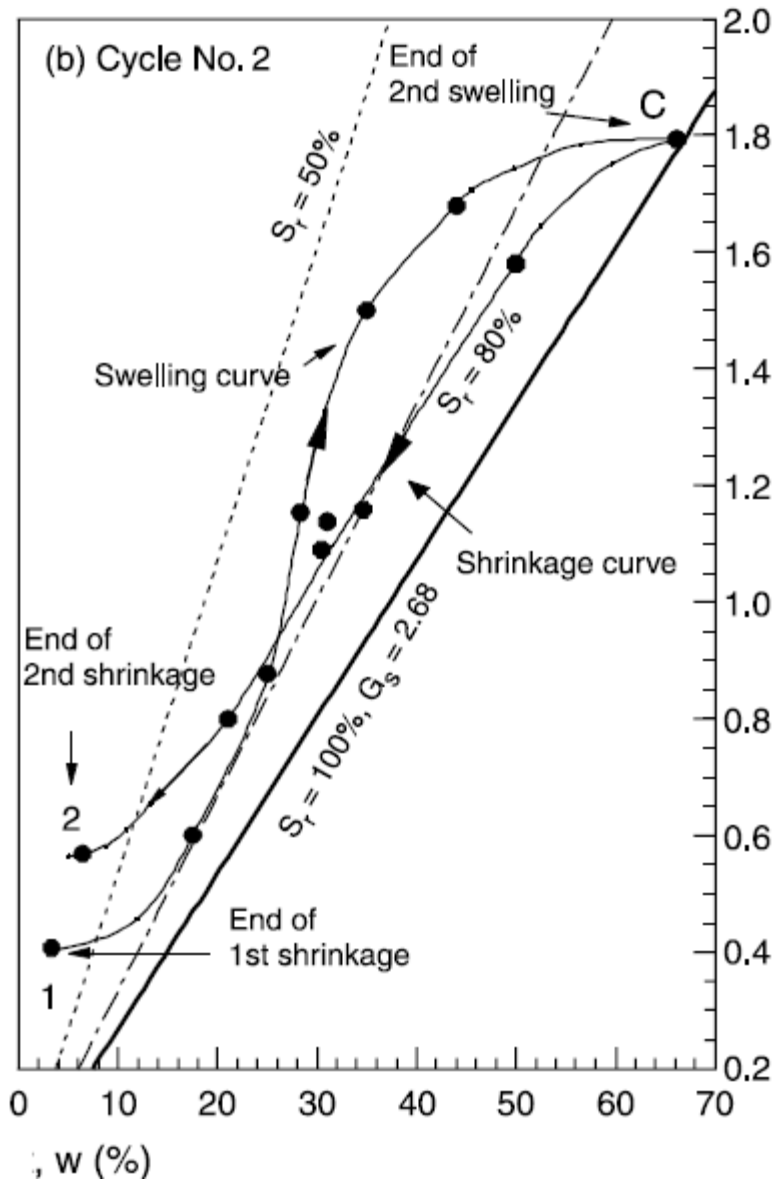
عند مقارنة النتائج المأخوذة من العينات من أجل كثافة جافة معينة لوحظ إن الكثافة الجافة الأولية تتحكم في سلوك الانتفاخ في التربة المنتفخة، والعينات التي تم ضغطها تحت امتصاص أقل أعطت انتفاخاً أقل من العينات التي تعرضت لامتصاص أعلى، إضافة إلى تأثير محتوى الرطوبة الأولي، ومقدار الرص الذي تعرضت له التربة في البداية .

كان واضحاً من النتائج أن منحنى الانتفاخ / الانهيار أخذ منحى غير خطي عند تطبيق ضغط منخفض، وانخفضت قيمة ضغط الانتفاخ مع تكرار الدورات، حيث أظهرت التربة الأولى انخفاضاً في ضغط الانتفاخ بنسبة 20 % على الأقل بعد دورة الترطيب / التجفيف الأولى؛ بينما أظهرت تربة كولورادو انخفاضاً بنسبة 50 % بعد الدورة الرابعة تقريباً وبعد ذلك استقر ضغط الانتفاخ إلى قيمة التوازن.

تبين انخفاض تشوهات الانتفاخ في العينات المضغوطة عند أدنى امتصاص (محتوى مياه أعلى) وذلك عند مقارنة العينات المضغوطة بنفس الكثافة ولكن بمحتوى مائي مختلف.

- نفذ [26] تجارب لدراسة سلوك التربة الغضارية تحت دورات الترطيب والتجفيف، حيث تم اجراء الاختبارات على عينات مضغوطة من نوعين من التربة تحت ضغوط إضافية قدرها 6.25-100Kpa، تم تحديد نسبة الفراغ ومحتوى الماء للعينات في عدة مراحل مع عدد متزايد من دورات الانتفاخ والتقلص، وكان المنحني بالشكل S وقد استخدم لشرح احتمالية تغير الحجم بين التربة ومحتوى الفراغ ومحتوى الماء.

تتمثل الأهمية الأساسية لمنحني الانتفاخ والتقلص في توفير المعلومات المتعلقة بتغيير نسبة الفراغ الذي قد يحدث لتغيير معين في محتوى الماء لأي نمط انتفاخ - انكماش محتمل.



الشكل [2.3] منحنى التقلص - الانتفاخ للتربة خلال دورات الترطيب الكامل - التجفيف الكامل [26].

النتائج التي تم الحصول عليها من دراسة منحنى الانتفاخ - التقلص الدوري الشكل [2.3] ومسارات التقلص لعينات التربة المدروسة أظهر ما يلي:

(1) منحنى الانتفاخ والتقلص قابل للعكس من ناحية محتوى الماء ونسبة الفراغ بمجرد وصول العينة إلى حالة التوازن حيث التشوهات الرأسية أثناء الانتفاخ والتقلص متماثلة. وذلك بعد أربع دورات من الانتفاخ والتقلص

-منحنى الانتفاخ والتقلص هو منحنى على شكل حرف S (يمثل ثلاثة مراحل لعينات التربة المعرضة لدورات انتفاخ وانكماش كامل، أما بالنسبة للعينات التي تخضع لدورات انتفاخ كامل

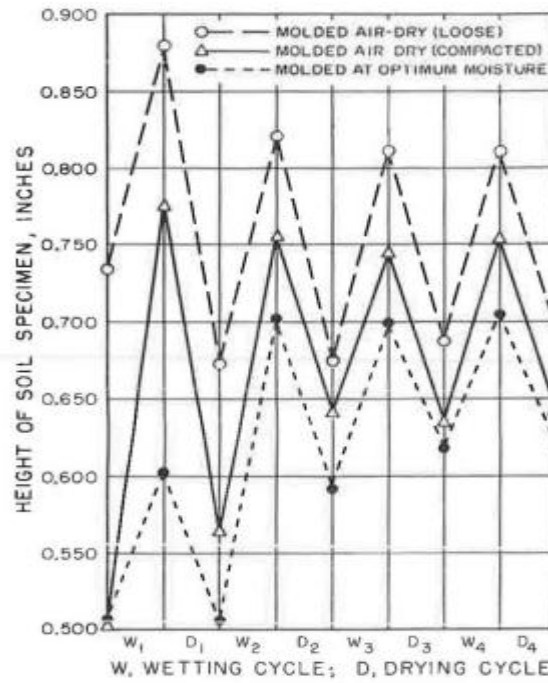
وتقلص جزئي، فيتألف المسار من مرحلتين (أي مرحلة منحنية وطور خطي عادي). يمكن إنشاء منحنيات الانتفاخ والتقلص من خلال الاختبار لعدد محدود من العينات في المختبر.

(3) لم يتأثر منحنى الانتفاخ والتقلص عند الوصول لمرحلة التوازن بالشروط الأولية (أي الكثافة الجافة والمحتوى المائي). المنحنيات متشابهة مع ضغوط إضافية مختلفة.

(4) حوالي 80% من إجمالي التشوه الحجمي وحوالي 50% من إجمالي التشوه الرأسي حدث في الوسط

من المنحنى على شكل حرف S كان الجزء الخطي موازٍ لخط التشبع في درجة التشبع 50-80% تحت ظروف التوازن.

- ركز بعض الباحثين على تغيير الظروف الأولية وطريقة التجفيف والترطيب حيث نفذ [27] في مكتب الطرق العامة الأمريكي دراسة لتحديد إمكانية الانتفاخ - التقلص المحتملة في التربة المعرضة لدورات الترطيب والتجفيف، تم استخدام نوعين من الاختبارات: (أ) اختبار تغيير الحجم في جورجيا، تستخدم هذه الطريقة لتحديد تغير الحجم في كل من الانتفاخ والتقلص، يتكون الإجراء من ضغط عينتين متطابقتين، ونقع إحداها في الماء بينما تجفف الأخرى، وبعد ذلك قياس تغير الحجم المرافق للعينتين. وقد وجد أن نتائج معظم إجراءات الاختبار لقياس خصائص تغيير الحجم من التربة تتأثر بحالة الرطوبة الأولية وكثافة عينة الاختبار فقط عند النقع الأول. حيث وجد أن التربة الجافة الكثيفة تنتفخ أكثر من التربة ذات الرطوبة المرتفعة عند نقعها ، والتربة الرطبة تتقلص أكثر من التربة الجافة الكثيفة عندما تجف ، أما الطريقة الثانية فهي (ب) طريقة دورية سريعة تعتمد على تشكيل عينات من التربة بظروف مختلفة من الرطوبة والكثافة الأولية، بعد تشكيل العينات الثلاث تم تطبيق أربع دورات من الترطيب والتجفيف بالتناوب عليها تحت ضغوط إضافية، تم تحديد نسبة الفراغ بعد كل دورة انتفاخ - تقلص ، واستنتج أن تغيرات الارتفاع في العينات أثناء الترطيب والتجفيف هي نفسها بعد أربع دورات كما الشكل [3.2] ، وحتى مستقلة عن الشروط الأولية للتربة.

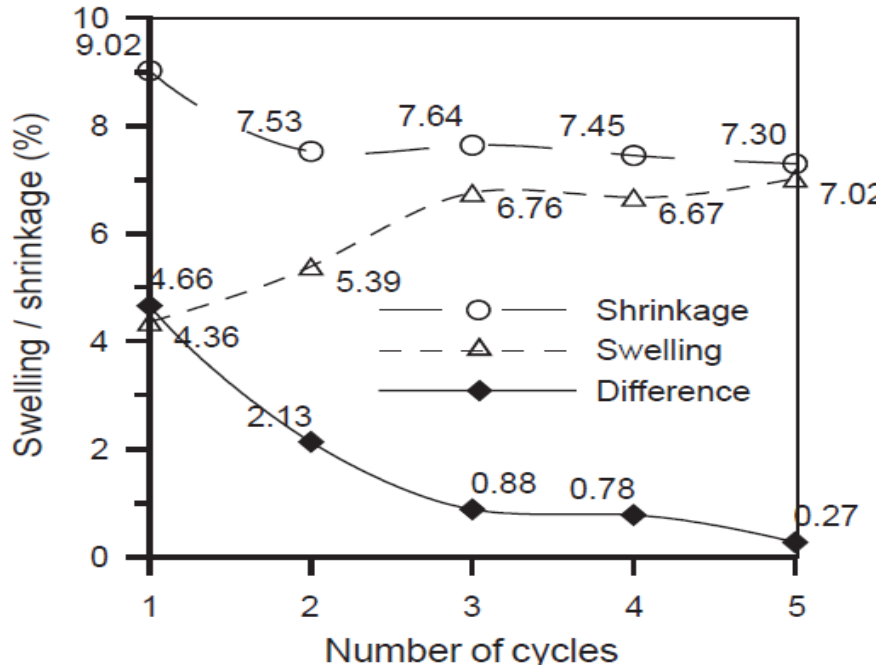


الشكل [3.2] تغير الارتفاع للعينات عند الترطيب والتجفيف [27]

- درس عدد من الباحثين [28] سلوك الانتفاخ - التقلص الدوري للتربة الغضارية المنتشرة بشكل واسع في منطقة لويزيانا الأمريكية، حيث تمت دراسة سلوك التقلص - الانتفاخ على الطبقة الغضارية المنتفخة الواقعة تحت الرصيف، فعند ارتفاع محتوى الرطوبة انتفخت التربة وخلال فترات الجفاف الشديدة تقلصت التربة مما أدى إلى تشقق وتكسير بأساس الطريق، كما استنتج منحنى العلاقة بين محتوى رطوبة التربة المنتفخة المدروسة وإجهاد الامتصاص للتربة، فإذا كان محتوى الرطوبة يتنوع من 10% - 40%، فإن الامتصاص ممكن أن يصل 50,000 kPa، وبالتالي هذا يتسبب في تغيير حجمي كبير في موسم الصيف أو الشتاء، ومن خلال نتائج التجارب تم تشكيل قاعدة بيانات للتربة المنتفخة يتم الاستفادة منها في حال النمذجة العددية ثلاثية الأبعاد لأي بنية تحتية باستخدام طريقة العناصر المنتهية.

- درس عدد من الباحثين [24] تجريبياً باستخدام جهاز الآدومتر السلوك الدوري للتربة الغضارية المستخدمة في المخازن المؤقتة للتخلص من النفايات المشعة حيث تتعرض التربة للتجفيف والترطيب الدوري على مدى الفصول نتيجة لتسرب المياه والتغيرات المناخية الموسمية، استخدم خليط البنتونايت والرمل المحضر صناعياً (80% بنتونايت بالكتلة الجافة) من أجل كثافة جافة أولية معينة، لتحديد أهم الخصائص التي تتحكم في سلوك التربة الدوري، كما تم تطبيق عدة دورات ترطيب وتجفيف مع امتصاص (إجهاد الامتصاص) متنوع على جهاز الآدومتر باستخدام تقنية توازن البخار. وقد وجد أن العينات تعاني من تقلص تدريجي خلال الدورات المتعاقبة من

الترطيب والتجفيف حتى تحدث استجابة مرنة عكوسة، وهذا التقلص التدريجي يؤدي إلى زيادة (OCR) نسبة التشديد الزائد (وهي نسبة ضغط التشديد المسبق إلى الضغط المطبق الحالي) واتفق بالنتيجة مع عدد من الباحثين أنه مع زيادة عدد الدورات تصبح الفروق بين منحنى الترطيب ومنحنى التجفيف أقل مع الزمن حتى تصل لمرحلة تثبت فيها التغيرات ، وتصبح تغيرات التربة وفق منحنى مرّن قابل للانعكاس كما هو موضح بالشكل [4.3].

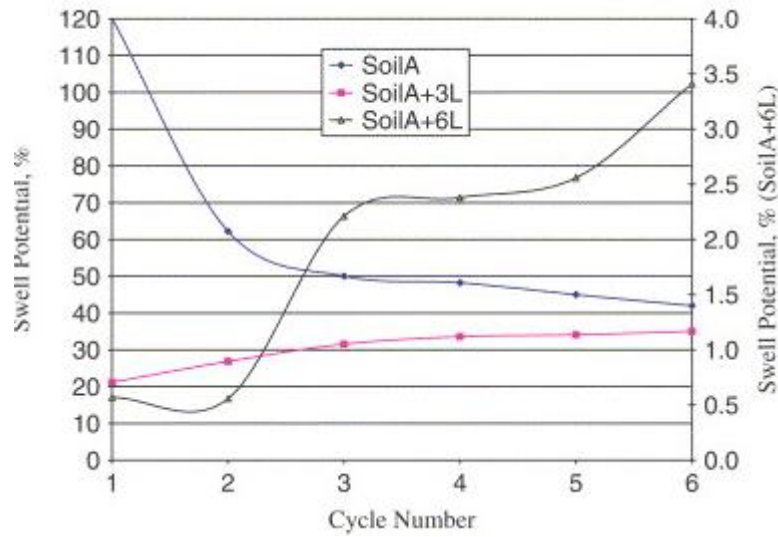


الشكل [4.3] تطور منحنى الانتفاخ -التقلص مع عدد من دورات الترطيب - التجفيف [19]

كما تم إجراء دراسة أخرى بواسطة Rao وآخرون [29] على معالجة الجير للتربة المنتفخة، وتأثير دورات الترطيب - التجفيف الدوري على الانتفاخ، تم التحقق من إمكانات التربة المنتفخة المعالجة بالجير. باستخدام تقلص كامل وانتفاخ كامل، وأشارت نتائج التجارب إلى أن تأثير علاج الجير انخفض جزئياً بعد أربعة دورات ترطيب وتجفيف.

توافقت نتائج هذه الدراسة مع دراسات أخرى [30] أجريت حول تأثير اختبارات الترطيب -التجفيف الدورية لتحديد سلوك التربة الغضارية المنتفخة المعالجة بالجير على المدى الطويل. خلال الاختبارات، كانت العينات تجفف إلى محتوى الرطوبة الأولي ، وتم إجراء الاختبارات على ثلاثة أنواع مختلفة من التربة، ونوعان مختلفان من الجير بنسبة 3% و 6%، ومع تطبيق دورات الترطيب -التجفيف تبين تناقص تأثير الجير في التثبيت والتحكم في إمكانية الانتفاخ للتربة المعالجة جزئياً بالجير وذلك نتيجة أن هذا السلوك ناتج عن الترطيب الدوري والتجفيف الذي يؤدي إلى التدمير التدريجي للتفاعل والترابط بين الجير وجزئيات التربة والانهيال الجزئي للتثبيت بين

الجسيمات. كما لوحظ أن نسبة الانتفاخ زادت بعد عدة دورات من الترطيب والتجفيف الشكل [5.3].



الشكل [5.3] تغير نسبة الانتفاخ للتربة المعالجة بالكلس (30).

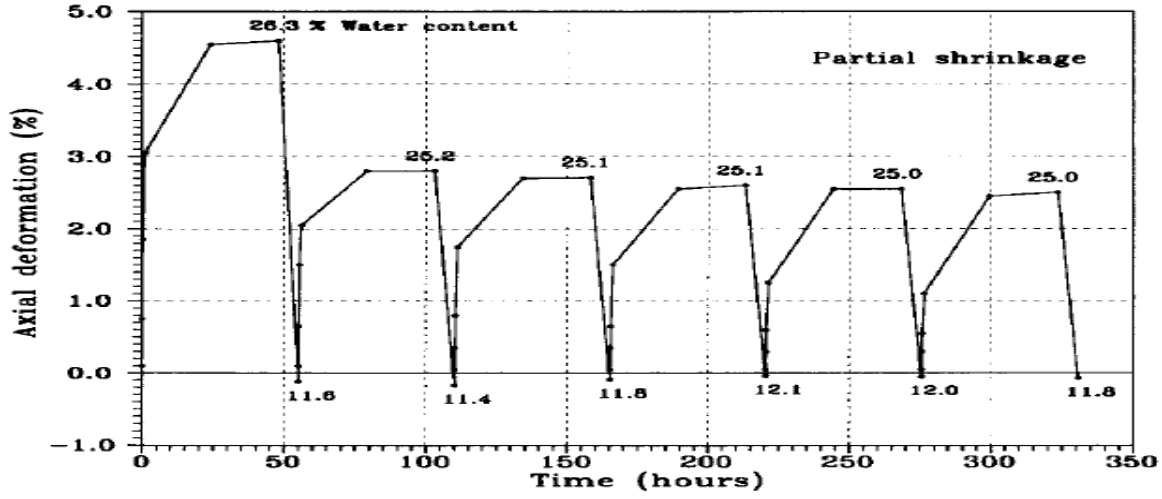
- قام [31] أيضاً بدراسة الخصائص الانتفاخية للتربة التي تعرضت لدورات انتفاخ وتقلص، حيث أجرى الاختبارات على ستة أنواع مختلفة للتربة أخذت من مناطق متنوعة في إربد ذات حد سيولة (65-90%) وحد لدونة (15-40%) وحد تقلص (10-20%)، وباستخدام جهاز الأدومتر حيث طبق الترطيب عن طريق غمر العينة بالماء المقطر لمدة 40 يوم، أما تجفيف العينة فقد تم بتفريغ الماء وتفكيك حلقة الأدومتر لتجفف بالهواء في وسط المختبر، أظهرت النتائج أنه مع زيادة عدد الدورات، ينخفض احتمال الانتفاخ، والدورة الأولى تعطي الحد الأقصى من إمكانية الانتفاخ، وصلت نسبة الانتفاخ إلى التوازن بعد إجراء 4-5 دورات. وأكد المؤلف على تناقص الانتفاخ مع إعادة ترتيب جزيئات التربة والخلاصة أن التربة تظهر تعب بعد كل دورة انتفاخ وتقلص والذي يزداد عند الإجهادات الرأسية وإن هذا السلوك سببه إعادة الترتيب المستمر لجزيئات التربة أثناء الترطيب والتجفيف، مما يؤدي إلى تخامد نشاط جزيئات التربة، وانخفاض القدرة على الانتفاخ بسبب انخفاض امتصاص الماء بالشكل الكافي، أما عينة التربة التي سمح لها بالتقلص والوصول للمحتوى الرطوبي الأولي فإنه لوحظ انخفاض إمكانات انتفاخ التربة بشكل عام عندما تم ترطيبها وتقلصها جزئياً بالتناوب، لكن العينات التي سمح لها بالوصول لحد التقلص أو أقل فإنه لوحظ عندها زيادة في إمكانات الانتفاخ مع تطبيق دورات الترطيب والتجفيف.

- أجرى [32] اختبارات التقلص والانتفاخ الدورية على تربة غضارية حد اللدونة والسيولة عندها بلغ 46% و 24%، على التوالي. تم إجراء اختبارات التقلص الكامل (تجفيف العينات

تحت أشعة الشمس) والانتفاخ بشكل كامل (غمر العينات في الماء المقطر) حيث تم السماح للتربة بأن تجف دون حد التقلص وذلك لتشابه الظروف الحقلية.

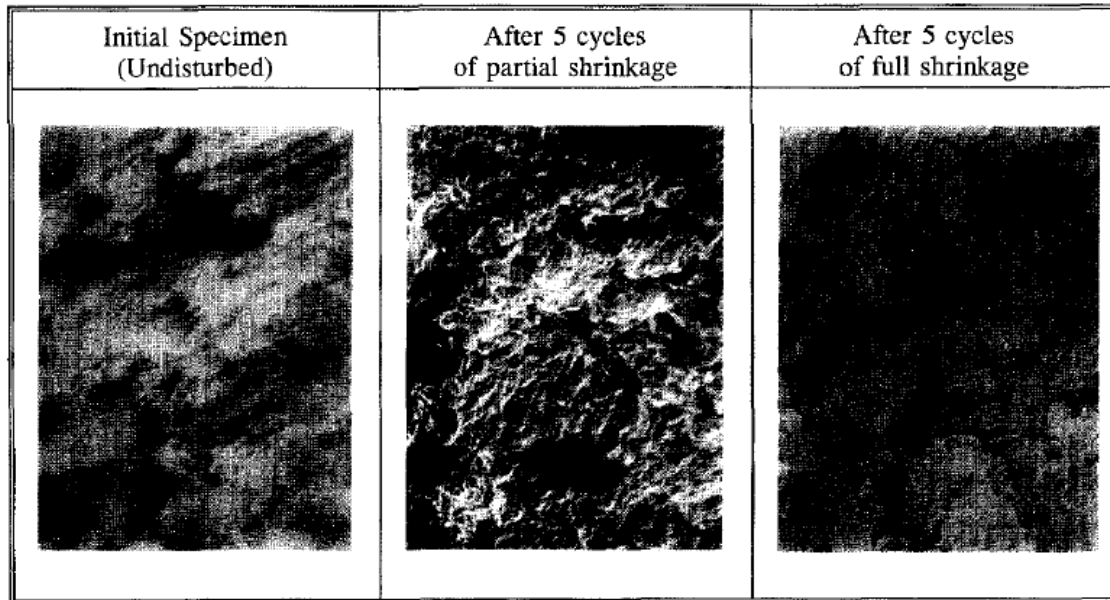
بينت النتائج أن دورات التقلص - الانتفاخ الكامل تسببت في زيادة احتمالية الانتفاخ وتفسر هذه الزيادة نتيجة تدمير هيكل الغضار الملبد وتشكيل تربة أكثر انتفاخ ونفاذية لها هيكل مشتمت ولكن بعد عدة دورات من الترطيب والتجفيف فإن التربة تصل لمرحلة التوازن ولا تعطي تغييرات عند تطبيق دورات الترطيب والتجفيف، وذلك مهما كان تأثير نوع الغضار، والرطوبة البدائية له.

اتفق (32) مع (6) في نتيجة زيادة احتمالية وحجم الانتفاخ بعد التقلص الكامل، حيث درس [6] أربعة أنواع مختلفة من التربة المنتخبة تحت تأثير دورات الانتفاخ - التقلص، و تم تطبيق دورات الترطيب والتجفيف في جهاز الآدومتر، حيث تم ترطيب العينة عن طريق غمرها بالماء لمدة 72 ساعة للوصول للانتفاخ الكامل، أما تجفيف العينة فقد تم بنفريغ الماء من العينات وتفكيك قالب التشديد مع بقاء العينة داخل حلقة الاختبار، و السماح لها بالجفاف والتقلص، حيث تم اعتماد نظامين للتجفيف الأول: تم السماح للعينات بالجفاف هوائياً في المخبر إلى محتواها المائي الأولي وبالتالي التقلص إلى ارتفاعها الأولي. تسمى هذه الطريقة "التقلص الجزئي" ويتم إجراؤها في المختبر بدرجة حرارة الغرفة. أما في النظام الثاني تجفيف العينات في الهواء الطلق حيث تسمح لهم أشعة الشمس بالتقلص بشكل كامل إلى أو أقل من حد التقلص وهو ما يسمى بـ "التقلص الكامل"، بينت نتائج هذه الدراسة زيادة في احتمالية الانتفاخ بعد التقلص الكامل وتناقصه بعد التقلص الجزئي، لكن في كلتا الحالتين ومع زيادة عدد الدورات التربة وصلت لحالة التوازن بعد 4-5 دورات من الترطيب والتجفيف الشكل [6.3]، لاحظ ازدياد محتوى الماء الذي لا يحدث بعده انكماش كبير مع زيادة عدد الدورات وهذا يؤدي لزيادة في حد التقلص الواضح للتربة. وأظهر تحليل المجهر الإلكتروني على العينات أن نسبة الفراغ للعينات التي تعرضت لدورات التقلص الكاملة زادت بينما انخفضت نسبة الفراغ للعينات التي تعرضت لدورات التقلص الجزئي، وفسر ذلك بأن الجزيئات الهيكلية في التقلص الجزئي تتوضع بشكل حافة حرجه بشكل مضطرب بينما في التقلص الكامل تتوضع الجزيئات الغضارية بشكل أفقي متوازي مما يسمح لها بالانتفاخ، وفي كلتا الحالتين مع زيادة عدد الدورات تعرضت العناصر الهيكلية والروابط بينها للاضطراب والتهشم ليصبح النسيج مهشم تقريباً عندما تقترب من الدورة الخامسة ونقل القدرة على امتصاص الماء ويتناقص الانتفاخ.



الشكل [6.3] التشوهات العمودية بتطبيق دورات الترطيب والتجفيف [6]

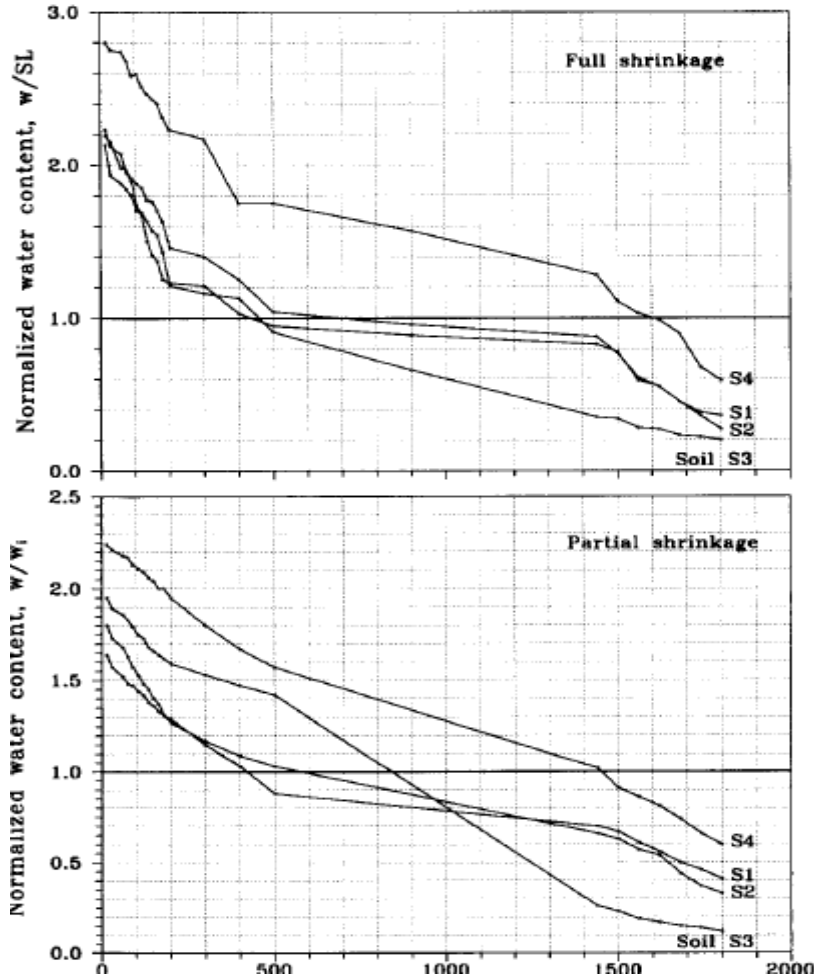
كما وجد أن قيمة وشكل التغيرات الحجمية التي تحدث في كل نوع من الغضار تتأثر بالبنية المجهرية الأولية له و طبيعة الروابط الهيكلية بين جزيئاته الشكل [7.3] ، وأظهر تحقيق الامواج فوق الصوتية أن سرعة الموجة التي تمر عبر العينة التي تقلصت جزئياً تزداد مع زيادة عدد الدورات، في حين تتناقص عندما تنتقل عبر عينة تربة متقلصة تماماً. وقد ارتبط هذا بانخفاض وزيادة في الفراغات الظاهرة في التربة بسبب التقلص الجزئي والكامل الشكل [8.3].



الشكل [7.3] مسح الصور المجهرية الإلكترونية للتربة قبل وبعد الانتفاخ الدوري [6]

بينت نتائج الاختبار انخفاض قدرة الغضار على الانتفاخ، والتي تقابل القدرة على امتصاص الماء، بعد عدة دورات ترطيب وتجفيف جزئي، وزيادة الانتفاخ بعد التقلص بالكامل، لكن بكلتا الحالتين تم

تحقيق التوازن بعد عدة دورات من الترطيب والتجفيف، ومن خلال المسح الإلكتروني للبنية الدقيقة لوحظ تهشم واضطراب للجزيئات الهيكلية بالكامل وازدياده بعد الدورة الخامسة تقريباً مما يؤدي لتقليل نسبة الانتفاخ، وأن نسبة الفراغ تبقى ثابتة بعد الوصول لمرحلة التوازن في تغيير الانتفاخ والترطيب.



الشكل [8.3] تنوع المحتوى المائي مع الزمن في التقلص الكلي والجزئي [6]

درس [33] تأثير الترطيب الدوري على سلوك الانتفاخ للتربة المنتفخة المثبتة باستخدام وسائد الرماد المعالجة بالأسمنت والجير. حيث تم تطبيق دورات التقلص الكامل - الانتفاخ الكامل أثناء الاختبارات. و صمم جهاز أسطواني لتطبيق دورات الترطيب والتجفيف مع تطبيق ضغط مستمر على العينة، وجد انخفاض في إمكانات الانتفاخ في نهاية الاختبارات، وانخفاض احتمالية الانتفاخ مع زيادة سماكة الوسادة و كما أظهرت وسائد الرماد المتطاير المعالجة بالإسمنت انخفاضاً أكبر في الانتفاخ مقارنةً بالوسائد المعالجة بالجير مع زيادة عدد دورات الترطيب والتجفيف، وصلت

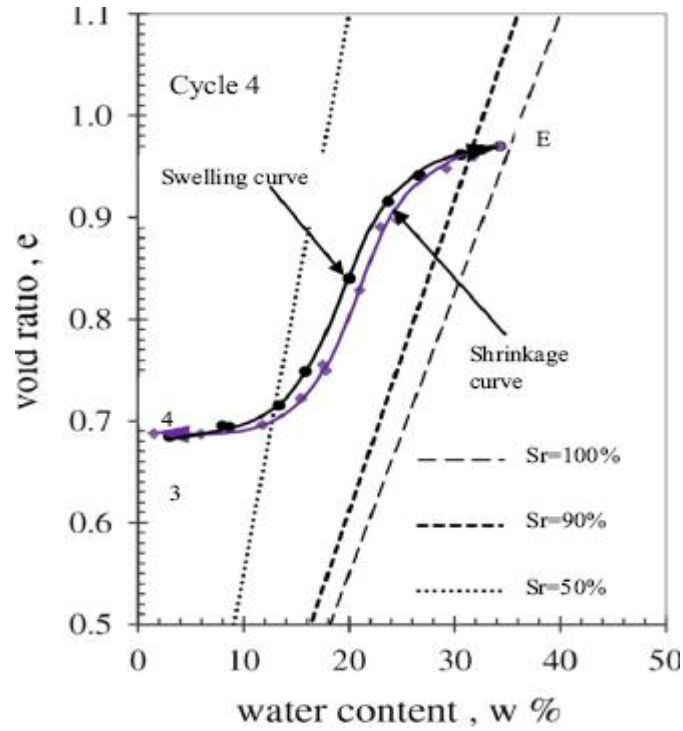
إمكانات الانتفاخ إلى التوازن بعد ثلاث وأربع دورات لوسائد الرماد المتطاير المعالجة بالأسمت والجير ، على التوالي .

- درس [34] تأثير النقل الدوري على عينات الغضار الطبيعي المثبت بفعل السليكا، خلال التجارب تم تطبيق إجراءات النقل الكامل والجزئي. لوحظ تحسن في متانة العينات المعالجة ضد التجفيف في نهاية الاختبارات، أظهرت نتائج التجارب أنه مع زيادة نسبة المثبت، تصل تشوهات الانتفاخ للعينات إلى التوازن بسرعة أكبر.

ووجد [35] أن دورات الترطيب والتجفيف تؤثر بشكل كبير على ضغط التشديد المسبق. أما [36] فقد درس تأثير نسبة الفراغ e على السلوك الهيدروميكانيكي للبتونيت المضغوط من خلال تجارب مع التحكم بالامتصاص، ووجد أن كمية الماء الممتص تعتمد على الامتصاص عند الامتصاص العالي وتعتمد على الامتصاص ونسبة المسام عند الامتصاص المنخفض.

درس [37] وآخرون دورات الانتفاخ والنقل على عينات من التربة المنفخة (الكاولين والبتونايت) في جهاز الآدومتر تحت ضغوط متنوعة ، وتم قياس نسبة المسامية n والمحتوى المائي $w\%$ في مراحل متعددة من التجربة ، واستنتج حدوث تشوهات انتفاخ - تقلص عكوسة بعد أن وصلت العينة لمرحلة التوازن وحدثت نفس التشوهات في مرحلة الترطيب والتجفيف ، واستنتج أن نسيج التربة له تأثير كبير على احتمالية الانتفاخ ، و العينات ذات المحتوى المائي المنخفض البدائي لديها احتمالية انتفاخ أكبر من العينات ذات المحتوى المائي المرتفع في بداية التجربة ، إضافة لوجود انتفاخ وتقلص لا رجعة فيه لعينات التربة تحت ضغوط متنوعة ، وبينت النتائج أنه بعد الوصول لحالة التوازن التشوهات كانت نفسها ومسارات الترطيب والتجفيف (التي تمثل المحتوى المائي ونسبة الفراغات) تكون بشكل منحنى حرف s كما يوضح الشكل [9.3].

وتمت دراسة تأثير التغيير في نمط الانتفاخ- النقل عند [12] حيث وجد أن حالة التوازن التي وصلت لها العينات بعد دورات الترطيب والتجفيف المتعددة كانت مصحوبة بحالة من التعب في الانتفاخ وانخفاض في الإجهاد الحجمي للعينات المعرضة لمقدار تقلص أكبر.



الشكل [9.2] منحنى المحتوى المائي -نسبة المسامية لدورة الانتفاخ -التقلص الرابعة [37]

- من أجل فهم أفضل للافتتران بين تغيرات نسبة الرطوبة في التربة والتشوهات الحجمية المرافقة لها أجرى [38] دراسة تجريبية على نوعين مختلفين من التربة المنتفخة (مشكلة وطبيعية من الموقع) وذلك باستخدام تجربة الآدومتر وتنوع الامتصاص باستخدام تقنية تناضحية، حيث طبقت دورات ترطيب وتجفيف مع ضغوط شاقولية ثابتة خلال دورات الامتصاص، العينات المضغوطة أظهرت تشوهات تقلص متبقية والعينات الطبيعية أظهرت تشوهات انتفاخ متبقية أيضاً. في نهاية دورات الامتصاص، وصلت التشوهات إلى مرحلة التوازن مما يدل على السلوك المرن للعينات. وهكذا يمكننا ربط هذه السلوكيات المرنة بنسيج التربة وخصوصاً المحتوى المجهري للتربة. توافقت نتائج الدراسة [26] مع دراسات أخرى [39] أجريت حول تأثير دورات الترطيب والتجفيف على التربة المنتفخة واستنتج أن منحنيات الترطيب والتجفيف عندما تكون مجتمعة ومتكاملة فإنها تكون بشكل حرف S في حالة التوازن ومن الممكن وصف التغير الحجمي بتغيير نسبة المسامية مع نسبة تغييرات المحتوى المائي.

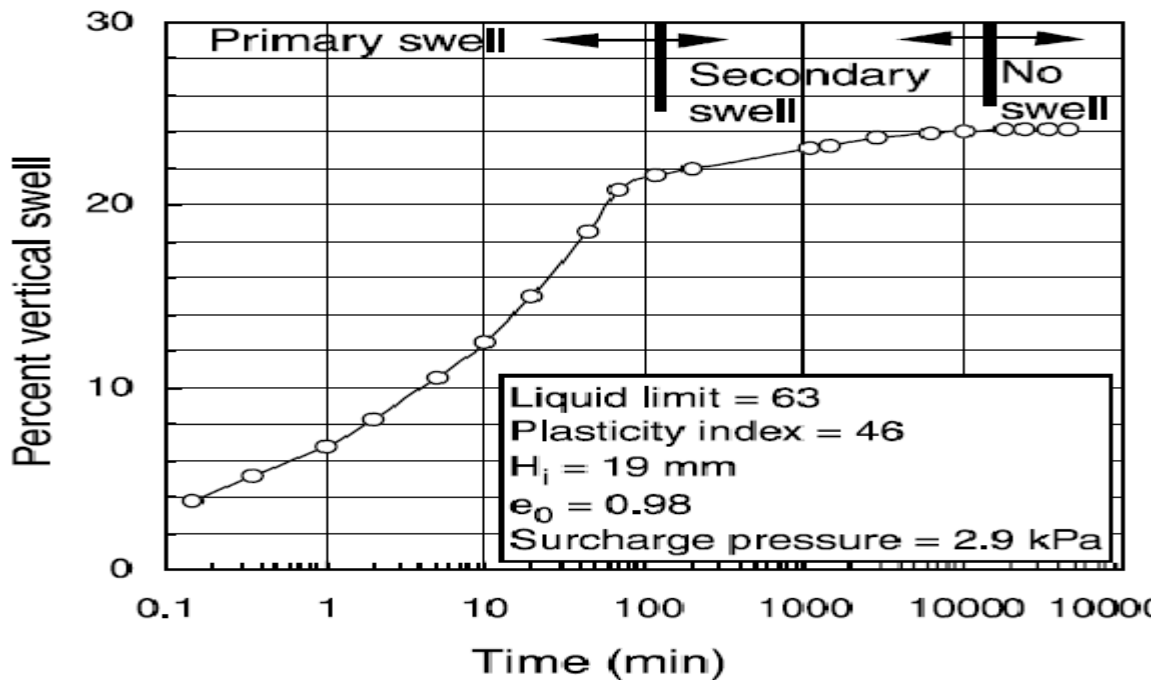
هناك العديد من العوامل التي تحكم السلوك الانتفاخي للتربة. العوامل الأولية هي توافر الرطوبة وكمية العناصر المعدنية بين حبيبات الغضار في التربة. أما العوامل الأخرى المؤثرة فهي تشمل نوع التربة، وحالة التربة من حيث الكثافة الجافة ومحتوى الرطوبة وحجم الضغط الإضافي وكمية المواد غير الانتفاخية، لكن العامل الأساسي هو المينرالات المعدنية الموجودة بالتربة ونسبة المسام.

ذكر [40] أن تغيير الحجم في التربة هو في الواقع ظاهرة ثلاثية الأبعاد، إذ يحدث ارتفاع في التربة بشكل طبيعي في سطح الأرض لأن الانتفاخ الجانبي يمنع لحد كبير بسبب وجود التربة المجاورة.

- طبق [41] دورات الترطيب والتجفيف على عينات من التربة المنتفخة، وتعرضت عينات التربة المعاد تشكيلها لدورات من الانتفاخ الكامل وانكماش كامل أو انتفاخ كامل وانكماش جزئي واستنتج أن تغيرات ارتفاع العينات أثناء الترطيب والتجفيف هي نفسها بعد أربع دورات، حتى أنها مستقلة عن شروط الضغط الأولي وتم تحديد نسبة الفراغ بعد كل دورة انتفاخ - انكماش، وأشارت النتائج إلى أن نسبة الفراغ تبقى ثابتة بعد الوصول لمرحلة التوازن.

- وجد [42] أن المحتوى المائي لعينات التربة يصل إلى قيمة ثابتة بعد حوالي أربع دورات انتفاخ - تقلص.

- أوضح [43] أن التربة تمر بثلاث مراحل من الانتفاخ خلال تطبيق دورات ترطيب وتجفيف متعددة كما هو موضح في الشكل [10.2] ، وهي الانتفاخ الأولي، انتفاخ ثانوي وعدم انتفاخ. يحدث الانتفاخ الأولي بمعدل سريع للغاية وبعد الانتفاخ الأولي، تزداد التشققات أثناء التجفيف، يشمل الانتفاخ الثانوي إغلاق الشقوق الدقيقة وتقليل الهواء المحبوس، خلال المرحلة الثالثة (أي عدم وجود انتفاخ)، لا تحدث تغييرات أخرى في نسبة الفراغ. المراحل الثلاث للانتفاخ موضحة بالشكل التالي:



الشكل [10.2] مراحل الانتفاخ [43]

-كذلك أوضح [44] أن التقلص يحدث وفق مراحل تنتج عن التجفيف التدريجي للتربة الطبيعية وهذه المراحل هي: (1) التقلص الهيكلي، (2) التقلص العادي، و (3) التقلص المتبقي. خلال التقلص الهيكلي والمتبقي يتم إفراغ عدد قليل من المسام الكبيرة والمستقرة والتقلص في حجم التربة أقل من حجم الماء المفقود. أثناء مرحلة التقلص الطبيعي، يكون انخفاض الحجم مساوياً لحجم الماء المفقود (أي ميل الحجم الكلي للينة مقابل خط محتوى الماء هو 45 درجة). عند مزيد من التجفيف، يتغير انحدار منحني التقلص ويدخل الهواء الفراغات عند حد التقلص أو عند بداية التقلص المتبقي، تتلامس الجسيمات، ويكون الانخفاض في حجم الينة أقل من حجم الماء المفقود.

-عند الوصول لحد التقلص أو بداية المرحلة المتبقية تتقارب الجزيئات من بعضها، ولا يحدث تقلص أكثر رغم استمرار نقص المحتوى المائي. إن وجود هذه المراحل وحدوثها يعتمد على بنية التربة، والأهم من ذلك، عدد الجسيمات الداخلية التي تسبب المقاومة.

تناولت دراسة [45] تأثير دورات التجفيف والترطيب على خلائط الرمل والبنتونايت، تم فحص تأثير دورات الترطيب والتجفيف على ضغوط الانتفاخ لخلائط الرمل والبنتونايت المستخدمة في بناء مطامر قمامة صحية للحصول على بطانة غير نفوذة قبل وبعد معالجة المخاليط بالجير. تم إجراء اختبارات ضغط الانتفاخ لمعرفة ما إذا كانت ضغوط الانتفاخ قد تأثرت بدورات الترطيب والتجفيف. تم تحضير السلسلة الأولى من العينات كمزيج من الرمل والبنتونايت فقط. في السلسلة الأولى من العينات، تم خلط الرمل مع البنتونايت بنسب مختلفة مع محتوياتها المائية المثلى وضغطها باستخدام طاقة بروكتور قياسية. أما في السلسلة الثانية من العينات، فقد تمت إضافة الجير بنسب مختلفة إلى مخاليط الرمل - البنتونيت. بعد ذلك ، تم ضغط مخاليط الرمل والبنتونايت المستقرة بواسطة الجير باستخدام طاقة بروكتور القياسية بمحتويات رطوبة مثالية. تم إجراء خمس دورات ترطيب - تجفيف على كل عينة وقياس قيم ضغوط الانتفاخ في نهاية كل دورة. أشارت نتائج اختبارات ضغط الانتفاخ إلى انخفاض ضغط الانتفاخ عند إضافة الجير إلى الخلائط. كما، لوحظ انخفاض في ضغوط الانتفاخ من خلال دورات الترطيب والتجفيف. أظهرت نتائج تجارب هذا البحث أن التأثير النافع لتثبيت الجير للتحكم في ضغوط الانتفاخ قد فقد جزئياً بسبب دورات الترطيب والتجفيف. ومع ذلك، أوضحت نتائج الاختبار أن ضغوط الانتفاخ للعينات المصنوعة من مخاليط الرمل والبنتونايت المستقرة بواسطة الجير كانت أقل من ضغوط الانتفاخ للعينات المصنوعة من خليط الرمل والبنتونايت فقط.

ومن جهة أخرى معاكسة للنتائج السابقة وجد [46] أن مقدار إجهاد الانتفاخ يزداد مع زيادة الدورات المتتالية من الترطيب والتجفيف، وقد توافقت نتائجها مع الدراسة التي أجراها [47] على الحجر الغضاري mudstone من منطقة في إيران حيث وجد زيادة الانتفاخ والتشوهات مع زيادة عدد دورات الترطيب والتجفيف ليصل إلى الانتفاخ النهائي وتثبت قيمته، وأكد ان هذه الخاصة هامة لتحديد الانتفاخ النهائي بأسرع وقت ممكن.

من هذه الأبحاث التجريبية نجد النتائج التالية:

- تقييم سلوك تغيير الحجم للتربة المنتفخة في الموقع دون النظر للتقلبات الموسمية الدورية يؤدي إلى نتائج غير واقعية.

- تصل التربة إلى حالة التوازن (تغييرات انتفاخ وتقلص متساوية) بعد عدة دورات ترطيب وتجفيف، يصبح منحنى الترطيب - التجفيف قابلاً للعكس سواء كان من حيث التشوه مقابل محتوى الماء أو من حيث التشوه مقابل الامتصاص.

- قبل الوصول إلى حالة التوازن، توجد تشوهات لا رجعة فيها انتفاخ أو انكماش متراكم مع دورات الترطيب - التجفيف.

نظراً لأهمية موضوع التربة المنتفخة فقد كان هناك بعض المحاولات لإيجاد نماذج عددية قادرة على نمذجة سلوك التربة المنتفخة في كل الظروف المناخية (الترطيب والتجفيف):

2-4-دراسة مرجعية للطرق التحليلية المستخدمة لدراسة التربة المنتفخة

المعرضة لدورات متكررة من الترطيب والتجفيف:

تتطلب الصياغة الدقيقة لمشاكل الانتفاخ ثنائية وثلاثية الأبعاد المرتبطة بالتربة غير المشبعة والمنتفخة، وصف حالة التربة وحجم الماء والهواء ضمن مسام التربة ، استناداً لمعادلات الاستمرارية (معادلة تفاضلية لوصف تدفق الماء ضمن المسام) مع معادلات التوازن ، فعندما تتعرض التربة للضغط الخارجي تتشوه بنيتها ويتغير ترتيب حبات التربة استجابة لهذه الإجهادات وتترافق هذه التشوهات مع تغيير حجم وضغط مسام التربة لتصل لحالة توازن جديدة تتوافق مع الضغوط المطبقة ، ويمكن تحقيق التوازن بين الإجهاد والتشوهات الناتجة ، من خلال اقتران المعادلات الأساسية للفيزياء (معادلة التوازن ، معادلة استمرارية الماء ومعادلة استمرارية الهواء) التي يتم التعبير عنها من خلال متغيرات المجال (الإزاحة و ضغط ماء المسام). تسمى هذه المعادلات بالمعادلات المزدوجة [15] ويمكن اشتقاقها كنظرية التوحيد والانتفاخ للتربة غير المشبعة، ميزة إضافية وأساسية للنماذج التأسيسية للترب المنتفخة، تميزها عن النماذج التأسيسية

للتربة غير المشبعة منخفضة اللدونة، هي القدرة على وصف سلوك الانتفاخ والتقلص أثناء دورات الترطيب والتجفيف.

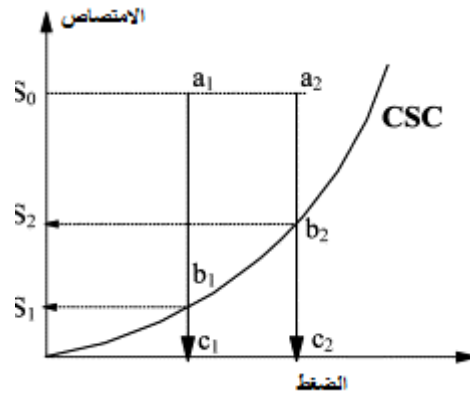
في الدراسات السابقة لنمذجة وتحليل سلوك التغير الحجمي (الميكانيكي) وتغير ضغط ماء المسام (الهيدروليكي) للتربة المنتفخة، معظم النماذج المقترحة استندت على تمييز اثنين من المستويات الهيكلية للغضار المنتفخ، الأول مستوى البنية المجهرية التي يحدث فيها انتفاخ في المينرالات النشطة حيث استنتج تغيير الحجم المجهرى من الإجمالي عن طريق تحليل الصور الرقمية لميكروغرافيات EKEM، [48] (والثاني مستوى البنية الكلية المسؤول عن إعادة ترتيب الحبات والذي يأخذ بالاعتبار إجهاد الامتصاص مع العلم أن التربة تمتلك إجهاد امتصاص عندما تكون مشبعة جزئياً، ولا تمتلك إجهاد امتصاص عندما تكون مشبعة).

بدايةً صممت بعض النماذج مثل [49] الذي طور نموذج لدراسة سلوك التربة المنتفخة غير المشبعة وهو من النماذج الهيدروميكانيكية المستقلة التي اعتمدت على استخدام صيغ تمثل مستوى البنية المجهرية المسامية والبنية الكلية ومزاوجة الفعل المتبادل بينهما للحصول على الاستجابة العامة لسلوك التربة المنتفخة، وتم تحقيق الاقتران الهيدروميكانيكي على كل مستوى هيكلي من خلال ربط صيغة الإجهاد الفعالة بنموذج الاحتفاظ بالماء. إن أحد الميزات الأساسية للنموذج هو تمثيل الانتفاخ المجهرى، و محاكاته للانتفاخ الناتج بالترطيب المقاس في اختبارات قياس السوائل (الميكانيكية) أدى إلى استجابة هيدروليكية متقاربة من النتائج المخبرية، مما يوفر حجة داعمة للنموذج المقترح. وتم تأكيد واقعية النموذج من خلال محاكاة مجموعة بيانات تجريبية شاملة على تربة غضارية من منطقة بون في فرنسا.

إن النموذج المقترح يعتمد على عدد صغير من دالات التربة وهي 10 بارامترات كما يلي:
زاوية احتكاك الحالة الحرجة، Φ_c ، ميل خط الضغط الطبيعي للتربة المشبعة λ ، N موضع خط الضغط العادي الخواص أي قيمة $\ln(1 + e)$ ، r دالة للتحكم بصلابة التربة عند القص، n دالة للتحكم بموضع خط الضغط العادي عند الامتصاص، m يتحكم في تبعية الانهيار الناجم عن الترطيب على نسبة التشديد الزائد وانسداد المسام الكبيرة بواسطة المسامية الدقيقة على نسبة الفراغ النسبي،

κ ميل خط التفريغ متماثل الخواص للبنية الكلية، e نسبة الفراغ الكلية، وأحد المكونات الأساسية هو تمثيل السلوك الميكانيكي المجهرى الذي يعبر عنه المتغير km ، لقد ثبت أن معايرة المعامل km باستخدام تجارب الانتفاخ مع تغيير الحجم المقاس يؤدي إلى استجابة صحيحة من حيث درجة التشبع، مما يوفر دعماً للنموذج المدروس،

وخارج إطار النماذج المزدوجة، إن بعض النماذج مناسب لحالات عملية خاصة تم تطويرها لكن لم تأخذ بالاعتبار السلوك المستقل للبنية الكلية والبنية الدقيقة للتربة المنتقخة، مثال على ذلك [50] الذي درس حواجز الغضار الهندسية المستخدمة لعزل مطامر التخلص من النفايات النووية على عمق كبير والمصنوعة من الغضار المنتفخ المضغوط وافترض أن دور المسامية الكلية في حدوث انتفاخ في التربة الكثيفة المضغوطة مهملة و طور نموذج مرن غير خطي مستنداً لمنحنى الانتفاخ الحرج (CSC) (critical swelling curve) الشكل [11.2] ، الذي يشكل قاعدة النموذج، يفسر منحنى CSC والنموذج المطور العلاقة بين محتوى الماء في المسام والتغيرات الحجمية للتربة . وتم تحقيق النموذج بناءً على النتائج التجريبية من اختبارات الترطيب -التجفيف، وإعطائه تنبؤات مرضية لسلوك تغيير الحجم للغضار المنتفخ المضغوط.



الشكل [11.2] منحنى الانتفاخ الحرج (50).

- كذلك استخدم [51] نموذج للانتفاخ المرن. swell constitutive model. باستخدام برنامج FLAC (Version 8.00) استناداً على نتائج اختبار الضغط ثلاثي المحاور ، حيث طبق البحث على النتائج التجريبية للتربة المتوضعة في منحدر ممثلي بثلاث طبقات من مواد التعبئة القابلة للانتفاخ وبمواصفات مختلفة ، لإنشاء العلاقة التأسيسية للترطيب ، يتميز هذا النموذج ببساطته مع عدد قليل من البارامترات مثل (كثافة التربة، معامل الحجم ، معامل القص ، التماسك ، زاوية الاحتكاك) حيث يتم تقييم تشوهات الترطيب بدءاً من حالة التوازن قبل الترطيب وفق معادلات مقترحة ويتم اشتقاق الإجهاد الناجم عن الترطيب بشكل تدريجي وفق قانون هوك ، وقد أعطى المودل توافق جيد بين النتائج الحقلية ونتائج النمذجة ، لكن من مساوئ هذا النموذج أنه قادر على نمذجة الانتفاخ فقط للتربة.

- وقدم [52] مقارنة بسيطة لنمذجة سلوك التغير الحجمي والمحتوى المائي للتربة المنتقخة المكونة من خليط السيلت والبنتونيت المضغوط غير المشبع وفق كثافة بدائية متنوعة ومسارات إجهاد مختلفة من خلال دراسة تحليلية تعتمد على نموذج هيدروديناميكي مبسط لنمذجة سلوك التربة

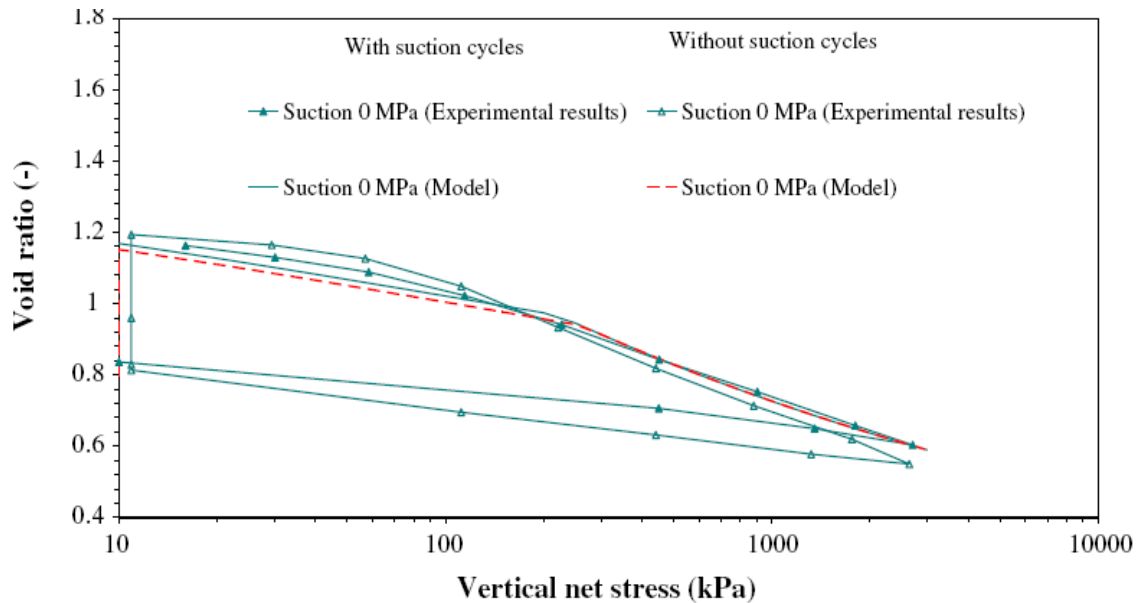
المنتفخة خلال دورات الترطيب والتجفيف المتتالية، إذ تم تطوير النموذج بناءً على النتائج التجريبية بثلاث كثافات جافة أولية مختلفة تمثل حالات مخلخلة ومتوسطة وكثيفة. تم وضع دالات النموذج في البداية بناءً على النتائج التي تم الحصول عليها للعينات الرخوة والكثيفة، ثم استخدمت لتقدير سلوك التغير الحجمي للعينات المدروسة وهي .

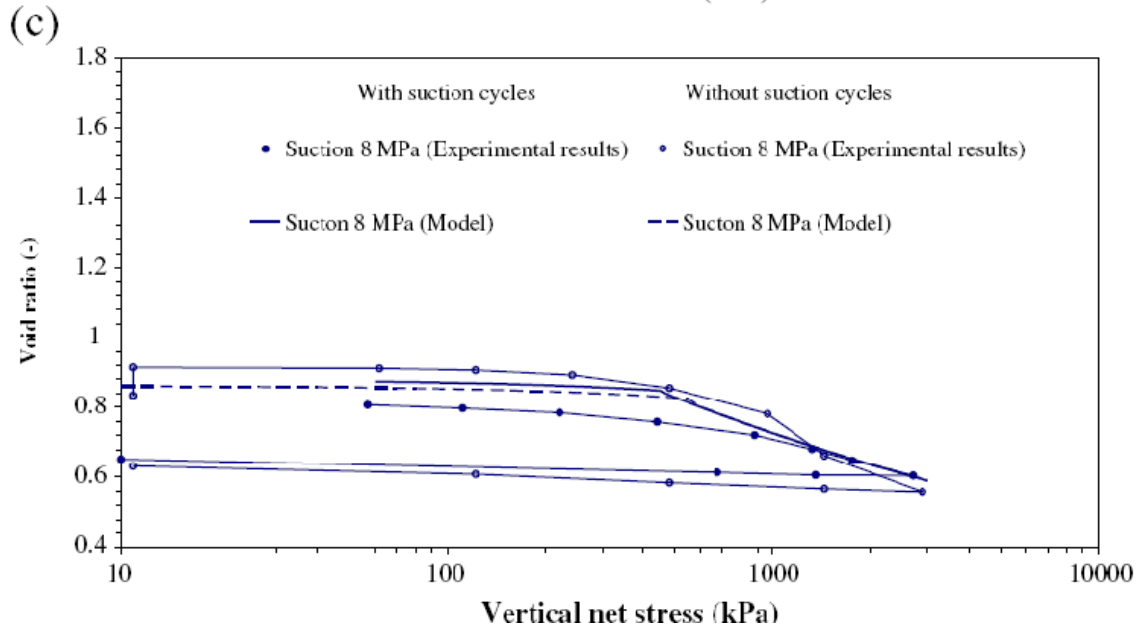
a : نسبة الفراغ عند ما الضغط والامتصاص يساوي الصفر، b: تغير الحجم الكلي نتيجة للامتصاص

C: تغير الحجم الكلي نتيجة لتغير الامتصاص وقد يكون ذو علاقة بانتفاخ التربة. وعند دراسة التغيرات الحجمية استند على نقطتين رئيسيتين: أولاً نسبة الفراغ معامل مستقل وثانياً إن تغير الامتصاص مرتبط بتغيير خصائص الانتفاخ للتربة كمؤشر للدونة.

لقد كانت النتائج العددية الناتجة عن النمذجة متطابقة بشكل مرضي مع النتائج التجريبية باعتبار أن سلوك التربة مرن، والنموذج يستخدم لتقييم منحنيات الضغط عند 1- امتصاص ثابت وكثافة جافة أولية متنوعة. 2- عند اجهاد رأسي ثابت وقيم امتصاص متنوعة.

وبينت نتائج النمذجة أن التربة تصل لحالة التوازن بعد حوالي أربع أو ثلاث دورات ، و منحنيات التقلص والانتفاخ عند حالة التوازن ليست نفسها بعد حوالي أربع أو خمس دورات وذلك نتيجة ظاهرة الإعاقة (هي خاصية فيزيائية تتمثل في تأخر استجابة النظام للقوى المطبقة عليه ، والماء الذي يسبب هذه الظاهرة هو ماء التربة المتوضع بشكل أغشية حول حبيباتها ومرتبطة بأسطح الحبيبات بقوة هيدروستاتيكية كبيرة ، ولا بد للتخلص من هذا الماء من تجفيف التربة) ، بعد مقارنة المنحنيات وجد أن منحنيات التربة المشبعة مقارنة لمنحنيات التربة الغير مشبعة ، بمعنى أن بارامترات التربة المشبعة كافية لوصف التربة غير المشبعة .



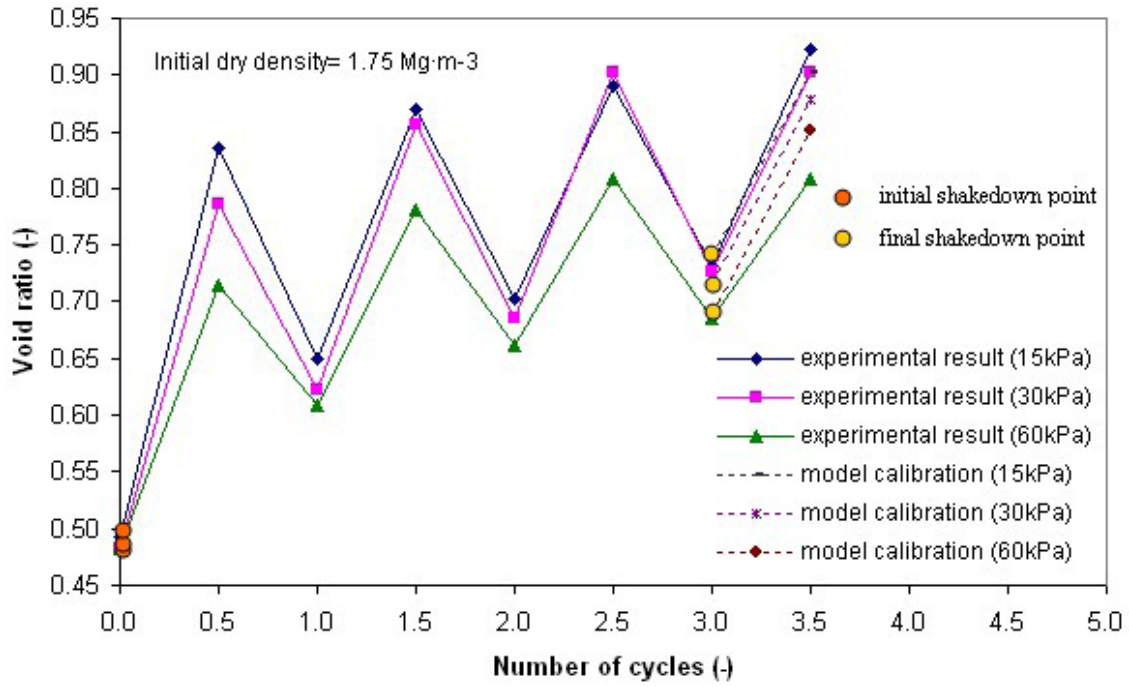


الشكل [12.2] مقارنة النتائج التجريبية مع نتائج النمذجة وتطبيق دورات الترطيب والتجفيف (52).

ويظهر الشكل [12.2] مقارنة منحنيات الضغط بدون دورات امتصاص مع قيم امتصاص من-8 MPA 0. يتنبأ النموذج بانتفاخ تراكمي ضئيل لكن النموذج الفعلي غير قادر على نمذجة تقلص التربة في منحنيات الضغط عند الامتصاص المفروض 8 MPA. ومن النماذج المقترحة في بداية دراسة سلوك الترب المنقخة أيضاً:

- وأيضاً قدم [53] نموذج بسيط قائم على نظرية shakedown أوجده Zarka لمحاكاة السلوك الميكانيكي للتربة المنقخة غير المشبعة خلال دورات الامتصاص المتتالية ، وذلك لنمذجة سلوك التربة المنقخة التي تخضع لدورات الترطيب والتجفيف وتحديد نموذج قائم على الامتزاز (مفهوم فيزيائي يعتمد على تراكم ذرات أو جزيئات مائع على سطح مادة صلبة ، وتسبب هذه العملية تكون طبقة من الجزيئات متراكمة بكثافة على السطح ، وهو يشابه التوتر السطحي)، حيث يتم تعيين الإزاحة المرنة من قيمة البارامتر الداخلي و ذلك يحدث للتربة الكثيفة المنقخة في نهاية دورات الامتصاص. في النهاية، فإن نظرية الامتزاز المرن تشرح السلوك المرن القابل للانعكاس في حالة التوازن.
- يجب تحديد ثلاث دالات للنموذج القائم على الامتزاز عن طريق التجارب المعتمدة على الامتصاص: معامل اللدونة (K) ، مؤشر المرونة للتغيير في الامتصاص (الامتصاص) وحد المنطقة المرنة (SD, SI) ، وهذه المعلمات الثلاثة تكفي لوصف السلوك الهيدروميكانيكي للانتفاخ غير المشبع التربة.

- ويبين الشكل التالي معايرة المودل ومقارنة النتائج التجريبية مع نتائج النمذجة:

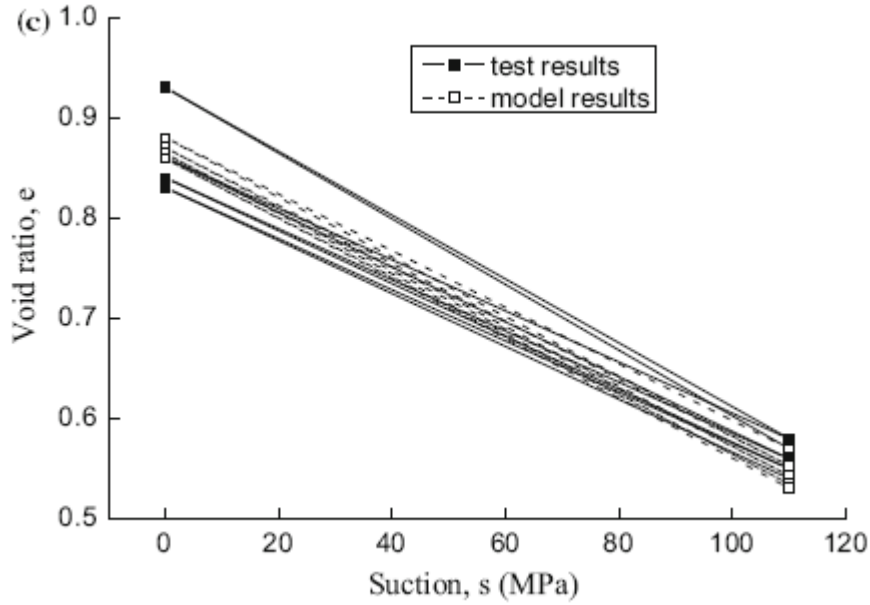


الشكل [13.2] مقارنة النتائج العددية مع النتائج التجريبية [35]

في النهاية فإن معايرة النموذج تظهر نتائج مرضية، مما يعطي مصداقية للمودل المدروس.

قام [3] في هذه الدراسة بتشكيل نموذج، بناء على مفهوم حالة الانتفاخ - النقص الحرج، تشوهات الانتفاخ - النقص المرنة، تشوه الانتفاخ - النقص اللدن والتشوه التراكمي خلال دورات الترطيب والتجفيف. تم تحديد سطح الخضوع مع تناقص الامتصاص (SD)، و سطح الخضوع مع زيادة الامتصاص (SI)، و وضع نموذج عددي يأخذ بالاعتبار سلوك تغير حجم الانتفاخ والنقص بالحالة الحرجة للتربة الغضارية المنفخة، وتحقق من النموذج المقترح باستخدام نتائج اختبار الترطيب والتجفيف الدوري التي أجريت على البنتونيت المضغوط (GaoMiaoZi) (GMZ).

وقد استنتج أن تشوهات الانتفاخ والنقص بعد أربع دورات تصبح نفسها والتشوهات التراكمية لكل العينات تزداد مع ازدياد الدورات كما في الشكل، الفرق بين تشوهات الانتفاخ وتشوهات الانكماش في الترطيب والتجفيف تصل إلى قيمتها القصوى في الدورة الأولى. ثم، تنخفض مع زيادة دورات الترطيب والتجفيف. قبل الوصول إلى حالة التوازن، ووجد أن التشوه الإجمالي التراكمي للنقص والانتفاخ يعتمد على خصائص التربة والظروف الأولية والضغط الرأسي أو حصر الضغط الشكل [14.2] يصل تشوه التربة حالة التوازن بعد عدد معين من دورات الترطيب - التجفيف.



الشكل [14.2] مقارنة النتائج التجريبية مع نتائج النمذجة [3]

- من جهة أخرى اقترح [54] نموذج تصلب متباين الخواص للتربة المنتفخة وهو نموذج لدن مرن مقترح بناءً على نموذج Cam-clay ، وهو قادر على وصف العديد من السلوكيات الميكانيكية ، بما في ذلك تصلب الإجهاد وتليينه ، وتمدد الإجهاد ، والإفراط في التشديد ، وضغط الزحف ، وما إلى ذلك. وتحديد عدد أقل من الدالات المطلوبة في النموذج عن طريق الاختبار ثلاثي المحاور التقليدي ، من خلال تطبيق مفهوم وحدات التصلب المطورة مسبقاً للمينرالات، مع الأخذ في الاعتبار كل من خواص التصلب (التقلص) بسبب تغيرات المسامية وتأثيرات التباين الناتجة عن عملية الدمج الأولية يقتصر التحليل على حالة ثلاثية المحاور التي يتساوى فيها ضغطان رئيسيان. واشتقاق العلاقات الإضافية وتطبيقها لدراسة سلوك المادة المصرف وغير المصرف بعد توحيد K_0 للغضار. إلى جانب سطح الخضوع، تحدد مجموعة من الأسطح المتداخلة في مساحة الإجهاد، يمكن معالجة كل من سلوك التربة المصرف وغير المصرف ويمكن نمذجة سلوك التحميل الدوري، حيث تم تطبيق النموذج في دراسة سلوك التربة الغضارية تحت التحميل الدوري وعلى وجه الخصوص لوصف ظاهرة التكتيف أو التميع، تمت مقارنة السلوك غير المرن المتوقع مع النتائج التجريبية المتاحة لطين الكاولين لكن هناك صعوبة لتنفيذ هذا المودل وهناك حاجة لأكثر من 10 اختبارات تجريبية لتحديد كل البارامترات

- يعد نموذج السلوك المعروف باسم "HuJeux" [55]، المصمم في مختبر MSSMat التابع لـ ECP، أحد النماذج المرنة لميكانيكا التربة (التربة الحبيبية، الغضار الرملي..) الأكثر ملاءمة

لمحاكاة الهياكل الجيوتقنية في الزلازل ، من أجل تمثيل ميكانيكية التربة للأحمال المتتالية لسنوات عديدة ، يتميز هذا النموذج بآليات انهيار متعددة (ثلاث آليات تشوه منحرفة لدنة في ثلاث مستويات متعامدة ، وآلية موحدة الخواص) ، وبأربعة أسطح انهيار ، ويفرض أن المادة مرنة غير خطية، ويخضع لعدة متغيرات و اعتماد قاعدة التدفق الطبيعي التوحيد ، باتباع قاعدة تمدد روسكو(ميكانيكا الحالة الحرجة حيث ربط العلاقة المتبادلة بين سلوك تغير الحجم من انتفاخ ، انكماش ، وسلوك القص من خلال نظرية اللدونة المعممة) مثل النماذج الأخرى لسلوك التربة ، فإن الإجهاد يكون موجباً في مرحلة ما قبل الذروة وسلبياً في مرحلة ما بعد الذروة ، وهو ما يتوافق مع تأثير الانتفاخ ؛ تؤدي هذه التأثيرات إلى سلوك "تسييل" التربة. أخذ هذا النموذج في الاعتبار تأثير متوسط الضغط الفعال على صلابة التربة وتم أيضاً دمج مفهوم الحالة الحرجة في هذا النموذج لتمثيل الإقتران بين الضغوط وتغيرات الحجم في وسط حبيبي. ويوجد مجموعتين من البارامترات مجموعة تعتمد على التجارب المخبرية والحقلية ومجموعة لا يمكن أن تستنتج من التجارب.

يتم التعبير عن نموذج Hujoux في ضغوط فعالة - تعرف بأنها الفرق بين الاجهادات الكلية وضغط الماء في حالة التربة المشبعة - في حالة الاقتران الهيدروميكانيكية. أي أنه لا يأخذ في الاعتبار الضغط الهيدروستاتيكي للسائل في المسام، وهو مناسب للغضار المتماسك مسبق التشديد، وللتربة الحبيبية كالرمل.

- قدم [14] نموذج تحليلي وهو محاولة لمزاوجة السلوك المرن مع السلوك اللدن حيث افترض في هذا المودل أن الإجهادات الناتجة هي ناتج سلوك التربة المرن وسلوكها اللدن ، حيث تم توصيف سلوك الانتفاخ للغضار غير المشبع المنتفخ من خلال قوانين تجريبية بسيطة نسبياً تتعلق باستجابة المواد لتغيرات الامتصاص والضغوط المطبقة. ولكن فيما بعد طور عدد قليل نسبياً من الصيغ والنماذج التي تدمج الجوانب الرئيسية من السلوك المائي والميكانيكي للغضار في إطار موحد، قدم [56] [57] [58] واحدة من أقرب النماذج المرنة للغضار المنتفخ يسمى نموذج برشلونة الانتفاخي (BEXM) وهو يصلح للتربة الانتفاخية والمشبعة جزئياً الرمال والطيني والرمال الغضارية المشبعة جزئياً والغضار الرملي والغضار منخفض اللدونة

حيث قدم [57] أحد أقدم النماذج المرنة للغضار المنتفخ، أطلق عليه اسم نموذج برشلونة المنتفخ نموذج (BEXM) وهو يعتمد على اثنين من مستويات هيكل الغضار المنتفخ ، مستوى البنية المجهرية ، والمستوى الهيكلي الكلي ، حيث قدم ألونسو وآخرون نموذج بسيط للغضار المنتفخ يصف سلوك الإجهاد والانفعال للتربة المشبعة جزئياً، و سلوك التربة المنتفخة، ويعتبر أن الامتصاص هو متغير مستقل $s = u_a - u_w$ ، في هذا النموذج توجد علاقات لامتصاص سطح الخضوع وتغيراته وجهزت علاقات لوصف تشوهات الانتفاخ والتقلص، السلوك المرن للتربة غير المشبعة خلال الترطيب والتجفيف يدرس بهذا المودل ، وتقريباً من المستحيل عكس تشوهات الانتفاخ التراكمية للتربة الكثيفة بعد اختبار دورات الترطيب والتجفيف تحت إجهاد منخفض، وفي نفس الوقت ، فإن امتصاص الخضوع هو ثابت مع تغييرات الضغط المطبقة. بل إنه يكاد يكون من المستحيل أن يعكس الضغط الرأسي وآثار إجهاد الحصر على تشوه الانتفاخ والانكماش.

-إن صيغة نموذج BARCELONA EXPENSIVE MODEL (BEXM) تعتبر مرجع أساسي لتحليل سلوك التربة المنتفخة غير المشبعة وتعتمد على قوانين تحريبيه بسيطة نسبياً، ويؤخذ بالاعتبار تراكم الإجهادات مع الوقت أثناء الترطيب والتجفيف والمرحلة المرنة وهي مرحلة التوازن التي تصل لها التربة بنهاية دورات الترطيب والتجفيف.

يعتمد هذا النموذج على التمييز داخل المادة على مستوى البنية المجهرية الدقيقة، بإطار (BEXM) نموذج كامل للتربة المنتفخة يعتمد على المزاجية بين مستوى البنية الدقيقة والكلية ، لذلك سميت ثنائية النماذج ، والنماذج التي أتت بعده اعتمدت على مستويات أخرى ، حراري ، كيميائي .

اعتمد على دمج نموذج الخصائص المميزة للتربة المنتفخة والنماذج المطورة للتربة غير المشبعة، وقد وجد أن المودل قادر على تمثيل سلوك التربة المنتفخة اعتماداً على محتوى الرطوبة والكثافة الجافة ، الضغط المطبق ، ومنحني تشوه الانتفاخ ، وإن التوافق الذي أعطاه المودل مع النتائج التجريبية أعطى مصداقية كبيرة للعمل ضمن إطار هذا المودل .

- شرح إطار عمل (BEXM) بنجاح بعض الميزات الأساسية للتربة المنتفخة ولكن غالباً ما تكون النماذج مزدوجة الهيكل مزودة ببارامترات معقدة تتطلب اختبارات غير التقليدية ومن الصعب إجراؤها في العديد من المختبرات وهذه البارامترات مطلوبة لتحديد البنية المجهرية وبقيت الحاجة لطريقة مبسطة لتحديد قيم هذه البارامترات بالرغم من أن ألونسو (2005) وجد بعض التبسيط للمودل الأصلي لتسهيل تحديد بارامترات البنية المجهرية.

- أضاف ألونسو أيضاً [58] فيما بعد بعض التعديلات على نموذج (BEXM) من أجل تضمين إمكانية الإشباع الجزئي في المسامات مجهرياً ، من خلال تحديد الاقتران الميكانيكي بين كلا مستويي الهيكل من خلال وظيفتين ، واحدة للترطيب والأخرى للتجفيف، بتغيير نسبة الفراغ

البنائية الكلية و التغير في البنية المجهرية لنسبة الفراغ، وتتأثر قيمها بالضغط المطبق على التربة ، على أساس الأدلة التجريبية و ظواهر مثل اعتماد الضغط على مسار الإجهاد-الامتصاص ، تراكم إجهاد الانتفاخ أثناء دورات الامتصاص عند إجهاد تطويق منخفض ، تراكم إجهاد الضغط أثناء دورات الامتصاص عند إجهاد حصر مرتفع ، إجهاد أثناء دورات التجفيف-الترطيب ، يمكن تمثيل ذلك بواسطة البنية المجهرية المنتقخة وتطوير المسامية الكلية أثناء التجفيف القوي ، تم وصف الصيغة الرياضية للنموذج وتقييم أدائها بشكل نهائي عن طريق المقارنة مع المختبر، وهذا النموذج أضاف ميزات محددة مثل التدخل المجهري من خلال توسيع البنية المجهرية وزيادة المسامية الكلية أثناء التجفيف العالي ، وبينت المقارنات مع النتائج التجريبية قدرة المودل على تمثيل حالات التربة المنتقخة مع درجات إشباع مختلفة ، لكنه بشكل عام ركز على التشوه الحجمي أكثر من التغير في ماء المسام .

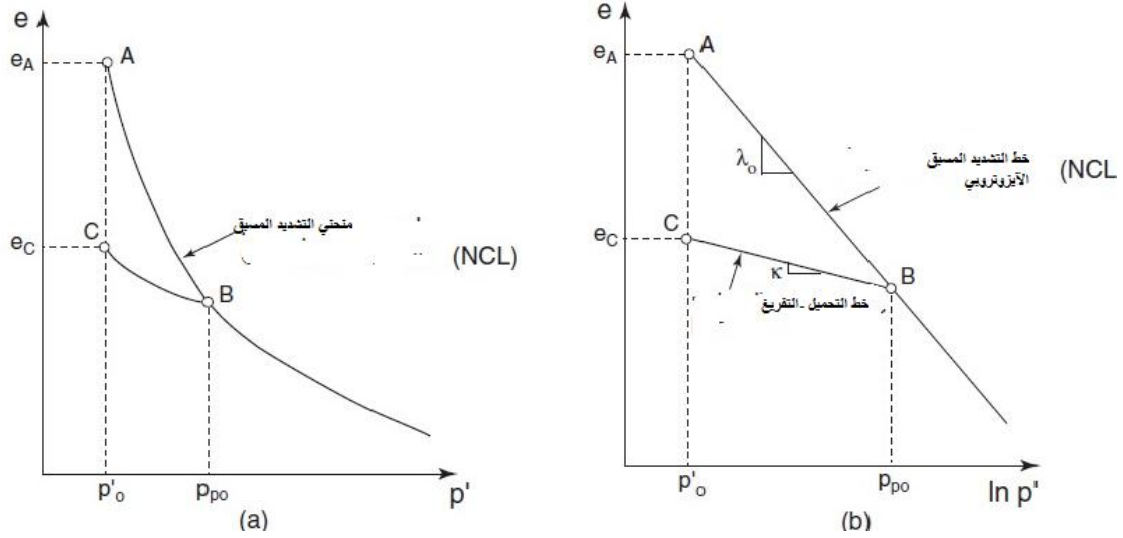
لكن بعض من سلبيات المودل التي تبينت بعد أبحاث متعددة [55]، أنه يتطلب العديد من معاملات النموذج ليتم تحديدها، ويأخذ وقت حساب طويل للنمذجة العددية مع عدد كبير من دورات الامتصاص.

النماذج الحالية سميت ثنائية المستوى، والتطورات الأخيرة كانت لنماذج ثنائية الهيكل وممدت صيغتها لتشمل مجال ضغط أكبر ومسار إجهادات أكثر تعقيداً . من الضروري أن يكون هناك طريقة بسيطة وموثوقة لتحديد البارامترات، بالرغم من أن ألونسو Alonso قدم بعض التبسيط للمودل الأصلي لتسهيل تحديد معاملات البنية المجهرية، ومع ذلك لا يزال هناك بعض الصعوبات في تحديد المعاملات.

إن نموذج (BEXM) جاء بعد عدة تحسينات للنموذج الأصلي في البداية كان نموذج CAM CLAY العادي [20] وهو النسخة الأولى من المودل المرن اللدن القاسي (المتصلب) للتربة المنتقخة الذي طوره فريق جامعة كامبردج ويعتمد نموذج Cam-Clay الأصلي على افتراض أن التربة وسط لدن مرن ، يتشوه كسلسلة متصلة ، ولا يتأثر بالزحف .

بعد ذلك ظهر نموذج cam-clay المعدل [20] : هذا المودل يختلف عن النموذج الأصلي أنه يأخذ بالاعتبار الطاقة اللدنة التي تتضمن تأثير الحجم حيث ينسب الفضل للبروفيسور روسكو في تطوير النسخة المعدلة من النموذج الأصلي.

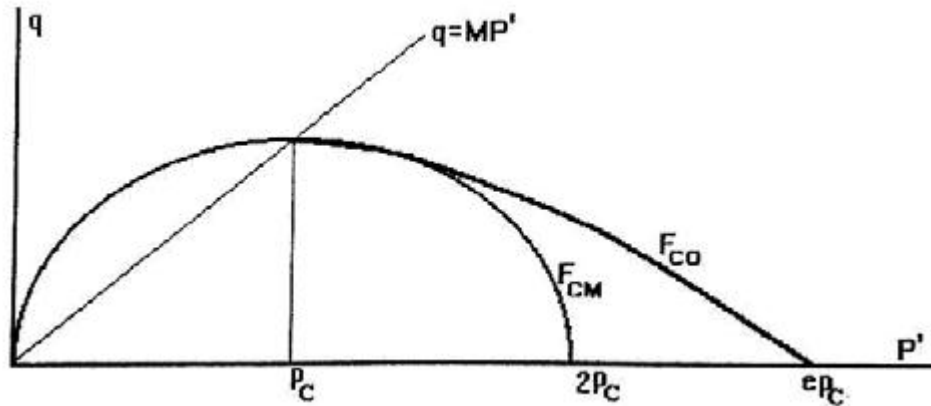
أحدى الافتراضات الأساسية في نموذج كام كلاي المعدل أن العلاقة بين وسطي الاجهادات الفعالة p' نسبة الفراغ المسامية e في حالة التحميل الكروي هي علاقة لوغاريتمية، وهي موضحة في الشكل [15.2].



الشكل [15.2] العلاقة بين الاجهادات ومعامل المسامية، (a) مقياس طبيعي، (b) مقياس نصف لوغاريتم في مودل *cam-clay* المعدل [20]

الفرق بين Cam Clay و Modified Cam Clay [2] (MCC) وجود سطح انهيار وحيد يعرف انهيار التربة دون العودة لتاريخ التحميل أو مسار الإجهادات موصوف بقطع ناقص وهذا مناسب جداً للنمذجة التأسيسية في التحليل العددي، وخاصة تحليل العناصر المحدودة، حيث تكون قضايا الاستقرار العددي مهمة (يجب أن يكون المنحنى مستمراً حتى يكون قابلاً للتفاضل).

يكون السطح الناتج لنموذج Cam-clay المعدل كما هو مبين في الشكل [16.2] :



الشكل [16.2] نمذجة الحمولة السطحية: F_{C0} سطح كام كلاي الأصلي، F_{CM} سطح كام كلاي المعدل [20].

بعد ذلك تم إصدار نموذج ألونسو (BBM): وهو من تطوير فريق برشلونة على أساس النموذج الأساسي (Cam-Clay (Alonso et al., 1990)). ويعتبر الامتصاص متغير مستقل،

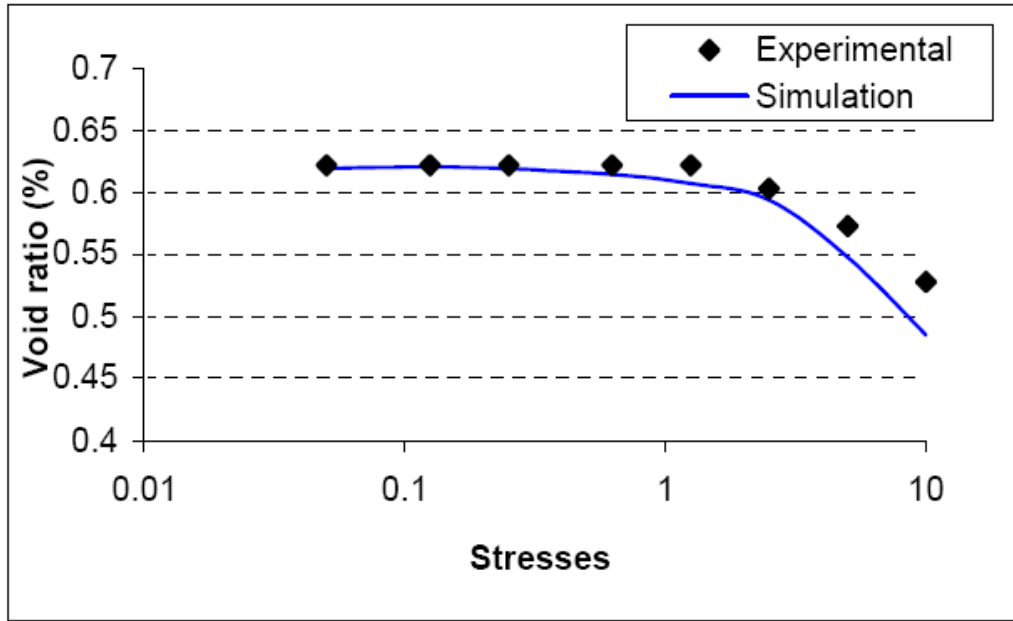
$s = u_a - u_w$. تمت صياغة النموذج بناءً على الافتراضات:

- الزيادة في حد المرونة (أو ضغط التشديد المسبق مع الضغط السلبي)
- الامتصاص يقلل من قابلية التربة للانضغاط ويزيد المقاومة الميكانيكية للتربة
- خلال دورات التصريف تظهر إجهادات حجمية قابلة للعكس.
- مع وجود قيود معينة، والحد من الامتصاص (ترطيب) قد يؤدي إلى تغيير في الحجم غير القابل للعكس تشوه (انهيار).
- عند زيادة إجهادات التطويق فإن حجم الانهيار يزداد للقيمة العظمى ثم ينقص.
- تشبع المادة يؤدي للانضمام لمسار الإجهاد والانفعال الأولي في الحالة المشبعة.
- الامتصاص المستمر سبب لنمو التماسك الشعري.

وفيما يلي بعض الأبحاث التي حاولت استخدام النماذج المقترحة للتربة الغضارية المنتفخة

- حيث درس [59] تحليل سلوك الغضار بواسطة النمذجة المرجعية للنقل والانتفاخ باستخدام مقياس odometer. تم إجراء هذا التحليل والنمذجة العددية باستخدام برنامج CASTEM2000، على عينات خضعت لتجربة الآدومتر لكن من دون دورات ترطيب وتجفيف، وبعد مقارنة المنحنيات تبين أن العيب الرئيسي لهذا النموذج هو أنه لا يحاكي مرحلة التفريغ لتجربة الآدومتر، لأنه بمجرد تحقيق سطح التحميل، يتم التفريغ تحت سلوك مرن، وهو ما لا يتفق مع واقع سلوك المادة الفعلي، ويبين الشكل [17.2] مقارنة النتائج التجريبية مع نتائج النمذجة .

كما قام [60] بإجراء محاكاة لاختبارات مقياس odometers حسب نموذج ألونسو، حيث أن أبعاد العينة والحلقة هي نفسها المستخدمة في النموذج السابق.



(a): Site of Ouled Mimoun, $P_{c0} = 2.4 \text{ bar}$ $e_0 = 0.6219$

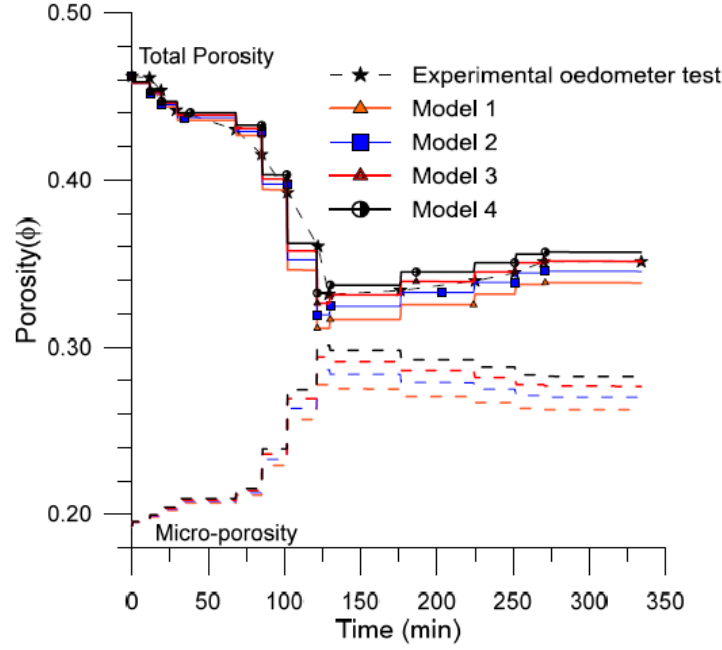
الشكل [18.2] مقارنة النتائج التجريبية مع نتائج النمذجة [32]

يبين الشكل [18.2] مقارنة النتائج التجريبية ونتائج النمذجة باستخدام نموذج أونسو، تظهر النتائج تقارباً جيداً جداً للقيم النظرية والتجريبية حيث وجد اختلاف دقة طبيعي بين النمذجة والقيم التجريبية أقل من 7% من أجل قيمة الانتفاخ، ونسبة لا تتجاوز 11% من أجل التقلص وبالنسبة للنمذجة العددية المتعلقة بظاهرة الانضغاطية وانتفاخ التربة باستخدام Cam clay، ونموذج أونسو (bbm) من أجل تقدير بارامترات الانتفاخ، فقد تم تمثيلها بشكل جيد من قبل النموذجين.

لكن بالنسبة لاختبارات الانضغاطية، في الواقع، تبين أن نموذج Cam-Clay لا يمكنه محاكاة مرحلة التفريغ في اختبارات الآدومتر، وبالتالي لا يمكن محاكاة اختبارات الانتفاخ، لأن النموذج لديه سطح تحميل واحد فقط، بينما نموذج أونسو استطاع أن ينمذج الظاهرتين معا ولو بوجود نسبة دقة في نمذجة الانتفاخ العالي، لكن لا يحاكي التربة عالية الانتفاخ.

قام [60] بدراسة خليط غير متجانس من البنتونايت عالي الكثافة وذو قدرة انتفاخ عالية ليستخدم كمواد تحيط بخزانات المواد النووية المستخدمة وللتخلص من النفايات المشعة عالية المستوى، وذلك ضمن برنامج المعهد الفرنسي للحماية من الاشعاع برنامج السلامة النووية (IRSN) مشروع

VSEAL ، الذي يعتمد على سلسلة من التجارب في مختبر أبحاث IRSN تحت الأرض (تورنمير ، فرنسا). هدفت هذه التجارب إلى دراسة عملية الترطيب طويلة المدى لحاجز مصمم هندسيًا. واستخدم نموذج برشلونة للترب الانتفاخية الشكل [9.5] باستخدام طريقة العناصر المنتهية finite element باعتباره مصمم للتعامل مع المشاكل المزدوجة في الأوساط الجيولوجية، مع توزيع حجم مسام ثنائي النسق (BEXM) لوصف السلوك الميكانيكي للتربة ذات المسامية المزدوجة (المسامية الدقيقة والكبيرة).

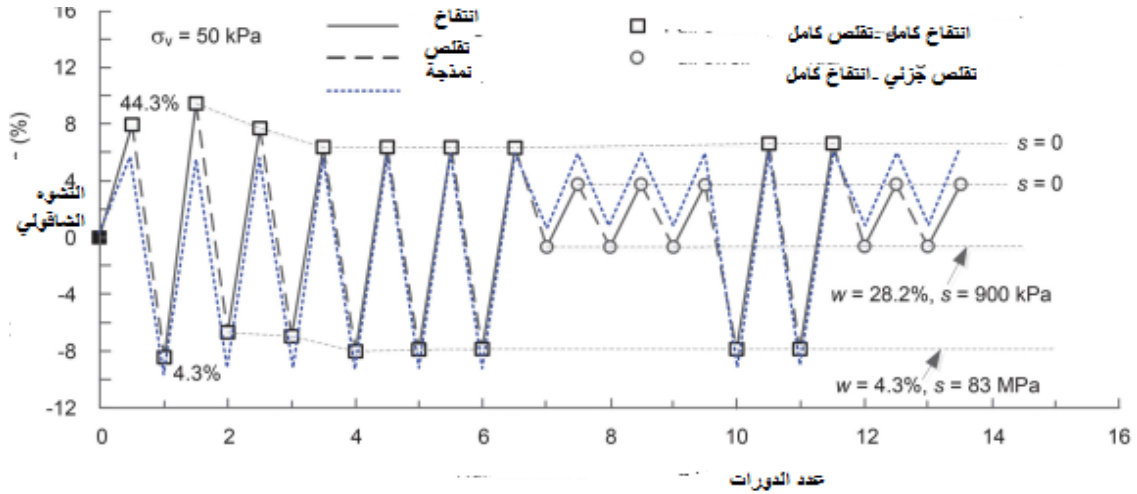


الشكل [19.2] تقييم المسامية الكلية والمجهرية مع الزمن -نتائج النمذجة والتجارب [60] .

ونتيجة الدراسة كما يبين الشكل [19.2] إن المسامية الكلية تنقص نتيجة زيادة درجة الاشباع وانخفاض الامتصاص، وأكد على أهمية اختيار القيم المناسبة لمعامل انضغاطية المسامية الدقيقة K_{micro} وتأثيره على سلوك التغير الحجمي للتربة فالقيم المنخفضة لها تعطي انضغاطية كبيرة مع تناقص المسامية الكلية.

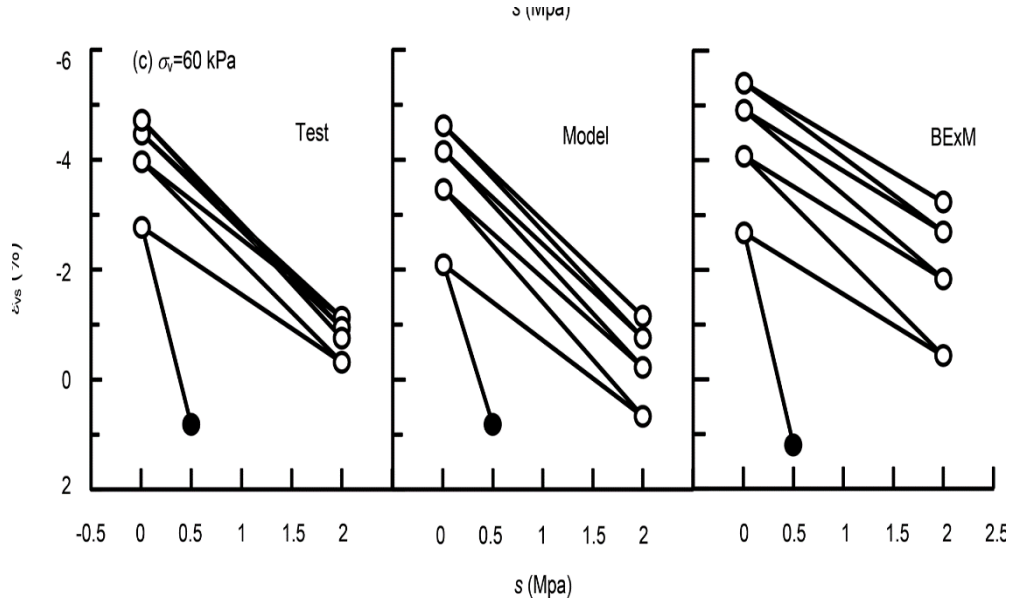
-درس [61] سلوك تغيير الحجم للتربة المنتفخة و تشوهات الانتفاخ والتقلص اثناء دورات ترطيب - تجفيف ، حيث ميز نوعين من التغيرات ، الأولى التشوهات قابلة للانعكاس (المرنة) وتتعلق بقيمة الامتصاص والمحتوى المائي وتؤدي للتقلص عند التجفيف والانتفاخ عند الترطيب والثانية غير قابلة للانعكاس (اللدنة) وهي تظهر بشكل مبكر خلال دورات الترطيب والتجفيف وتتخامد مع زيادة عدد الدورات ، ويمكن التعبير عن هذا السلوك عن

طريق نموذج ثنائي المستوى، تم تطوير نموذج كامل يجمع الصياغة المقدمة الأساسية وكان نموذج BBM للتربة المنتفخة ذات اللدونة المنخفضة، تم تقديم الإجراء لمعايرة معلمات النموذج من التشوهات الظاهرية المقاسة معملياً ، والتي لها بنية مجهرية تم التحقق من صحة النموذج من خلال محاكاة مجموعتين من تجارب الآدومتر مجموعة مع التحكم في الامتصاص الدوري ومجموعة الاختبارات المنقوعة ، حيث أخذ النتائج التجريبية من اختبارات تجريبية تم إجراؤها من قبل [12] وقيم الامتصاص تم استنتاجها من علاقة المحتوى المائي والامتصاص ، وقد توافقت النتائج التجريبية مع النتائج العددية سواء كانت دورات انتفاخ - تقلص كاملة أو دورات انتفاخ - تقلص جزئي ، وقد وجدت بعض نقاط الانحراف بين النتائج العددية والتحليلية وهذا يكون بسبب عدم دقة المحتوى المائي مع الامتصاص كما هو واضح في الشكل [20.2] .



الشكل [20.2] محاكاة اختبار الترطيب - التجفيف الذي يتضمن التقلص الكامل - الجزئي (9)

كما اجريت نمذجة للتجارب التي تم إجراؤها بواسطة Nowamooz, H., Mrad, (2009) حيث كانت التجارب على جهاز الآدومتر مع التحكم بالامتصاص الذي كانت قيمه من (0-2MPa) وتحت ضغوط شاقولية متنوعة وقد كانت النتائج العددية متقاربة مع القيم التجريبية كما هو واضح في الشكل [21.2] .



الشكل [21.2] محاكاة اختبار الترطيب – التجفيف مع التحكم بالامتصاص (9)

بنهاية الدراسة التحليلية نجد بعض النتائج:

– أن نموذج Cam-Clay لا يمكنه محاكاة مرحلة التفريغ في اختبارات الآدومتر، وبالتالي لا يمكن محاكاة اختبارات الانتفاخ.

– نموذج ألونسو BBM قادر على نمذجة ظاهرة التفريغ والانتفاخ للتربة .

الفصل الثالث

الدراسة التجريبية

وصف الجهاز لتطبيق الدورات

3-1-دورات الانتفاخ والتقلص:

تبين في الدراسات السابقة وجود بعض الأبحاث التجريبية للتربة الغضارية المنتفخة المعرضة لدورات متعددة من الترطيب والتجفيف خلال السنوات الماضية، وبعض الاقتراحات لتطبيق دورات الانتفاخ والتقلص مخبرياً، منها ما اعتمد على تغيير موضع العينة والتحميل المطبق مما أثر على نتائج التجربة في مرحلة التجفيف، والقسم الآخر طبق مرحلة التجفيف دون الحاجة لتغيير موضع العينة والحمولات المطبقة، سنوضح فيما يلي الدراسات والتقنيات المقترحة فيها

3-2-الجهاز المستخدم في التجربة

في هذا البحث جهزت عينات التربة الغضارية المنتفخة من منطقة الوعر في محافظة حمص، وطبقت عليها دورات الترطيب والتجفيف باستخدام جهاز التشديد أحادي البعد (الآدومتر) .

دورات الترطيب طبقت وفق مبدأ النقع ، غمر العينات بالمياه وإشباعها بشكل كامل لمدة عشرة أيام حتى تثبت قيمة تشوهات التربة وانتفاخها، أما مرحلة التجفيف فقد صمم جهاز تسخين يركب على حلقة الآدومتر ، و يرفع درجة حرارة العينة لمدة عشرة أيام (مرحلة التجفيف) ودرجة الحرارة المحددة مسبقاً على المؤقت وفيما يلي شرح لمكونات جهاز التسخين :

-3-2-1-جهاز التسخين المصمم للتجفيف:

يتألف الجهاز من :

1- سخان حلقي : وهو عبارة عن وشيعة حلقية تحيط بحلقة الآدومتر التي تحوي العينة الشكل [5.4]، يحيط السخان بحلقة التشديد كما في الشكل [1.3] ويقوم بتسخين حلقة التشديد لدرجة الحرارة المطلوبة التجفيف المطلوبة وفي تجربتنا عشرة أيام ولدرجة حرارة 90° .

من خلال تسخين الحلقة المصنوعة من المعدن التي توضع فيها العينة تنتزع الحرارة للتربة المتوضعة داخلها ويتبخر ماء المسام تدريجياً ،والعينة محاطة بطوق التسخين مما يضمن توزع الحرارة المتجانس ضمن العينة من كافة الجهات وبالتالي الوصول لحرارة متجانسة في كامل العينة .



الشكل [1.3] السخان يحيط بحلقة الآدومتر .

2- حساس حراري:

وهو عبارة عن أداة استشعار تعمل على كشف الحالة المحيطة الفيزيائية، ويقوم بتحويل الإشارات الملتقطة إلى نبضات يمكن قياسها بواسطة جهاز يحدد درجة الحرارة المحيطة كما هو واضح في الشكل التالي [6.4]. ومن ميزاته أنه يثبت داخل العينة ضمن حلقة التشديد في مرحلة الترطيب والتجفيف مهما كانت حالة العينة (رطبة، جافة، مشبعة) ، حيث تم صنع ثقب ضمن حلقة التثبيت لعينة التشديد تسمح بإدخال الحساس ووضعه في المكان الذي نريده ضمن العينة كما في الشكل [3.3]، مما يضمن دقة نتائج التجربة.



الشكل [2.3] الحساس الحراري .



الشكل [3.3] يبين تموضع الحساس والسخان الحراري.

3-جهاز التسخين الحراري:

وهو لمعايرة وضبط درجة حرارة التربة ورفع درجة حرارة حلقة الآدومتر للدرجة المطلوبة، تحدد عليه درجة الحرارة المطلوبة التي نريد التسخين لعندها كما هو واضح في الشكل [4.3] ويعمل طول فترة تجفيف العينة وهي عشرة أيام في تجربتنا، دون انقطاع للمحافظة على حرارة العينة للمدة التي نريدها:



الشكل [4.3] جهاز التسخين الحراري .

بواسطة هذا الجهاز نقوم بمعايرة درجة الحرارة حيث يوجد إشارتين لزيادة درجة الحرارة وإنقاصها وبعد تحديد الدرجة المطلوبة يضيء الزر الأخضر ويبدء السخان بالعمل والتسخين للحرارة المطلوبة وللمدة التي نريدها.

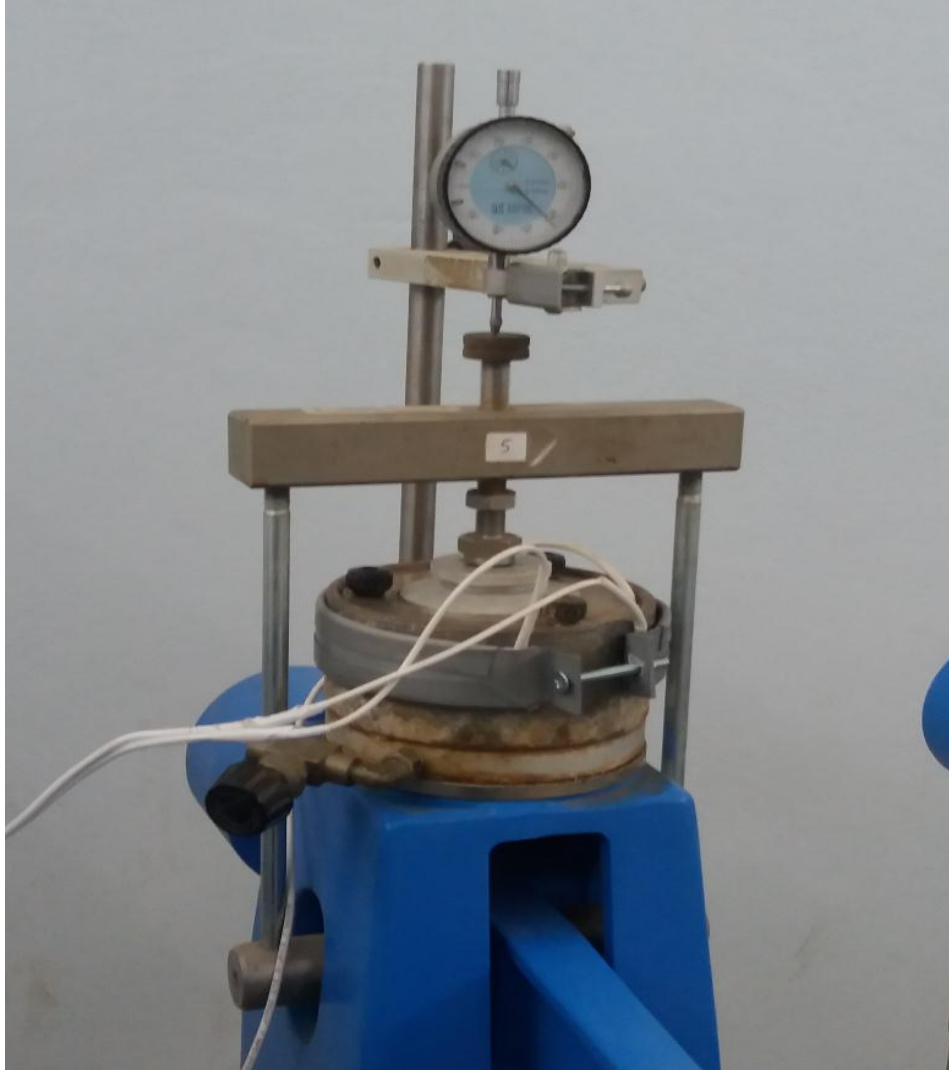
4- صندوق معدني :

وهو عبارة عن صندوق معدني يحيط بجهاز التشديد ويحفظ العينة ضمن درجة الحرارة المطلوبة ويعزلها عن درجة حرارة الجو المحيط كما هو موضح في الشكل [5.3]:



الشكل [5.3] الحساس الحراري .

ويبين الشكل [6.3] كيفية وصل الجهاز مع عينة التشديد لتطبيق دورات التجفيف.



الشكل [6.3] الحساس الحراري

استخدم في هذا البحث تربة غضارية تم إحضارها من منطقة الدراسة في منطقة الوعر في محافظة حمص في سورية، يتناول هذا الفصل التجارب المخبرية لتحديد الخواص الفيزيائية وبعض الخواص الميكانيكية لتربة الموقع الغضارية :

3-3- تجارب الخواص الفيزيائية والقرائن المصنفة للتربة:

تم إجراء التجارب المخبرية اللازمة لتحديد الخواص الأساسية للتربة الطبيعية المستخدمة في البحث، حيث نفذت تجارب تحديد الخواص الفيزيائية والميكانيكية في مخبر ميكانيك التربة في كلية الهندسة المدنية في جامعة البعث ، نعرض فيما يلي نتائج هذه التجارب :

1- تجارب الخواص الفيزيائية (الرطوبة الطبيعية، الوزن الحجمي الطبيعي، الوزن النوعي، التحليل الحبي بالترسيب).

2- تجارب القرائن المصنفة للتربة (حد السيولة، حد اللدونة، حد التقلص).

3- تجارب الخواص الميكانيكية (تجربة القص).

3- تجارب الانضغاط مع الزمن (التشديد) في جهاز الأدومتر من أجل الحمولات التالية:

$$(0,25-0.5-1-2-4 \text{ Kg/cm}^2).$$

وفيما يلي نتائج كل تجربة من التجارب:

3-3-1- نتائج تجارب الخواص الفيزيائية والقرائن المصنفة للتربة:

تم إجراء مجموعة من التجارب المخبرية لتحديد الخواص الفيزيائية للتربة الطبيعية المستخدمة في البحث وهي كالآتي:

- تجربة الرطوبة الطبيعية وفق المواصفة (ASTM D 2216):

تم تحديد الرطوبة الطبيعية للتربة وقد تراوحت قيم الرطوبة (12%).

-تجربة الوزن الحجمي الطبيعي وفق المواصفة (ASTM D 2216):

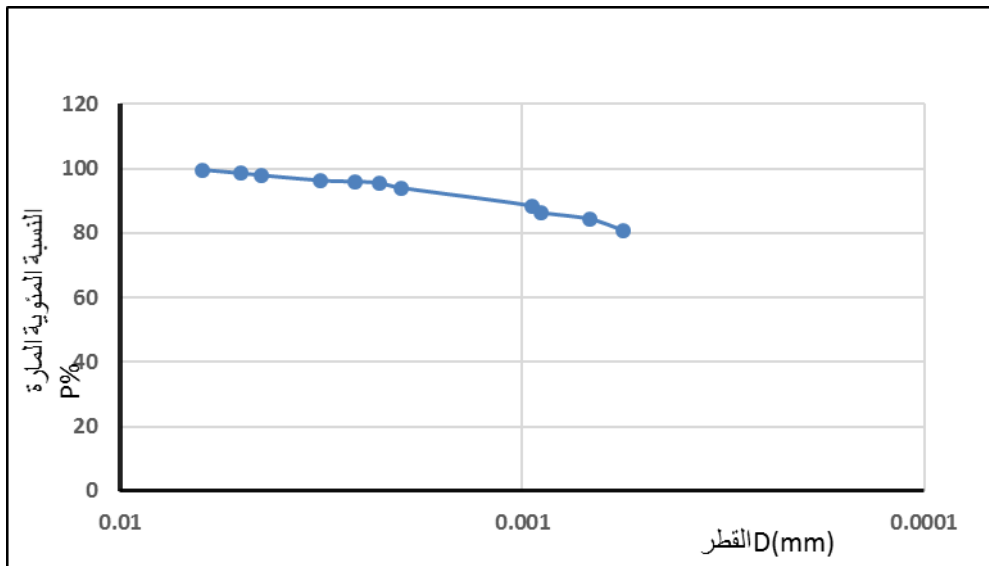
تم إجراء تجربة الوزن الحجمي للتربة الطبيعية (1.87 gr/cm^3).

-تجربة الوزن النوعي وفق المواصفة (ASTM D 2216):

تم إجراء تجارب الوزن النوعي لعينات التربة الطبيعية المأخوذة من الموقع .

-تجربة التحليل الحبي بالترسيب وفق المواصفة (ASTM D 2216):

إن التربة المدروسة من الترب الغضارية الناعمة لذلك تجرى عليها تجربة التحليل الحبي بالترسيب (الهيدروميتر) حيث تطبق على الترب ذات الأقطار أقل من $80 \mu\text{m}$:



الشكل [1.3] منحنى التدرج الحبي .

يبين الشكل نتائج التحليلي الحبي بالترسيب على التربة الطبيعية وتظهر معظم النتائج أن معظم اقطار الحبات تراوحت بين (0.000561-0.0062mm):

- تجربة حدود أتربرغ لتحديد حد السيولة وحد اللدونة للتربة وتم تحديد حد السيولة وحد اللدونة وحد النقل وقرينة اللدونة الشكل [2.3] :



الشكل [2.3] تجربة حدود أتربرغ

يلخص الجدول (1-1) نتائج تجارب الخواص الفيزيائية والقرائن المصنفة لتربة الموقع المدروسة (تربة حمص منطقة الوعر):

الجدول (1-3) الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للتربة:

خاصة التربة	نوع التربة
الوزن الحجمي gr/cm^3	1.87
الوزن النوعي	2.822
حد السيولة %	66.7
حد اللدونة %	27.6
دليل اللدونة %	39.4
الرطوبة الطبيعية	12%
حد النقل	18%

و بناءً على تجارب التحليل الحبي وتجربة حدود أتربرغ، تصنف التربة المدروسة إلى غضار من نوع إيليت حسب مخطط كاساغراندي لتصنيف الترب الناعمة .

3-4- تجارب الخواص الميكانيكية:

3-4-1- تجربة القص المباشر:

تم إجراء تجارب القص المباشر المصروف وتشكيل عينات اختبار القص المباشر وتنفيذ تجارب القص المباشر على هذه العينات باستخدام جهاز القص المباشر الالكتروني المبين في الشكل [3.3]:



الشكل [3.3] جهاز القص المباشر .

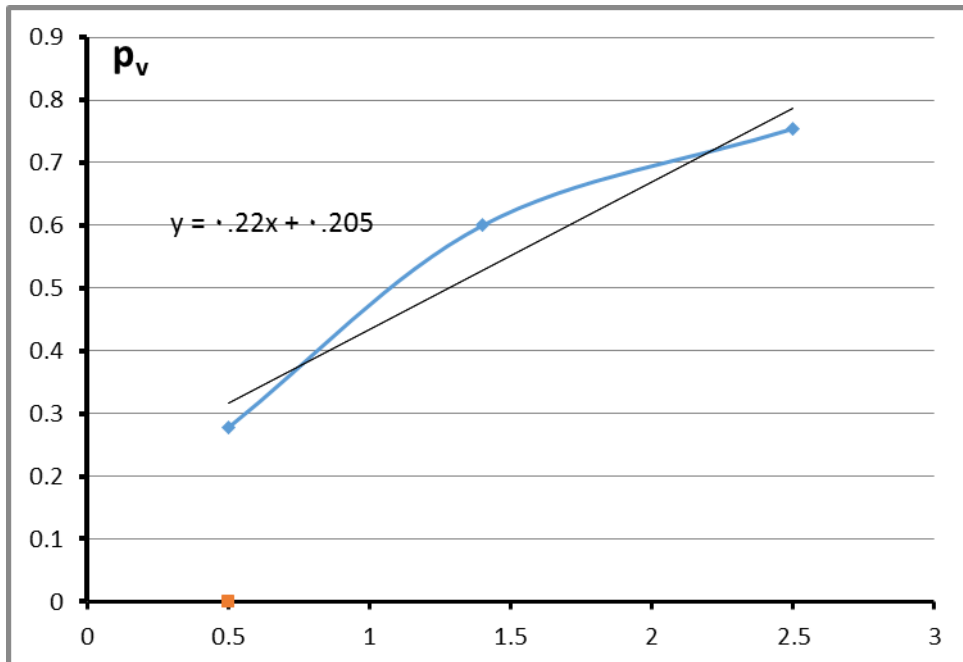
قمنا بتشكيل 3 عينات حيث رصت كل عينة في حلقة جهاز القص المربعة المقطع (6*6cm) وبارتفاع / 2cm / وطبق انتقال أفقي متزايد حتى الانهيار وبسرعة ثابتة مقدارها /0.125 mm/min/ من أجل كل إجهاد ناظمي.

يوضح الشكل التالي عينة التربة بعد تشكل سطح القص:



الشكل [4.6] تشكل مستوي الانهيار في تجربة القص المباشر .

من البيانات قمنا باستنتاج مستقيم كولومب كما في الشكل التالي:



وبإنشاء مخططات القص واستنتاج مستقيم كولومب استنتجنا خواص القص:

$$C=20.5\text{Kn/m}^2, \Phi=22^\circ$$

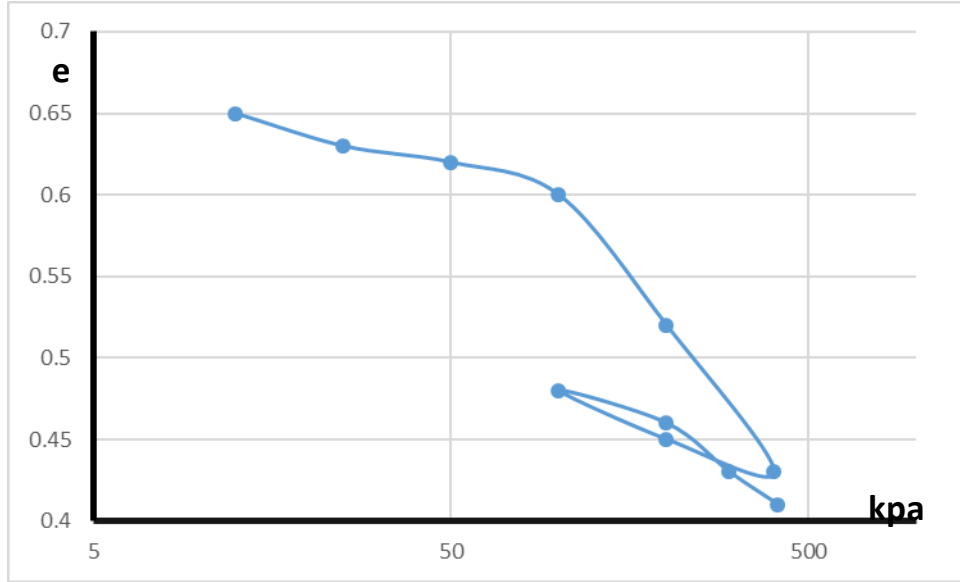
3-4-2- تجربة التشديد للتربة المدروسة:

تجرى دراسة انضغاط التربة تجريبياً بواسطة جهاز الآدومتر ، حيث يتم اختبار العينة بشكل محصور جانبياً أي دون إمكانية للتوسع الجانبي، ومحملة محورياً بحمولات متزايدة حتى تلاشي ضغط ماء المسام الزائد ، عند دراسة انضغاط التربة تحت الحمولة الخارجية يجب أن يحذف تأثير جميع القوى الأخرى التي تؤثر ، لذلك اقترح دراسة انضغاط التربة في شروط الإشباع المطلق بغمر العينة كلياً ، تجربة التشديد للتربة المدروسة بتشكيل عينات وفق معطيات أولية موجودة في الجدول (2-3) ، وباستخدام جهاز الآدومتر في مخبر ميكانيك التربة في جامعة البعث :

الجدول (2-3) المعطيات الأولية لتجارب التشديد في تربة الوعر:

ارتفاع العينة البدائي	20mm
الوزن النوعي	2.822
وزن حلقة التشديد فارغة	117.214
وزن العينة (رطبة) مع الحلقة قبل التشديد	297.931
وزن العينة (جافة) مع الحلقة بعد التشديد	423.921
الوزن الحجمي الرطب	2.2512
الوزن الحجمي الجاف	0.178 gr/cm3
رطوبة الاشباع	19.2%

وبعد إجراء تجربة الانضغاطية على التربة مع مراحل متعددة من التحميل والتفريغ استنتجنا منحنى الانضغاطية:



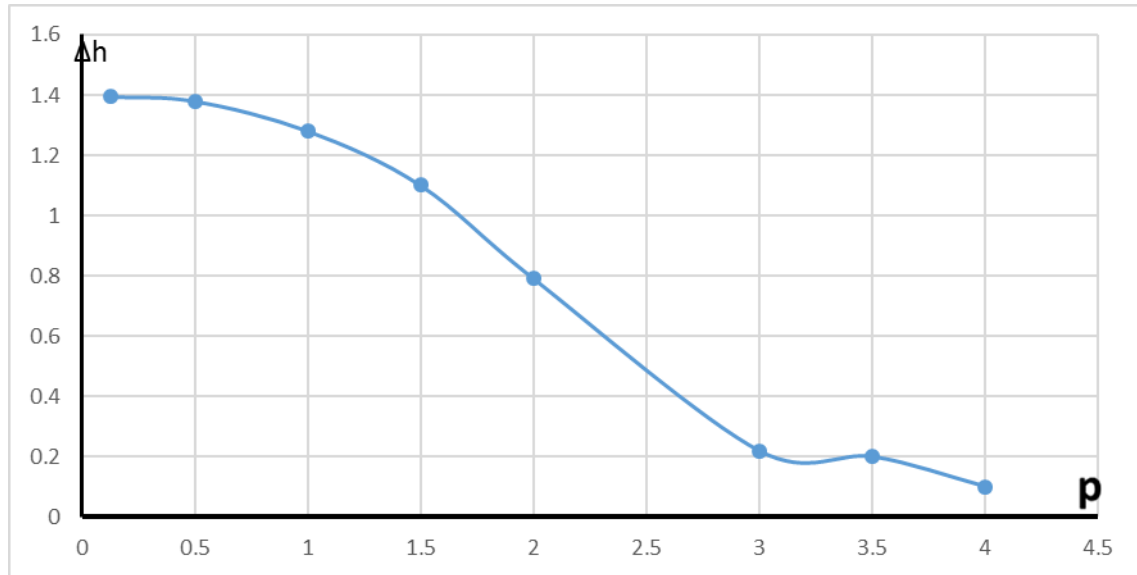
الشكل [5.6] منحنى الانضغاطية .

واستنتجنا من هذا المنحني عوامل الانضغاطية المطلوبة:

دليل الانتفاخ للتربة: $C_s = 0.083$ ، $C_c = 0.282$ معامل الانضغاط.

تجربة ضغط الانتفاخ الحر للتربة:

في هذا الاختبار يتم وضع العينة في جهاز الآدومتر، وتم السماح لها بالانتفاخ بحرية تامة تحت حمل مقداره 4 kg/cm^2 ، وحساب مقدار الانتفاخ النسبي، ويتم إضافة أحمال للعينة حتى تعود لارتفاعها الأصلي، ويحسب ضغط الانتفاخ بقسمة مجموع الأحمال على مساحة العينة.



الشكل [7.6] منحنى دورات الترطيب – التجفيف الأساسي دون تحميل

ضغط الانتفاخ : $29.4 \text{ kpa} = 0.3 \text{ kg/cm}^2$

3-5- تطبيق دورات الترطيب والتجفيف :

جهزت عينة التربة الغضارية المنتفخة المدروسة من منطقة الوعر في محافظة حمص وهي عينة سليمة على عمق 5m ، وفق رطوبة أولية %12 ، ووضعت بجهاز الآدومتر وتم وضع حلقة التشديد محاطة بحلقة السخان ، وثبت الحساس داخل عينة التربة من أجل تقدير درجة حرارة العينة .

وأجريت التجربة كما يلي:

- وضعت عدة عينات من التربة بحلقة التشديد وأشبعنا بالماء في دورة الترطيب الأولى لمدة عشرة أيام وسجلت القراءات حتى وصلت لأقصى انتفاخ و ثبتت قيمته أو ما يسمى الانتفاخ الحر النسبي، استمرت هذه المرحلة عشرة أيام.

- بعد ذلك بدأت مرحلة تجفيف العينة وذلك بتصريف مياه الغمر من فتحة التصريف الجانبي لحلقة التشديد وتشغيل جهاز التسخين بدرجة حرارة تقارب 75 درجة مئوية مع أخذ قراءات المؤشر حيث تنقلص العينة ويتناقص ضغط ماء المسام، واستمرت هذه العملية لمدة عشرة أيام حتى تقلصت العينة ووصلت لمرحلة استقرار المؤشر وهذا يعني استقرار تشوهات التقلص، ظل جهاز التجفيف يعمل لعدة أيام حتى يتم تجفيف العينة بشكل كامل ويتبخر ماء المسام الموجود.

- بعد ذلك بدأت دورة الترطيب الثانية حيث غمرت العينة بالكامل بالمياه لعشرة أيام مع أخذ القراءات المتتالية للمؤشر، مع الحفاظ على مستوي ماء الغمر ثابت وذلك بوصله بمصدر مائي مستمر، وتم تكرار هذه الدورات حتى وصلت العينة لمرحلة التوازن حيث انخفضت تشوهات الانتفاخ والتقلص ولم تعد التربة تعطي أي تغييرات وهو المطلوب من هذه الدراسة.

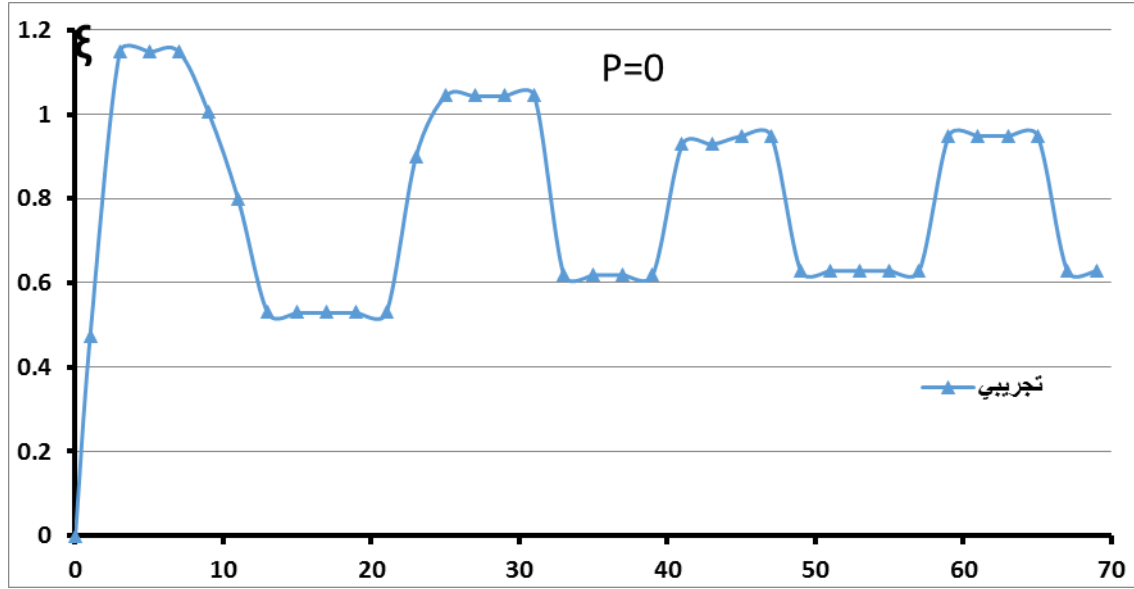
وبين الشكل التالي عينة التشديد بعد نهاية دورات الترطيب والتجفيف حيث تظهر التشققات على سطح العينة وانكماش العينة:



الشكل [6.6] عينة التشديد بعد نهاية دورات الترطيب والتجفيف .

3-5-1 دورات الترطيب والتجفيف دون تحميل :

طبقت دورات الترطيب والتجفيف دون تحميل العينة ، وبعد تسجيل القراءات وانتهاء الدورات ، يبين الشكل التالي مخطط توضيحي للتغيرات الشاقولية التي تعرضت لها العينة خلال الزمن مع تطبيق دورات الترطيب والتجفيف:



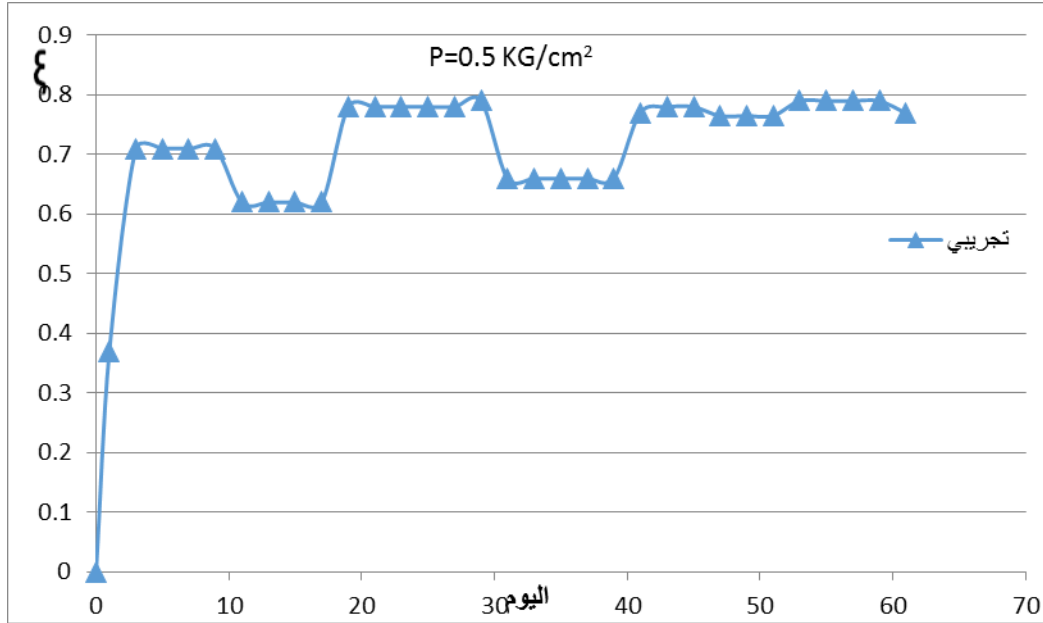
الشكل [7.6] منحنى دورات الترطيب - التجفيف الأساسي دون تحميل

من قراءة المنحنيات السابقة نلاحظ إن شدة تطور الانتفاخ أكبر من التقلص. وهناك زيادة كبيرة في تشوهات الانتفاخ خلال اليوم الأول، ولكن تستقر تدريجياً حتى نهاية الدورات، السمة المميزة لهذا السلوك هي أن مقدار الانتفاخ في دورة الترطيب الثاني والثالث يقارب التقلص باستثناء إن الانتفاخ الأكبر الذي يحدث للتربة في أول دورة ترطيب هو التشوه الحر للتربة دون تحميل خارجي، ولتفسير هذا السلوك تبين إن نوع التربة لها تأثير كبير على شدة وحجم سلسلة الانتفاخ ففي البداية، تمتص التربة كمية كبيرة من الماء بشكل مكثف تقريباً، ووفقاً لذلك، يتم الوصول إلى التشوه الأقصى للانتفاخ بشكل سريع نسبياً، أثناء تطور سلسلة الانتفاخ، تتوقف التربة عن امتصاص الماء، مع استمرار التشوه في النمو ، وأثناء التقلص ، يتوقف تشوه التربة بينما يستمر الماء في التبخر من عينة التربة. في حالة عدم وجود حمل خارجي في الدورة الأولى، يصل تشوه الانتفاخ خلال الساعات الست الأولى إلى أكثر من نصف القيمة المستقرة النهائية. بعد ذلك، بعد الوصول لمرحلة ثبات المنحنى قمنا بوضع عينة جديدة من نفس التربة في جهاز التحميل وطبقنا عليها حمولات متعددة مع تطبيق دورات الترطيب والتجفيف كما في الفقرة التالية:

3-5-2- تطبيق إجهاد 0.5 Kg/cm^2

تم وضع العينة في جهاز الآدومتر مع تطبيق دورات الترطيب والتجفيف وتطبيق إجهاد قيمته

0.5 kg/cm² حيث تم الوصول لمرحلة التوازن بعد تطبيق أربع دورات ترطيب وأربع دورات تجفيف وكان المخطط كالتالي :



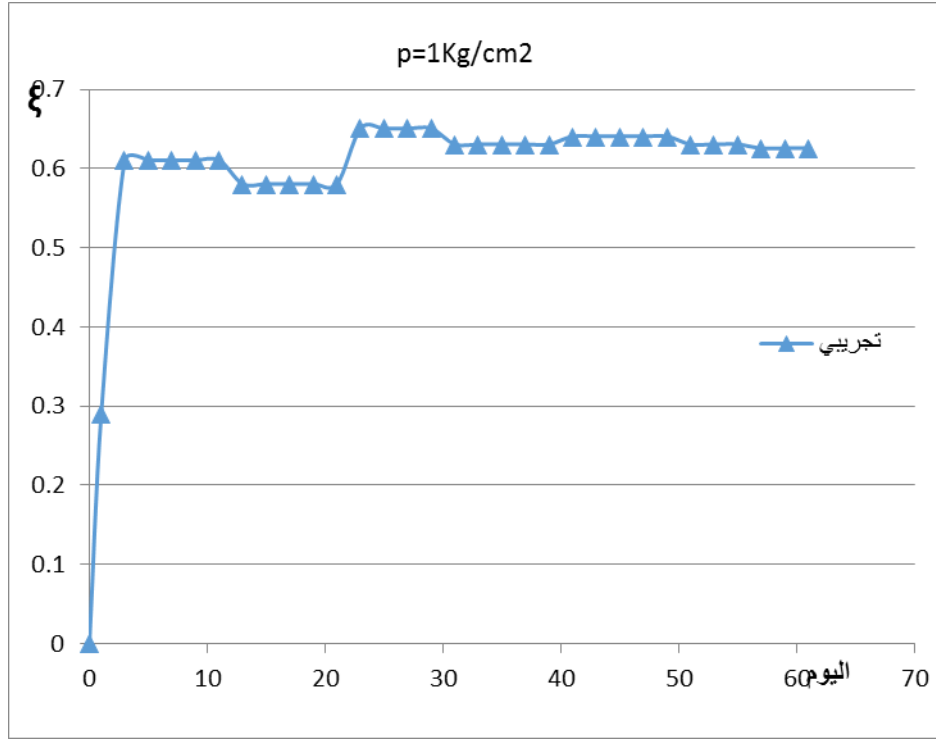
الشكل [8.6] منحنى دورات الترطيب والتجفيف مع إجهاد 0.5 Kg/cm²

من المنحنى نلاحظ وصول العينة لمرحلة الثبات والتوازن بحيث لا تبدي تغييرات حجمية واضحة بعد تطبيق ثلاث دورات ترطيب وثلاث دورات تجفيف.

تجدر الإشارة أيضاً إلى أنه مع زيادة عدد دورات ترطيب- تجفيف ، يزداد تشوه الانتفاخ إلى حد ما. أما تشوه تقلص التربة فهو لا يتبع هذا المسار، تم تحقيق استقرار تشوهات تقلص في غضون 40 يوماً وحرارة التجفيف متساوية تقريباً.

3-5-3- تطبيق إجهاد 1 kg/cm²:

تم وضع العينة في جهاز التشديد مع تطبيق دورات الترطيب والتجفيف وتطبيق إجهاد قيمته 1 kg/cm² ، وتسجيل قراءات مؤشر التشوهات الشاقولية في كل المراحل ، حيث تم الوصول لمرحلة التوازن بعد تطبيق أربع دورات ترطيب وأربع دورات تجفيف وكان المخطط كالتالي :



الشكل [9.6] منحنى دورات الترطيب والتجفيف مع إجهاد 1 Kg/cm^2

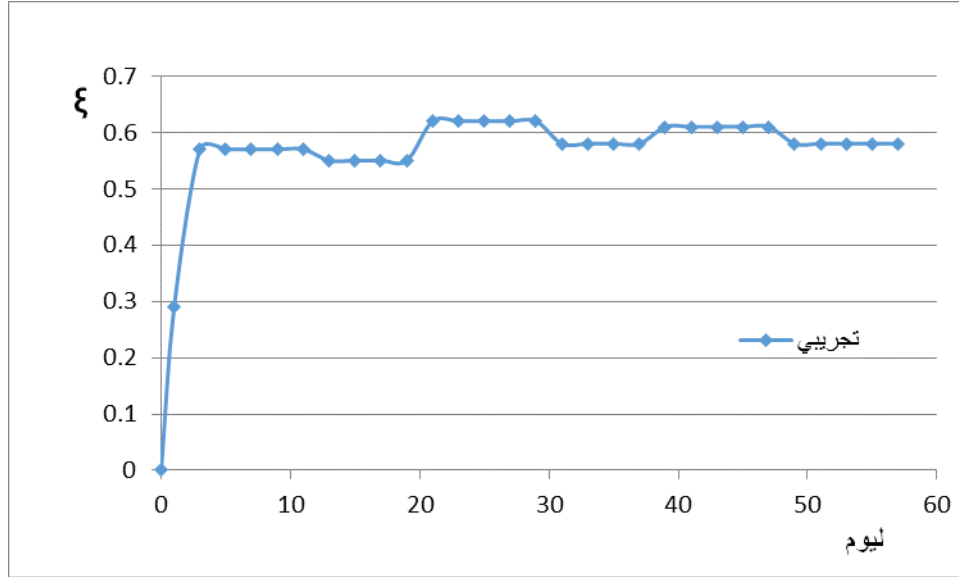
نلاحظ من المنحنيات السابقة أنه مع زيادة قيمة الضغط المطبق ، فإن فترة تثبيت تشوه النقص تتناقص تدريجياً ، ومع زيادة عدد دورات الترطيب تنخفض تشوهات النقص أي تشوه النقص المستقر النهائي يكون في الدورتين الثالثة والرابعة من الترطيب.

يتضح من المخطط انخفاض في قيمة الانتفاخ النسبي الأولي لكن بعد الدورة الأولى يعود تشوه الانتفاخ ويرتفع بنسبة صغيرة لأن التربة في البداية نتيجة للتحميل لا تمتص كمية كبيرة من المياه بل تتقارب جزيئاتها من بعضها وتعطي قيمة صغيرة من الانتفاخ ومع إعادة الترطيب تمتص التربة كمية كبيرة من الماء وتبدي انتفاخاً أكبر من الدورة الأولى ، بعكس النقص الذي يبلغ قيمة مرتفعة نسبياً ويعود في الدورات التالية وينخفض نسبياً.

وحجم تشوهات الانتفاخ يعتمد أيضاً على تشوهات النقص وكلما زاد حجم تشوهات النقص، زاد تشوه انتفاخ التربة.

3-5-4- تطبيق إجهاد 1.5 kg/cm^2 :

تم وضع العينة في جهاز التشديد مع تطبيق دورات الترطيب والتجفيف وتطبيق إجهاد قيمته 1.5 kg/cm² ،وسجلت قراءات مؤشر التغيرات الشاقولية ،واستقرت التغيرات بعد تطبيق أربع دورات ترطيب وأربع دورات تجفيف حيث وصلت العينة لمرحلة التوازن وكان المخطط كالتالي :

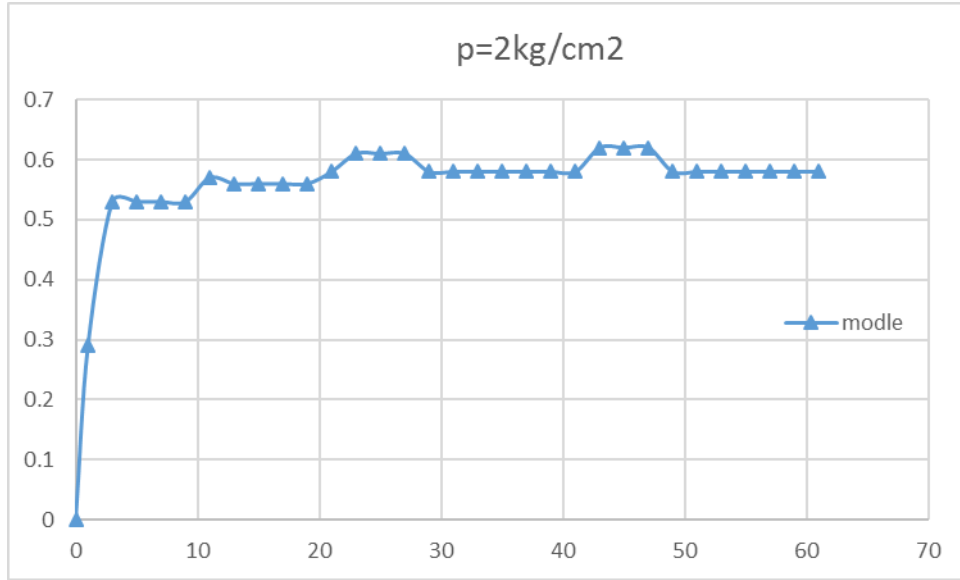


الشكل [10.6] منحنى دورات الترطيب والتجفيف مع إجهاد 1.5 Kg/cm²

نلاحظ في جميع دورات الترطيب ، يزداد تشوه التربة بشكل خطي خلال فترة زمنية كبيرة، وتمتص التربة كمية كبيرة من الماء بشكل مكثف تقريباً لذلك، يتم الوصول إلى التشوه الأقصى للانتفاخ بشكل سريع نسبياً، وتم ملاحظة الطابع المنحني للتغير في تشوهات التقلص فقط عند الاقتراب من فترة تثبيت هذه التشوهات.

3-5-5- تطبيق إجهاد 2kg/cm²

تم زيادة الحمل المطبق على العينة مع تطبيق دورات الترطيب والتجفيف ليصل لإجهاد قيمته 2kg/cm² ، حيث تم الوصول لمرحلة التوازن بعد تطبيق ثلاث دورات ترطيب وثلاث دورات تجفيف وتسجيل قراءات المؤشر في دورات الترطيب والتجفيف كان المخطط كالتالي :



الشكل [11.6] منحنى دورات الترتيب والتجفيف مع إجهاد 2 Kg/cm^2

نلاحظ أنه مع زيادة الحمل من 1.5 إلى 2 كغ/سم²، يقل التشوه بنسبة 29% فقط القوانين التي تحكم التغيرات في التشوهات النسبية للتربة من قيم الضغط في الدورتين الثانية والثالثة تتطابق عملياً بعد قيمة معينة من الضغط ، (لا يحدث تغيير في تشوه تقلص التربة). قيمة هذا الضغط لنوع معين من التربة الانتفاخية ثابت، تتأثر القيمة المستقرة النهائية لتشوهات تقلص وانتفاخ التربة الغضارية بشكل كبير بقيمة الضغط المطبق ، فكلما زادت قيمة الضغط المطبق تنخفض قدرة الامتصاص للتربة وبالتالي تنخفض أيضاً قيمة تشوهات الانتفاخ والتقلص.

- دورات الترتيب وتشوه الانتفاخ تتحدد بالعلاقة التالية بين تشوه الانتفاخ الناتج والزمن كما يلي:

$$\xi_{sw} = -0.0219d^2 + 0.305d + 0.1615$$

حيث : d الزمن بالأيام ، من أجل الدورة الأولى.

- دورات الترتيب وتشوه الانكماش الناتج تتحدد بالعلاقة التالية بين تشوه الانكماش الناتج والزمن كما يلي:

$$\xi_{sh} = \sigma_y d^{\beta_y}$$

حيث : d الزمن بالأيام ، والثوابت الموجودة $\alpha_y = 0.099, \beta_y = 0.614$ ثابتة من أجل الدورة الأولى .

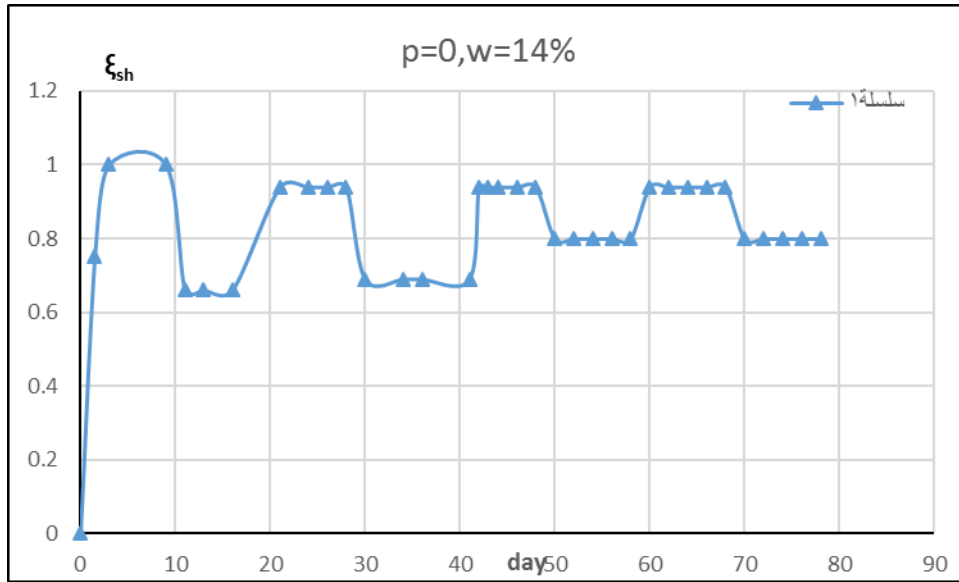
3-6- تطبيق دورات الترطيب والتجفيف وفق الرطوبة الأولية:

تبين في التجارب السابقة التأثير الواضح لرطوبة التربة الأولية 12% على تشوهات الانتفاخ والتقلص ، لذلك تم في هذه الفقرة دراسة تأثير تغيرات قيم الرطوبة الأولية للتربة على التشوهات الشاقولية وسلوك التربة كما يلي :

تم تغيير قيم الرطوبة الأولية للتربة (12%, 21%, 14%) مع تغيير قيم الحمل الانضغاطي لدراسة أثر الرطوبة الأولية على دورات الترطيب والتجفيف ، كما هو مبين في المخططات التالية:

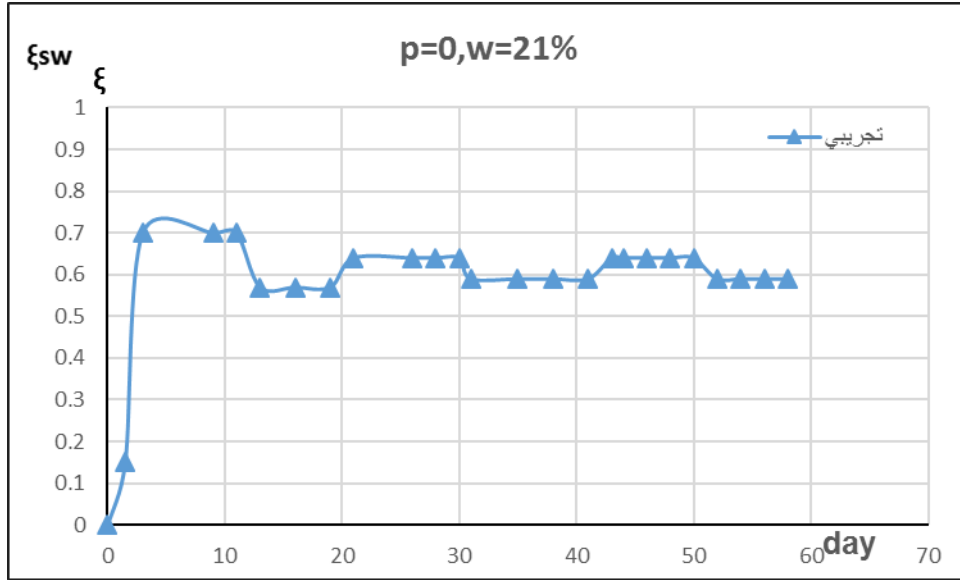
3-6-1 - دورات الرطوبة دون تحميل :

جهزت عينات التربة ووضعت في حلقة التشديد المحاطة بجهاز التسخين لتطبيق دورات الترطيب والتجفيف وفق قيمة رطوبة أولية (14%) ودون تحميل العينة ، وسجلت قراءات المؤشر كما هو واضح في المخطط التالي :



الشكل [12.6] منحنى دورات الترطيب والتجفيف وفق رطوبة 14%

تم تجهيز عينة التربة وفق الشروط السابقة ووفق رطوبة أولية (21%) وطبقت دورات الترطيب والتجفيف دون تحميل ، كما يوضح المخطط التالي :

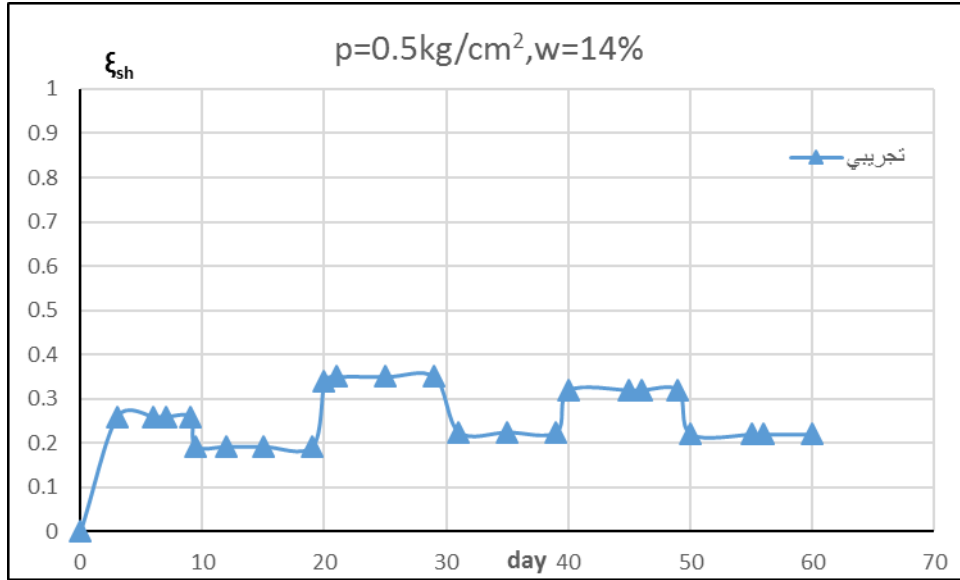


الشكل [13.6] منحنى دورات الترطيب والتجفيف وفق رطوبة 21%

نلاحظ من المخططات السابقة أن القيمة النهائية لتشوهات الانتفاخ والتقلص تعتمد بشكل أساسي على رطوبة التربة الأولية ؛ كلما زاد مدى التباين في الرطوبة ، زاد مقدار تشوه التربة كما يوضح الشكل [22.3].

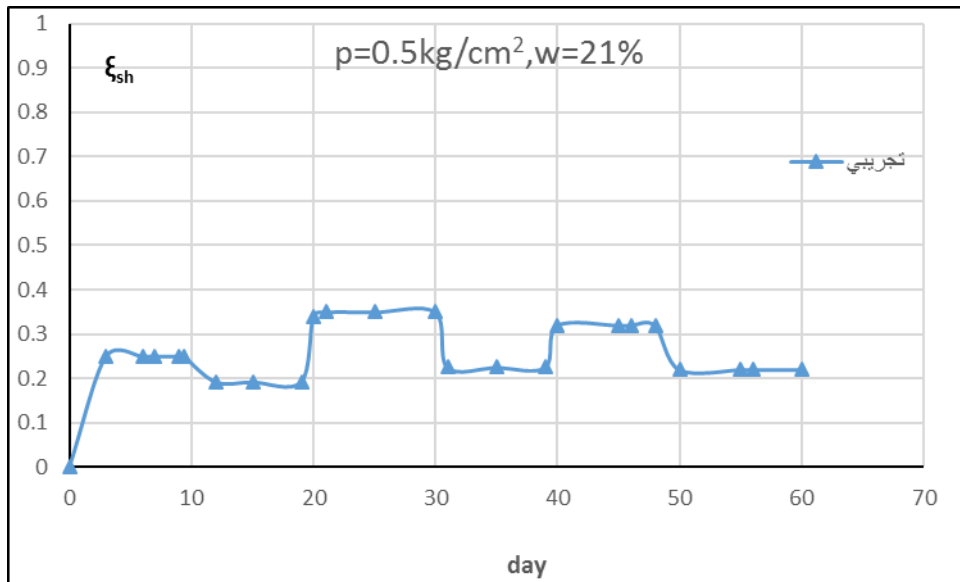
3-6-2 - دورات الترطيب والتجفيف مع تطبيق إجهاد 0.5 Kg/cm^2 :

في هذه المرحلة تم تطبيق دورات الترطيب والتجفيف وفق رطوبة أولية لعينة التربة (14%) والبدء بتطبيق حمل انضغاطي على حلقة التشديد بمقدار 0.5 Kg/cm^2 كما يوضح المخطط التالي :



الشكل [14.6] منحنى دورات الترطيب والتجفيف وفق رطوبة 14%

بعد ذلك شكلت عينة وفق رطوبة أولية (21%) وطبقت حمولة 0.5 Kg/cm^2 ، وطبقت دورات الترطيب والتجفيف كما يوضح المخطط التالي :

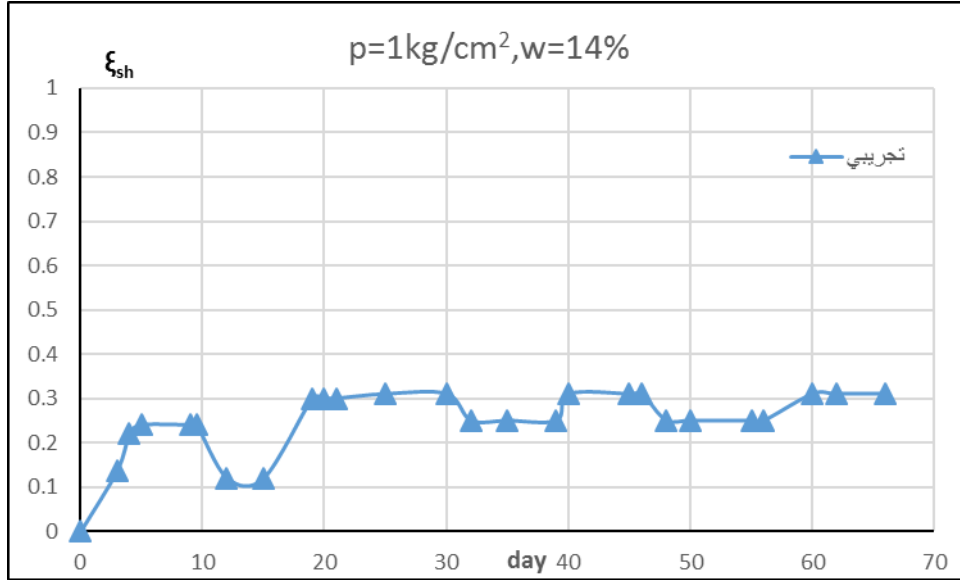


الشكل [15.6] منحنى دورات الترطيب والتجفيف وفق رطوبة 21%

من الملاحظ أن نطاق التغيرات في رطوبة التربة في الدوريتين الثانية والثالثة من دورات الترطيب والتجفيف هو نفسه. ووفقا لذلك ، في هذه الدورات يتم تحقيق نفس مجموعة التغيرات في تشوهات الانتفاخ والتقلص. نتيجة لذلك ، تعتمد القيمة النهائية لتشوهات الانتفاخ والتقلص على مدى التباين في رطوبة التربة ؛ كلما زادت قيمة هذه المجموعة ، زاد تشوهات الانتفاخ والتقلص.

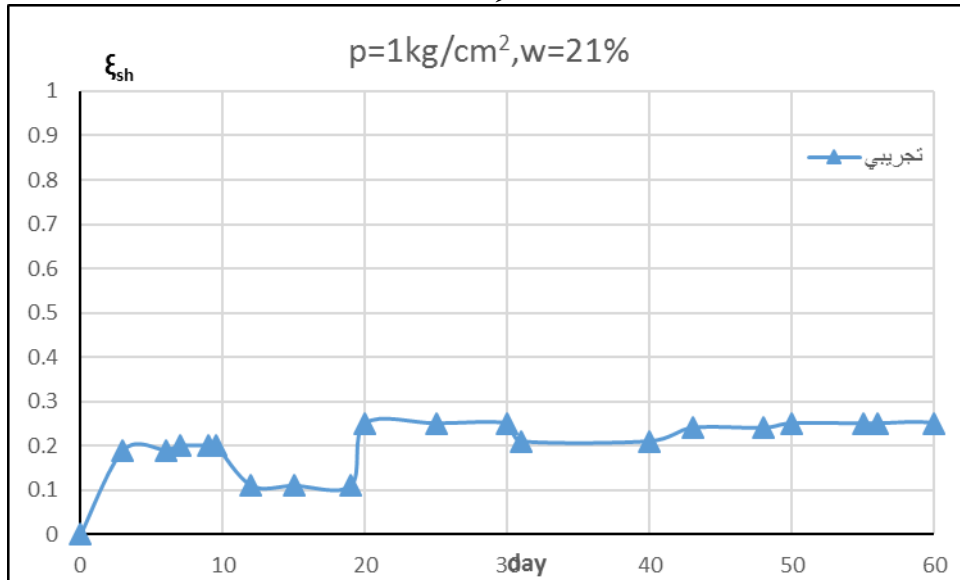
3-6-3 دورات الترطيب والتجفيف مع تطبيق إجهاد 1 Kg/cm^2 :

نظراً لتأثير الرطوبة الأولية وقيمة الإجهادات المطبقة على التربة ، تبين المخططات التالية منحنيات دورات الترطيب والتجفيف لعينة التربة وفق رطوبة أولية (14%)، (21%) ، مع زيادة الحمولة لقيمة 1 Kg/cm^2 :



الشكل [16.6] منحنى دورات الترطيب والتجفيف وفق رطوبة 14%

والمنحنيات التالية من أجل رطوبة أولية $w=21\%$ وإجهاد $P=1 \text{ kg/cm}^2$:

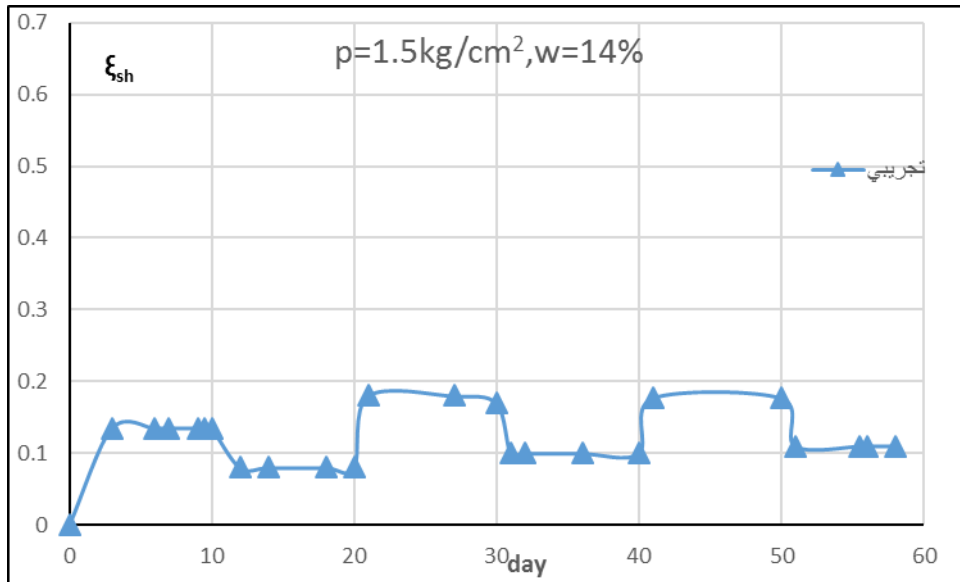


الشكل [17.6] منحنى دورات الترطيب والتجفيف وفق رطوبة 21%.

نلاحظ من المخطط السابق أن قيمة الانتفاخ في الدورة الأولى تكون أقل من الدورتين الثانية والثالثة ، وكذلك تكون أقل من قيمة الانتفاخ عند رطوبة 14% ، مما يبين الأثر الواضح للرطوبة الأولية في قيم تشوهات التربة .

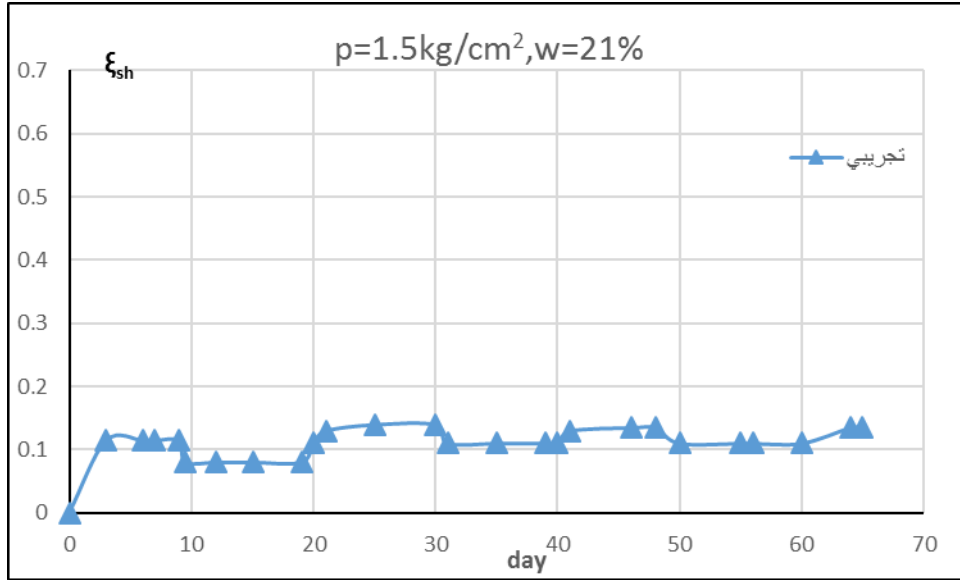
4-6-3 - دورات الترطيب والتجفيف مع تطبيق إجهاد $1,5 \text{ Kg/cm}^2$:

مع زيادة قيمة الحمولة المطبقة حتى $1,5 \text{ Kg/cm}^2$ وفق رطوبة أولية (14%) ، وتطبيق دورات الترطيب والتجفيف حتى استقرت التشوهات في التربة ، سجلت القراءات التالية في المنحني :



الشكل [18.6] منحنى دورات الترطيب والتجفيف وفق رطوبة 14%

وبنفس قيمة الحمل المطبق ، ورطوبة أولية للتربة (21%) طبقت دورات الترطيب والتجفيف في المنحني التالي :

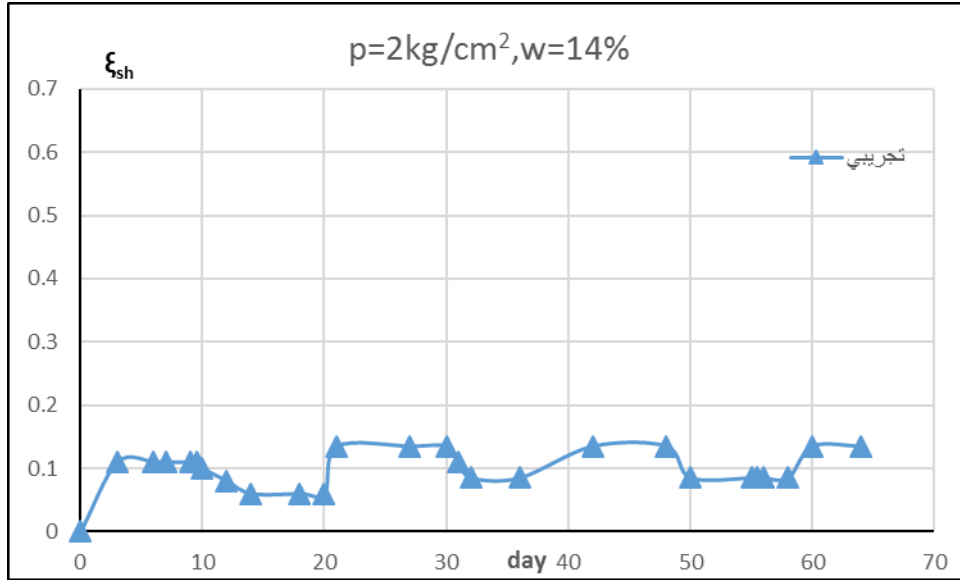


الشكل [19.6] منحنى دورات الترطيب والتجفيف وفق رطوبة 21%.

يتبين من المنحنيات السابقة أن الرطوبة الأولية تؤثر في الدورة الأولى من الترطيب والتجفيف ، أما الدورتين الثانية والثالثة فإن قيم الرطوبة فيها تكون متقاربة وقيم التشوهات متقاربة .

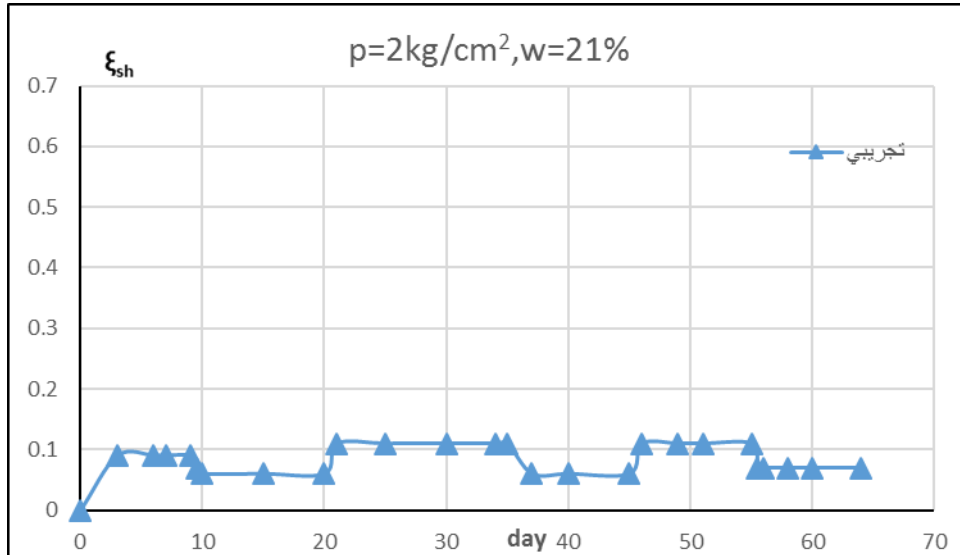
3-6-5 دورات الترطيب والتجفيف مع تطبيق إجهاد 2 Kg/cm^2 :

يبين الشكل التالي منحنيات الترطيب والتجفيف وفق رطوبة أولية (14%) وحمولة 2 Kg/cm^2 :



الشكل [20.6] منحنى دورات الترطيب والتجفيف وفق رطوبة 14%

بعد ذلك شكلت عينة وفق رطوبة أولية (21%) وطبقت دورات الترطيب والتجفيف وطبقت حمولة 2 Kg/cm^2 ، وسجلت قراءات المؤشر كما يلي :

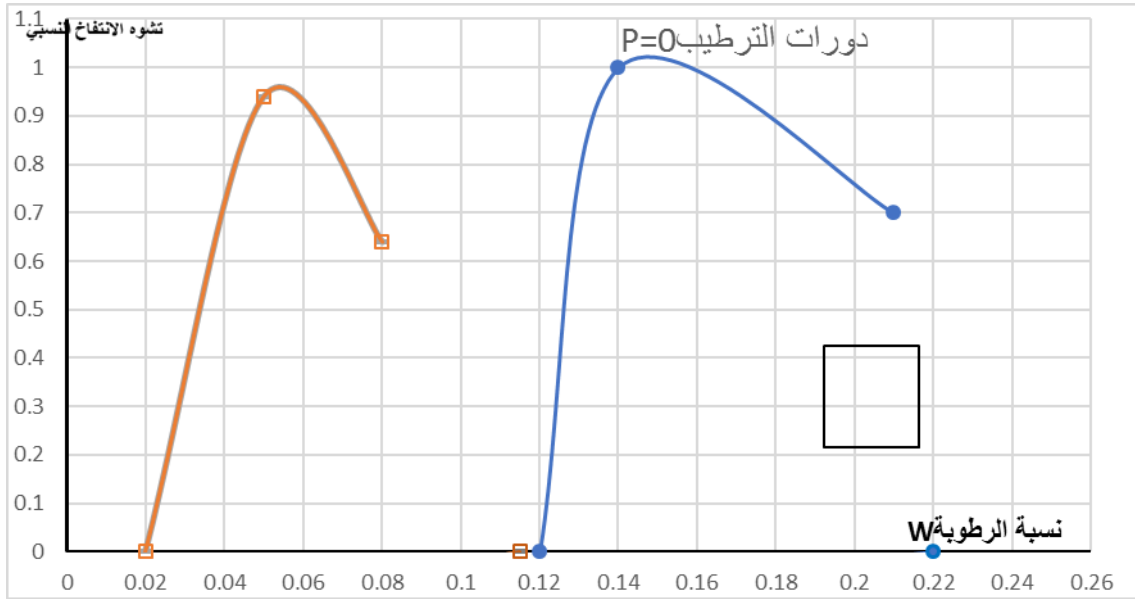


الشكل [21.6] منحنى دورات الترطيب والتجفيف وفق رطوبة 21%

مع تطبيق إجهاد $P=2\text{kg/cm}^2$ يتبين تناقص قيم تشوهات الانتفاخ والتقلص في الدورة الأولى بشكل واضح ، من أجل قيمتي الرطوبة البدائية 14%,21%.

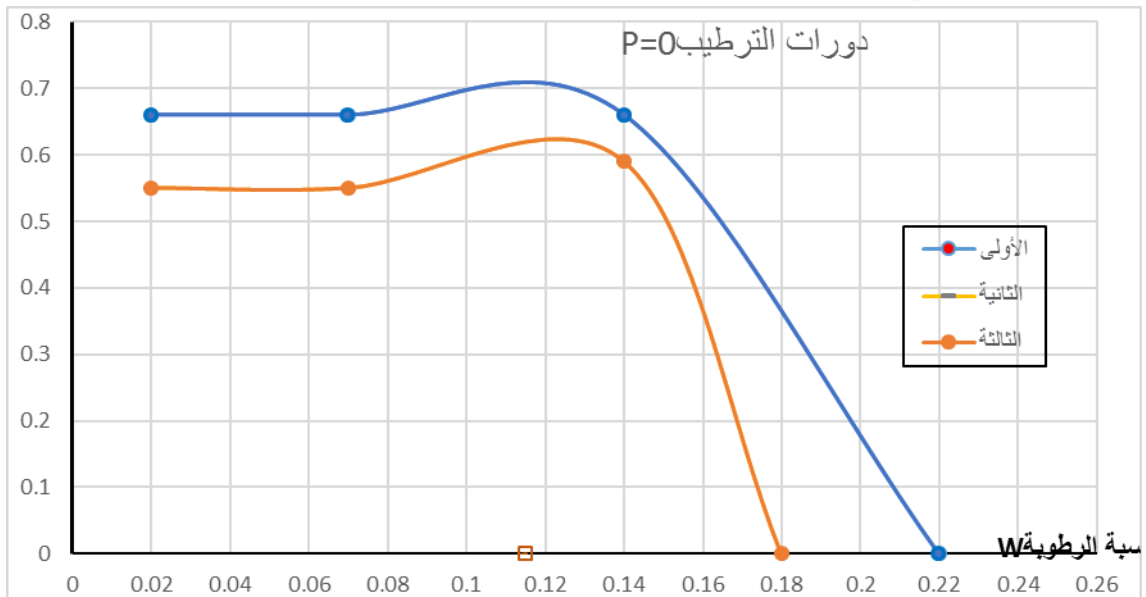
6-6-3 - دورات الرطوبة دون تحميل مع نسبة الرطوبة:

تم بهذه المرحلة تلخيص قراءات المنحنيات السابقة وفق محور يمثل قيم الرطوبة الأولية المتغيرة للعينة (12%, 14%, 21%) ، والمحور الآخر يمثل قيم تشوهات التقلص والانفخاخ الناتجة ودون تطبيق حمولة، كما هو مبين في المخطط:



الشكل [22.6] منحنى دورات الترطيب والتجفيف-انتفاخ دون تحميل.

في المخطط السابق نلاحظ العلاقة الواضحة بين الانتفاخ النسبي ومحتوى الرطوبة الأولية ، تسببت زيادة الرطوبة من (0.14-0.21) وانخفاضها بنفس المجال إلى حدوث تشوهات تقلص بنسبة 44% أكثر من التشوهات المنتفخة في الدورة الأولى .

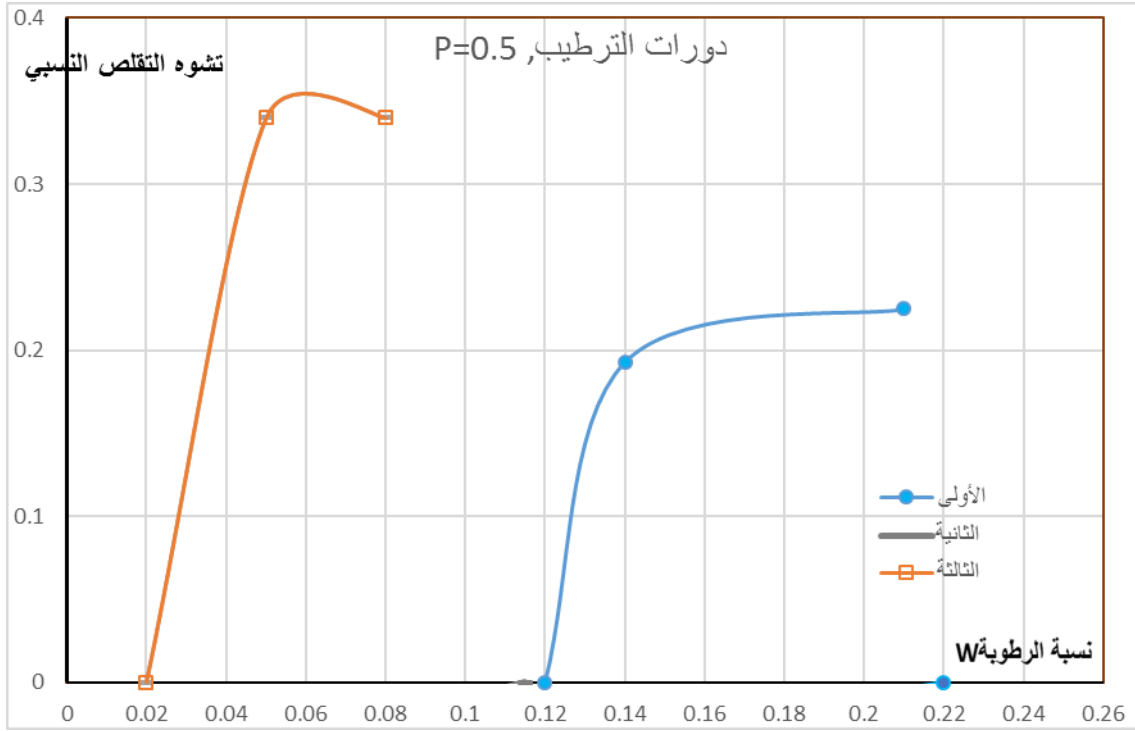


الشكل [22.6] منحنى دورات الترطيب والتجفيف-تقلص دون تحميل.

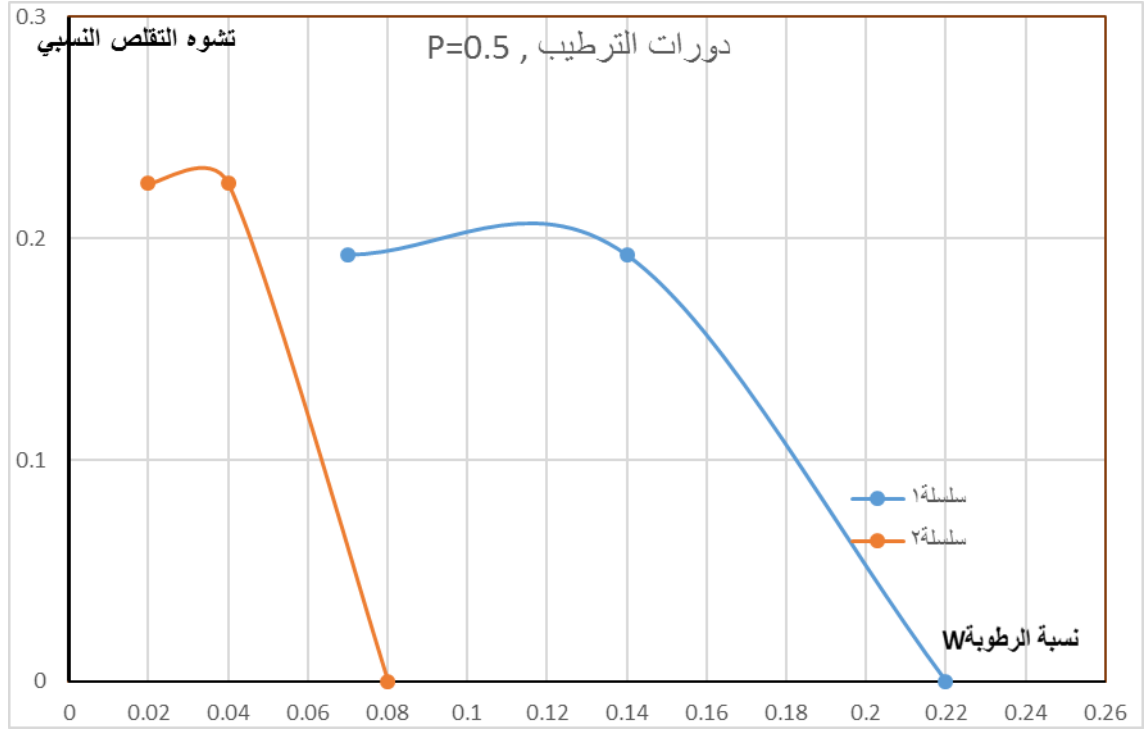
نلاحظ كلما انخفض محتوى الرطوبة الأولية ، زاد مقدار الانتفاخ في التربة ، ويعود ذلك إلى انحسار الطبقة الأيونية المزدوجة وسيكون إجهاد المص عالياً، عندها ستمتص التربة كمية كبيرة من الماء عندما يكون متوفراً، مما يسبب مقداراً كبيراً من الانتفاخ ، و يكون تأثير محتوى الرطوبة مهماً عند القيم الأقل من محتوى الرطوبة الأمثل ، تلاشي ضغط و نسبة الانتفاخ عند محتوى رطوبة أكبر من حد اللدونة بقليل.

3-6-7- دورات الرطوبة مع حمولة $P=0.5\text{kg/cm}^2$:

تم تلخيص نتائج دورات الرطوبة وتغيرها وفق مجال (0.12-0.14-0.24) ، مع تطبيق حمل انضغاطي $P=0.5\text{kg/cm}^2$ ، لمقارنة النتائج كما في المخطط التالي :



الشكل [23.6] منحني دورات الترطيب والتجفيف مع إجهاد 0.5Kg/cm^2 - انتفاخ



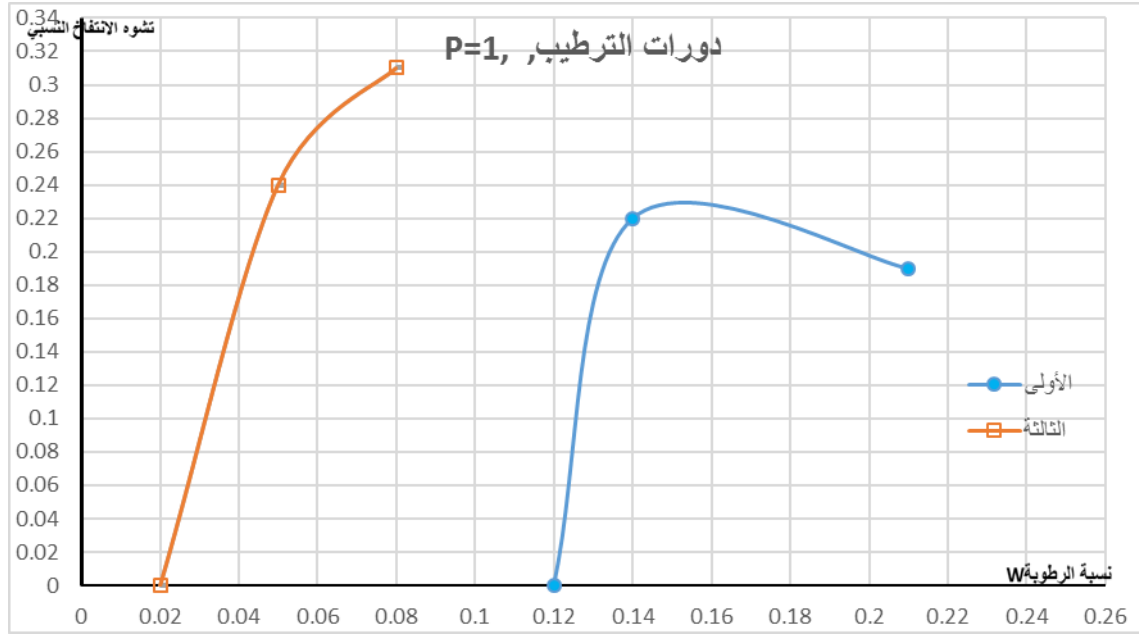
الشكل [23.6] منحنى دورات الترطيب والتجفيف مع إجهاد 0.5 Kg/cm^2 - تقلص

نلاحظ من المخطط السابق أنه مع زيادة مستمرة ونقص في رطوبة التربة تتأثر التشوهات أيضاً بحجم الضغط المطبق .

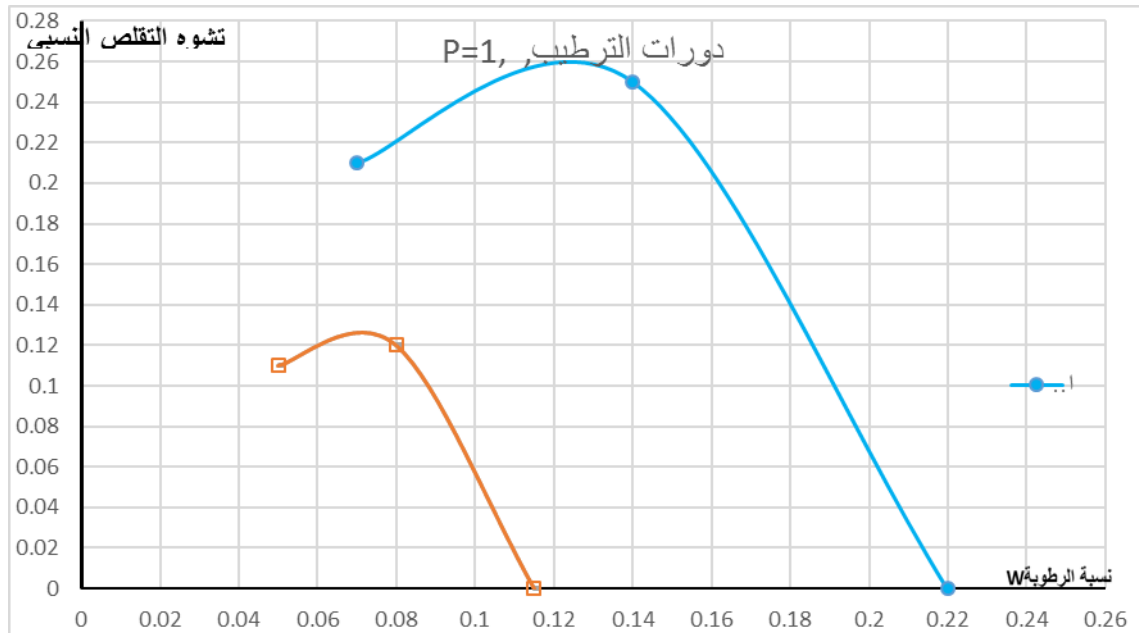
إن الانتفاخ في دورة الترطيب الأولى كما هو في دورات الترطيب والتجفيف مع حمولة ، حيث كان الانتفاخ أقل من الانتفاخ الحر النسبي دون تحميل ، وكانت تشوهات التقلص أقل بنسبة 44% من تشوهات الانتفاخ في الدورة الأولى .

3-6-8- دورات الرطوبة مع حمولة $P=1 \text{ kg/cm}^2$

مع زيادة الضغط المطبق حتى $P=1 \text{ kg/cm}^2$ وتغير الرطوبة الأولية المطبقة ، كانت نتائج دورات الترطيب والتجفيف في المخطط التالي :



الشكل [24.6] منحنى دورات الترطيب والتجفيف مع إجهاد 1 Kg/cm^2 - انتفاخ



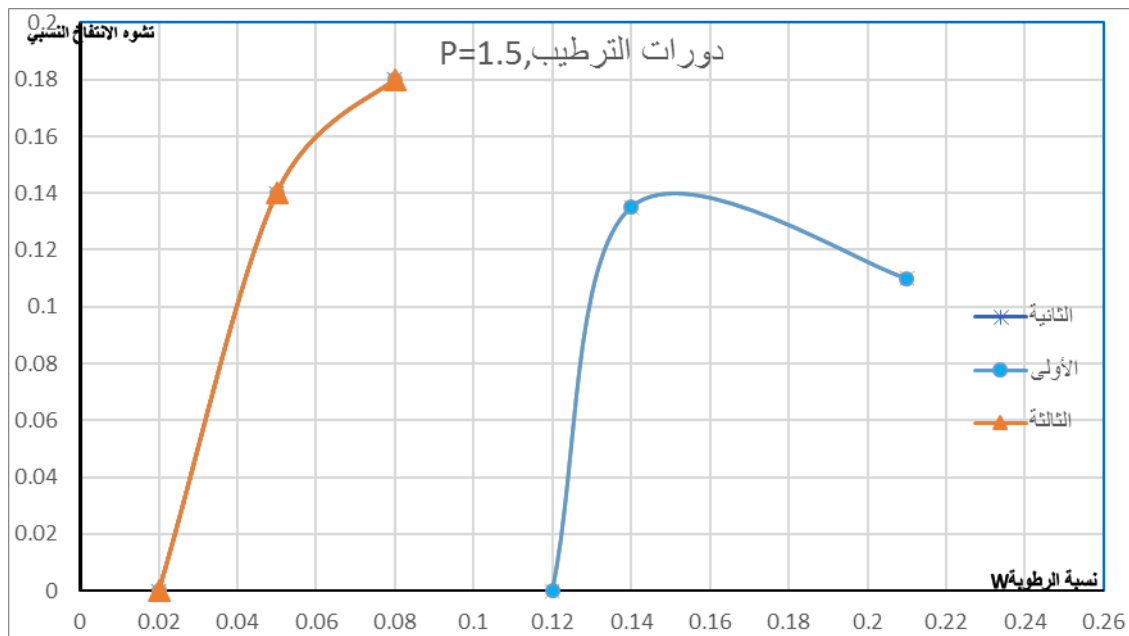
الشكل [24.6] منحنى دورات الترطيب والتجفيف مع إجهاد 1 Kg/cm^2 - تقلص.

نلاحظ من المخطط السابق أن مقدار الانتفاخ يتأثر بالحمولة المطبقة ويتناقص مع زيادة الحمولة ، بالإضافة لتأثر قيمته بالرطوبة الأولية ، فكلما زاد التباين في قيم الرطوبة الأولية تزداد قيمة تشوه الانتفاخ

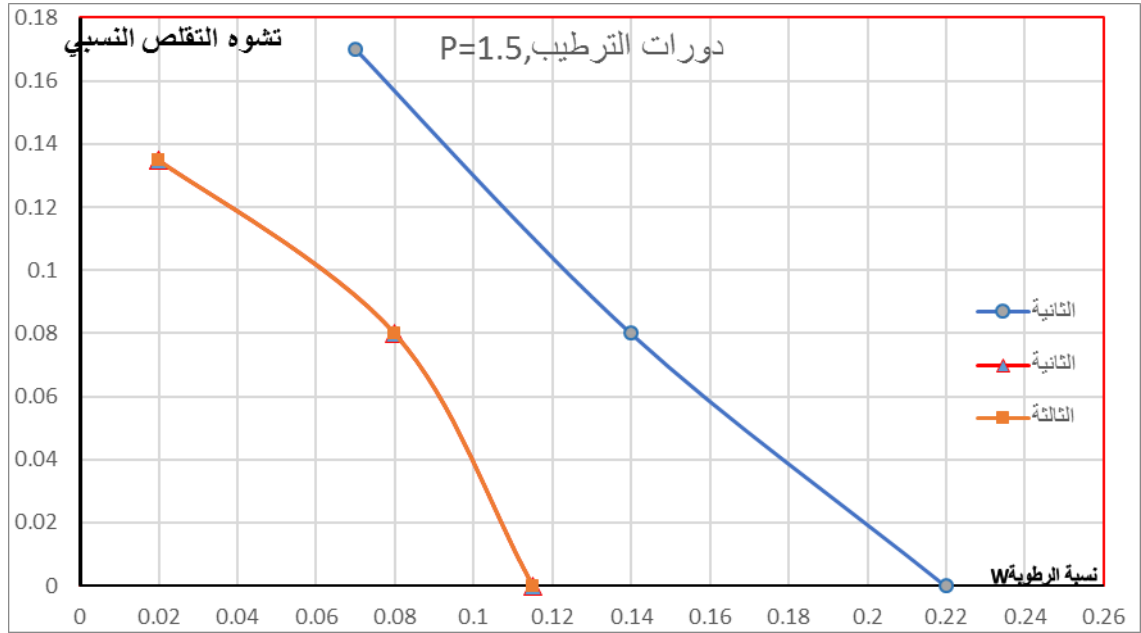
الناتج ، كذلك تتأثر قيم التقلص ويتضح الفرق في الدورة الأولى مع الرطوبة الأولية المتغيرة حيث يكون أقصى تقلص موافق لقيم الرطوبة الأولية الأصغر .

3-6-9- دورات الترطيب مع حمولة $P=1.5\text{kg/cm}^2$:

المخطط التالي يوضح مقارنة دورات الترطيب والتجفيف مع تغير قيم الرطوبة الأولية وتشوهات الانتفاخ والتقلص الناتجة :



الشكل [25.6] منحنى دورات الترطيب والتجفيف مع إجهاد 1.5kg/cm^2 , انتفاخ .

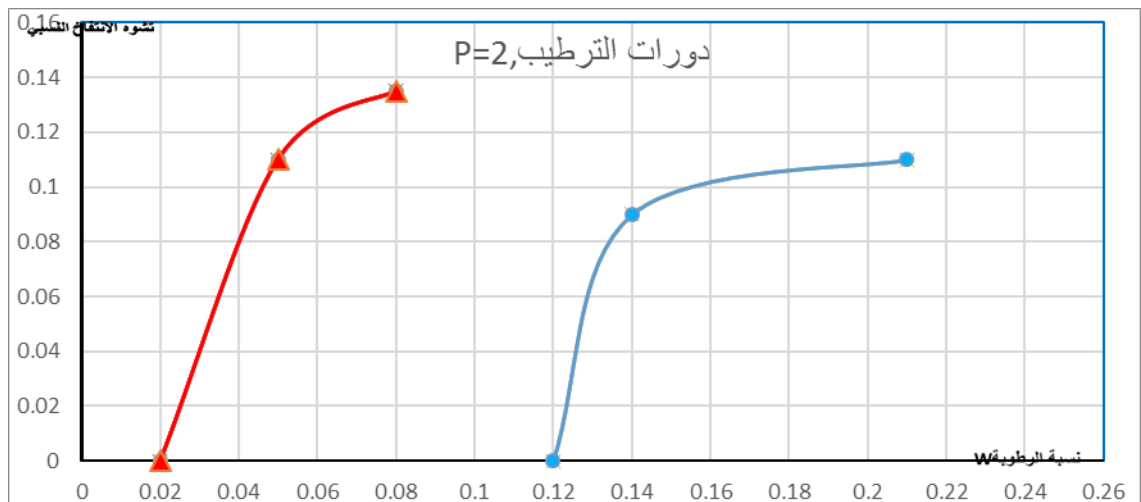


الشكل [25.6] منحنى دورات الترطيب والتجفيف مع إجهاد 1.5 Kg/cm^2 .

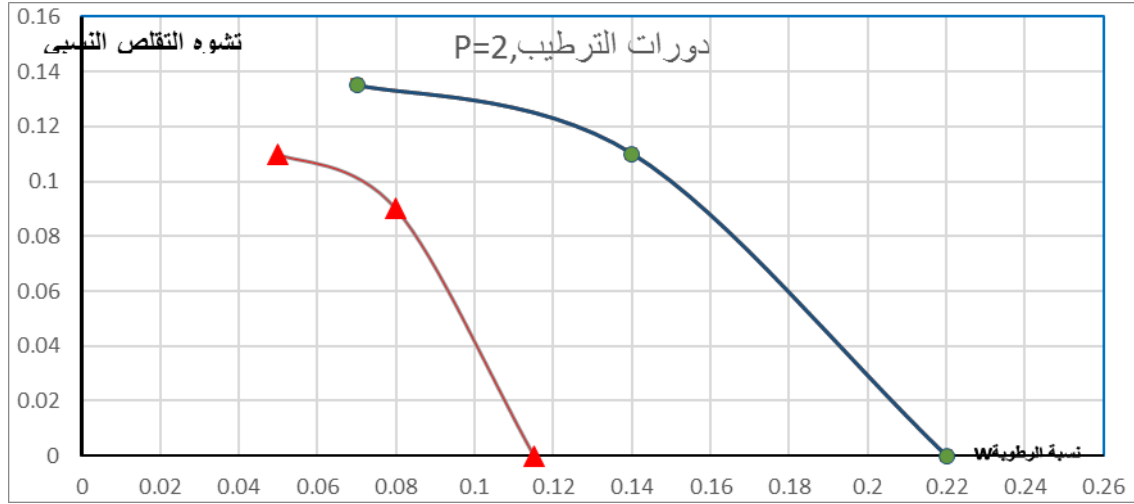
المنحنيات السابقة توضح أن مسار تشوهات الانتفاخ والتقلص في الدورتين الثانية والثالثة متقارب جداً وذلك لتقارب قيم الرطوبة بشكل كبير .

3-6-10 - دورات الرطوبة مع حمولة $P=2 \text{ kg/cm}^2$:

المخطط التالي يوضح مقارنة دورات الترطيب والتجفيف مع تغير قيم الرطوبة الأولية وتشوهات الانتفاخ والتقلص الناتجة من أجل $P=2 \text{ kg/cm}^2$:



الشكل [26.6] منحنى دورات الترطيب والتجفيف مع إجهاد انتفاخ 2Kg/cm^2 ,

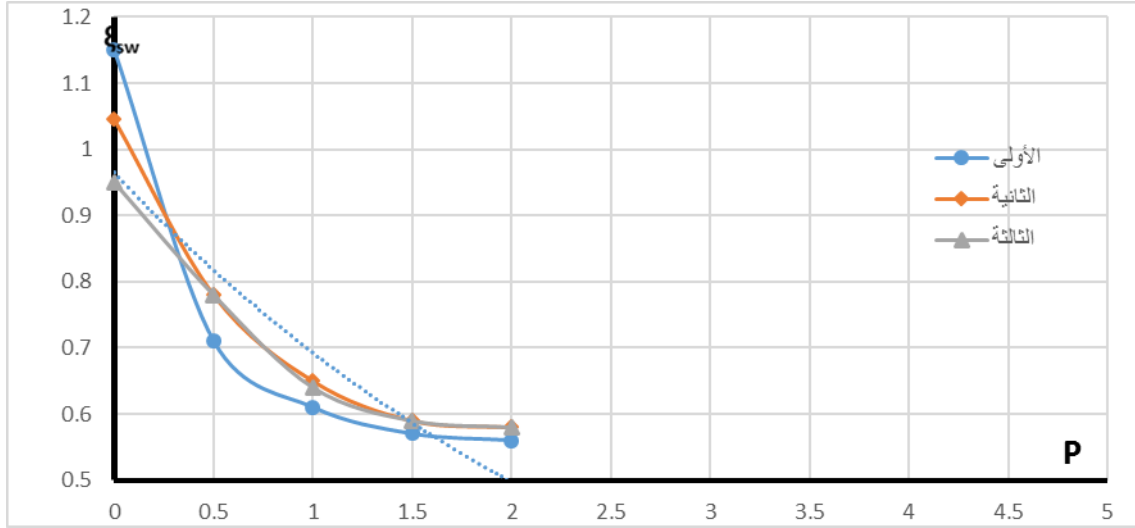


الشكل [26.6] منحنى دورات الترطيب والتجفيف مع إجهاد تقلص 2Kg/cm^2 ,

يتبين من المنحنيات السابقة إن قيم تشوهات التقلص والانتفاخ تتوازن وتصل لمرحلة الثبات في الدورتين الثانية والثالثة .

3-7- الاستنتاجات

- اعتماداً على قيمة الضغط المطبق في دورات الترطيب والتجفيف وتشوه الانتفاخ الناتج ، تم رسم منحنى يوصف العلاقة بين الانتفاخ النسبي الأعظم والضغط المطبق (ضغط الإغلاق) كما في الشكل :



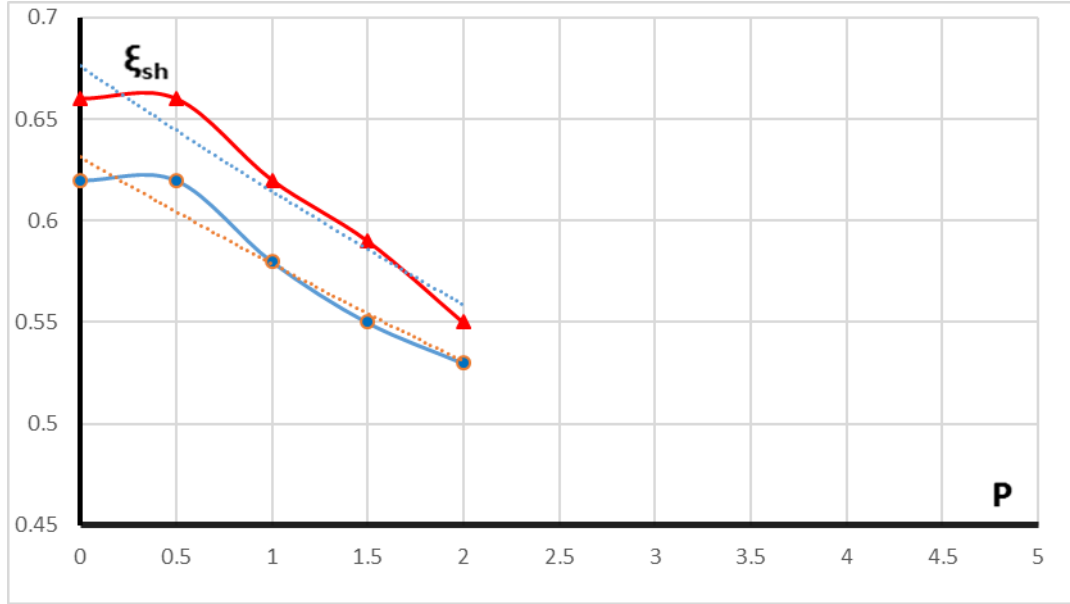
الشكل [27.6] منحنى تشوه الانتفاخ - الحمولة المطبقة.

يتضح من المنحنى السابق التداخل في الدورتين الثالثة والثالثة من الترتيب والتجفيف، وحدث انخفاض كبير في دورات الترتيب الثلاث في نطاق الضغط من 0-0.5 MPa ، وإن تشوه التربة في الدورة الأولى أقل بنسبة 82% من الانتفاخ الحر ، ومع زيادة الحمل من 0.5-1 MPa يقل التشوه بنسبة 29% فقط، حيث نلاحظ أن العلاقة التي تحكم التشوهات في الدورتين الثالثة والثالثة هي نفسها ، أيضاً لوحظت العلاقة الخطية بين التشوهات والضغط بعد قيمة الضغط 0.5 MPa ، وباعتماد على هذه المنحنيات نستطيع تحديد ما يسمى عتبة الانتفاخ (نمدد المنحنى على استقامة واحدة حتى يتقاطع مع محور الإجهاد في نقطة هي عتبة الانتفاخ) ، ويمكن تعريفها بأنها قيمة الضغط الذي تتوقف عنده التربة عن التشوه والانتفاخ ، تكون قيمة الانتفاخ بعده ثابتة ، ففي الدورة الأولى عتبة الانتفاخ 4MPa وفي الدورتين الثانية والثالثة 4.5MPa.

- العلاقة بين التشوه النسبي للانتفاخ وقيمة الضغط المطبق وفق علاقة أسية .

$$\xi_{sw} = 0.964 e^{-0.332P}$$

- بشكل مشابه لما سبق تم رسم المنحنى الذي يوضح العلاقة بين الضغط المطبق وتشوه النقص الناتج في دورات التجفيف ، كما في الشكل [28.6] :



الشكل [28.6] منحنى تشوه التقلص -الحمولة المطبقة.

- العلاقة بين التشوه النسبي للتقلص وقيمة الضغط المطبق وفق علاقة أسية.

$$\xi_{sh} = 0.631 e^{-0.087P}$$

يتضح من الرسم البياني السابق أن :

-قيمة تشوه التقلص في الدورة الأولى ، أكبر مما هي عليه في الدورتين الثالثة والثانية ،

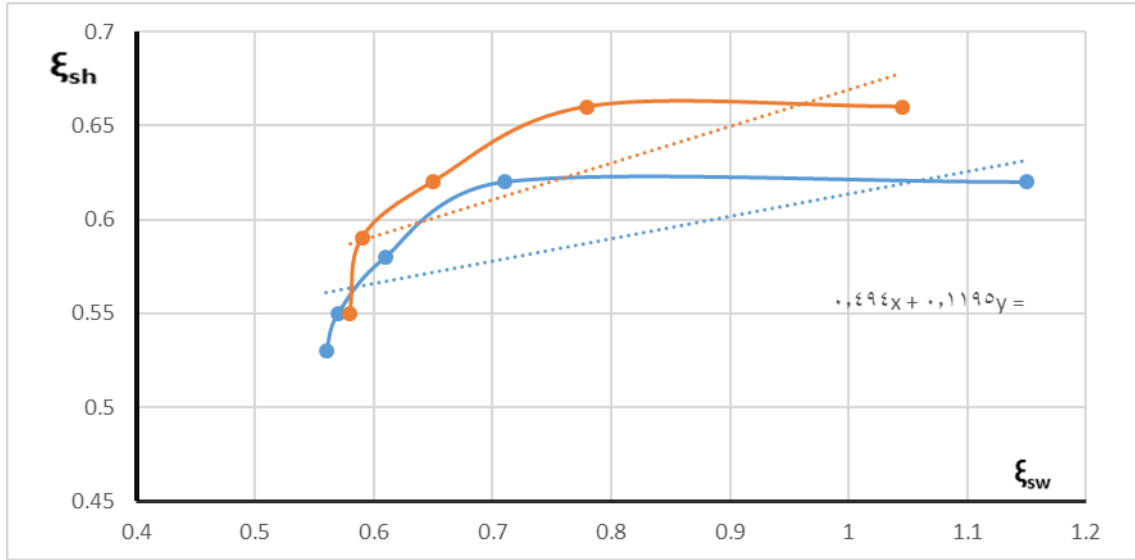
-نمط تشوه التربة أثناء التقلص في دورات التجفيف ، على كامل نطاق الضغط المطبق ،مشابه لحد كبير نمط التربة أثناء الانتفاخ ، وخاصة في الدورتين الثانية والثالثة .

-مع زيادة الضغط المطبق ، تشوه التقلص يقترب من قيمة نهائية ثابتة .

-نلاحظ أنه بعد قيمة معينة من الضغط المطبق ، لا يحدث تشوه التقلص للعينة و قيمة هذا الضغط تكون ثابتة لنوع معين من التربة الانتفاخية ، وهو مشابه لمفهوم (رطوبة التقلص) ، وهي قيمة معينة من الرطوبة يتوقف عندها تشوه التقلص للتربة ، لذلك نجد من المنحني السابق قيمة ضغط التقلص في الدورة الأولى 4.25MPa (نمدد المنحني عندما يأخذ استقامة واحدة حتى يتقاطع مع محور الضغط في

نقطة هي ضغط التقلص) ، وضغط التقلص للدورة الثانية والثالثة 4 MPa ، كما يتضح من المنحنيات السابقة إن إعادة ترطيب – تجفيف العينة تزيد من قيمته بنسبة 8% .

-اعتماداً على النتائج التجريبية تم رسم العلاقة بين تشوه الانتفاخ النسبي وتشوه التقلص النسبي للدورات المطبقة من الترطيب والتجفيف ، كما يوضح الشكل التالي :



الشكل [29.6] منحنى تشوه التقلص -الحمولة المطبقة.

ومن هذا الشكل نلاحظ :

-انتظام العلاقة بين الانتفاخ النسبي والتقلص النسبي بشكل خطي ، كلما زاد تشوه التربة الانتفاخي زاد تقلصها ،

-في الدورتين الثانية والثالثة عملياً تتزامن النقاط تجريبياً ، وتتوافق المنحنيات .

-كلما زادت الرطوبة الأولية يقل عدد الدورات اللازمة للوصول لحالة التوازن والثبات، لأن مسامات التربة تكون قد امتلأت بكمية من الماء وتشوهت بنيتها، قبل بداية الترطيب .

-قيم تشوه التقلص في الدورة الأولى، أكبر بكثير من الدورات اللاحقة في الترطيب والتجفيف.

- من الشكل نلاحظ العلاقة الخطية بين تشوه الانتفاخ وتشوه التقلص في الدورة الأولى وتوصف بالمعادلة

$$\xi_{sh} = 0.1195\xi_{sw} + 0.494$$

التالية:

- دورات الترطيب وتشوه الانتفاخ تتحدد بالعلاقة التالية بين الانتفاخ النسبي الناتج والزمن كما يلي:

$$\xi_{sw} = -0.0219d^2 + 0.305d + 0.1615$$

حيث : d الزمن بالأيام ، من أجل الدورة الأولى .

- دورات الترطيب وتشوه الانكماش الناتج تتحدد بالعلاقة التالية بين تشوه الانكماش الناتج والزمن كما يلي:

$$\xi_{sh} = \sigma_y d^{\beta_y}$$

حيث : d الزمن بالأيام ، والثوابت الموجودة $\alpha_y = 0.099, \beta_y = 0.614$ أجل الدورة الأولى .

- يمكن تقريب العلاقة بين تشوه الانتفاخ وتشوه التقلص في الدورتين الثالثة والثانية من خلال العلاقة:

$$\xi_{sh} = 0.194\xi_{sw} + 0.473$$

الفصل الرابع الدراسة العددية

4-1- مقدمة :

تعتبر التربة المنتفخة نوع خاص من التربة اللدنة حيث تظهر تشوهات انكماشية وانتفاخية كبيرة مع تغير رطوبة التربة، وتنتشر هذه التربة في المناطق الجافة وشبه الجافة، وبقيت مسألة لدراسة العددية لهذه التربة مسألة محيرة للعلماء.

للتوصل إلى حل مقبول لهذه المشكلة لابد من إجراء تحليل يعتمد على المزاوجة بين السلوك الميكانيكي للتربة مع جريان الماء فيها وتغيرات ضغط ماء المسام يضاف لذلك استخدام نموذج لسلوكية التربة يأخذ بالاعتبار انتفاخ وانكماش التربة، توفر طريقة العناصر المنتهية هذه الإمكانية التي تؤدي في النهاية إلى نموذج أكثر أماناً ودقة واقتصادية .

للتوصل لحل هذه المسألة يتم تحديد قيم امتصاص التربة أو ما يعرف بضغط ماء المسام السالب مع الزمن عن طريق حل مسألة جريان الماء غير المشبع بعدها يتم استخدام قيم الامتصاص الناتجة في حل المسألة الميكانيكية لتحديد الانتفاخ والانكماش.

تبين من البحث المرجعي إن الطرق العددية وخاصة طريقة العناصر المنتهية من أفضل الطرق لدراسة وتحليل التربة المنتفخة المعرضة لدورات متعددة من الانتفاخ والتقلص.

لكن نلاحظ قلة الأبحاث الحقلية والدراسات العددية لدراسة التربة الانتفاخية وحتى إذا وجدت لا تتطرق بشكل مفصل إلى الدورات المتتالية من الانتفاخ والتقلص.

في السنوات الأخيرة زاد الاهتمام بدراسة سلوك التربة المنتفخة وذلك للنتائج السلبية لسلوكها في أساسات الأبنية و التكلفة الاقتصادية الكبيرة المترتبة على تصحيح التشوهات الناتجة عنها ، وخاصة في السنوات الأخيرة زادت إمكانية استخدام خليط انتفاخي مرصوص من التربة كحواجز هندسية أو عازلة للإشعاع للتخلص من النفايات (10).

يعد السلوك الميكانيكي للتربة الانتفاخية أحد الموضوعات الصعبة في التربة في مجال الهندسة الجيوتكنيكية . ومن جهة أخرى تعد تقنية العناصر المحدودة بمثابة طريقة واعدة لدراسة مشاكل الانتفاخ والزحف، ومع ذلك، يعتمد نجاح التحليل العددي بشدة على المودل العددي المستخدم (14)(13).

أوجد (1999) Gens and Alonso (1992) and Alosa et al. [38] واحدة من أقرب النماذج المرنة - اللدنة ويدعى موديل برشلونة للتربة الانتفاخية ويعتبر نموذجاً قوياً ومناسباً للسلوك الميكانيكي للتربة الانتفاخية غير المشبعة .

4-2-النموذج المستخدم BBM

إن التحاليل الجيوتكنيكية التقليدية تميل للاكتفاء بدراسة التشديد الأولي مثل تلاشي ضغط ماء المسام ونقل الحمولة للحبيبات الصلبة لكن المهندسين اللذين يتعاملون مع التربة الناعمة والطرية أدركوا مع الوقت أهمية تأثير الزمن وزحف التربة والانتفاخ .

إن نموذج BBM هو من النماذج والموديلات المعقدة التي تأخذ سلوك خاص للتربة بعين الاعتبار كالتحميل الدوري للتربة والتغير الحجمي للتربة الغضارية من انتفاخ وتقلص وسلوك التربة غير المشبعة.

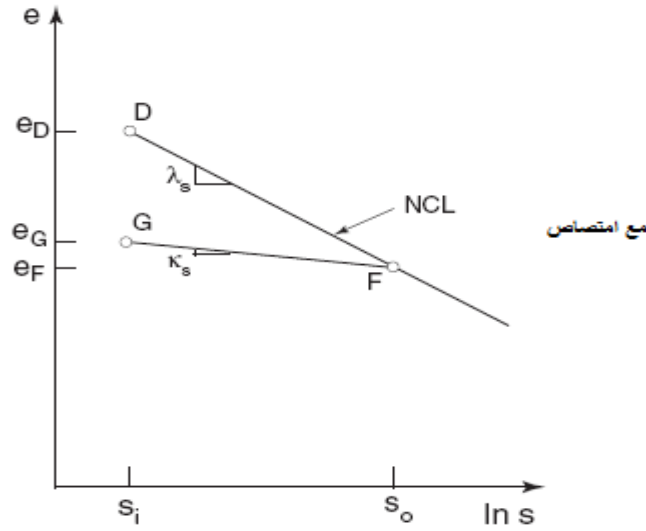
في البداية كان التركيز على نموذج كام كلاي الذي يبحث نموذج التربة المرنة. ثم طور نموذج Cam Clay من أجل النظر في حالات خاصة ، مما أسفر عن نموذج برشلونة الأساسي في هذا الفصل تم التركيز على نموذج برشلونة الأساسي (Alonso et al.، 1990) كمودل مرن لدن للتربة المنتفخة. لاستخدامه في نمذجة السلوك الميكانيكي والهيدروليكي للتربة المنتفخة المعرضة لدورات متعددة من الترطيب والتجفيف.

4-2-1-النمذجة المرنة اللدنة للتربة:

نموذج برشلونة الأساسي *Barcelona Basic Model* [38] استخدم لنمذجة سلوك التربة المنتفخة وهو امتداد لنموذج Cam Clay المعدل بإضافة تأثير الامتصاص على قوة التربة والصلابة أما في حالة التشبع الكامل ، هذا النموذج يتزامن مع نموذج كام كلاي المعدل. ويعتمد نموذج BBM على الضغط الصافي P والامتصاص S ، كمتغيرات الإجهاد المستقلة.

4-2-2-التحميل الآيزوتروبي :

على غرار نموذج CamClayModel المعدل ، توجد علاقة لوغاريتمية بين متوسط الضغط ونسبة الفراغ في نموذج BBM، يعتمد خط التوحيد العادي على الامتصاص كما هو موضح في الشكل [1.7] ويفترض أيضاً وجود علاقة لوغاريتمية بين نسبة الامتصاص والفراغ. تحتوي (e,logs) على ميول وهي λ و k_s على التوالي. يُعرف الأول بمؤشر الضغط عند قيمة امتصاص معينة والأخير يعرف بمؤشر الضغط فيما يتعلق بالامتصاص. يُطلق على مستوى الضغط النهائي الذي تم الوصول إليه على هذه الخطوط اسم ضغط التشديد الآيزوتروبي عند مستوى امتصاص معين P_p وضغط التشديد السابق للامتصاص.



الشكل [1.7] خط التشديد العادي مع اعتبار الامتصاص -مقياس لوغاريتمي.

4-2-3- الإجهاد الصافي الأولي تحميل – تفريغ :

بالنسبة لتحميل الإجهاد الصافي الأساسي عند مستوى امتصاص معين ، يمكن أن يكون:
التغيير في نسبة الفراغ معبراً عنه [38]:

$$\Delta e = e - e_0 = -\lambda \cdot \ln(P_p / P_o^*) \quad (1.7)$$

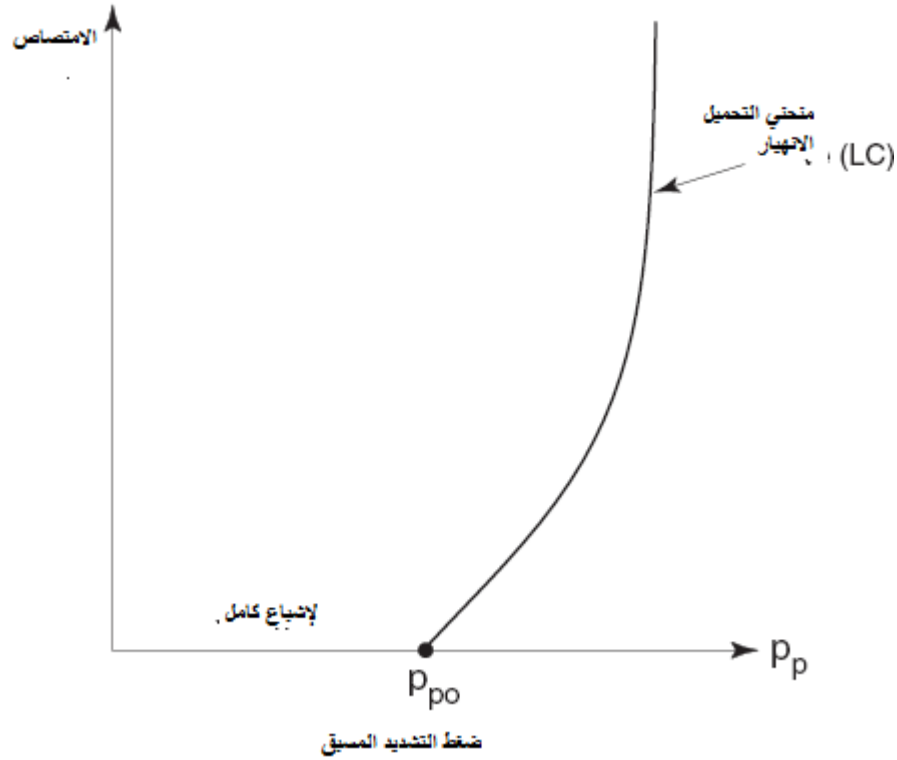
$$\Delta \varepsilon_v^* = \frac{\lambda}{1+\varepsilon} \cdot \ln \frac{P_p}{P_o^*} \quad (2.7) \quad \text{أو بتعبير الحالة الحجمية:}$$

في مودل برشلونة الأساسي λ و P_p مرتبطان ب P_{p0} و λ_0 عند الإشباع الكامل بالصيغة :

$$P_p = P_c \left(\frac{P_{p0}^{\lambda-k}}{P_c^{\lambda-k}} \right) \quad (3.7)$$

P_c الإجهاد المرن المرجعي ويؤثر على المجال المرن ،

λ : يعطي صلابة التربة عند الامتصاص العالي، عند الإشباع الكامل، $S=0$ والخضوع $\lambda_0=\lambda$ و $P_p=P_{p0}$ امتصاص أكبر يعطي قيم معامل ضغط أكبر، والزيادة الرتيبة في صلابة التربة مع الامتصاص مرتبطة بالزيادة في ضغط التشديد المسبق كما هو في الشكل :



الشكل [2.7] سطح الخضوع (LC) في المستوي $S-P^*$ في نموذج BBM.

إن هذا المنحني عرف بمنحني تحميل - الخضوع يفصل السلوك المرن عن السلوك اللدن ، عند التحميل - تحميل الأيزوتروبي تعتبر التربة بسلوك مرن كامل والتغير بنسبة المسام كما يلي :

$$\Delta e^* = -k \ln \frac{P^*}{P^*0} \quad (4.7)$$

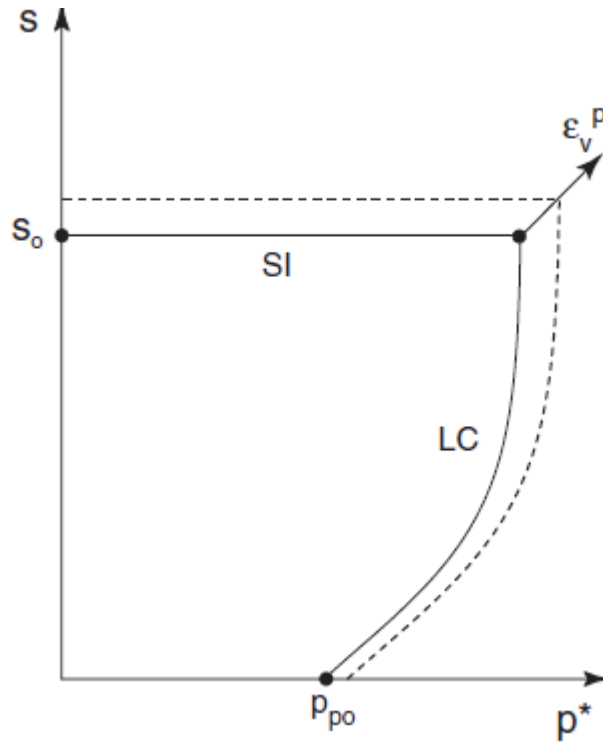
إن هذه العلاقة تشبه العلاقة المعبرة في camclay للاستجابة المرنة، معامل التحميل والتفريغ k افترض أنه مستقل عن الامتصاص، بالتالي قيمته ثابتة ومساوية لقيمه في ظروف الإشباع الكامل .

4-2-4- المصفوفة المرنة اللدنة في نموذج برشلونة :

في هذا القسم تم اشتقاق الصيغة العامة لمصفوفة المرونة - اللدنة الأساسية لتطبيق مودل برشلونة ، الصيغة تتضمن أكثر الحالات تعقيدا عندما سطح الخضوع يكون فعال LC and SI.

نسبة الإجهاد الكلي تكتب كما يلي :

$$5\varepsilon_i = c_{ji}^e \cdot \sigma_j^* + \frac{m^i \cdot s}{3k_{sur}} + A1 \cdot \frac{\partial g1}{\partial \sigma_i^*} + A2 \cdot \frac{\partial g2}{\partial s} \cdot m_i \quad (5.7)$$



الشكل [3.7] سطح الخضوع بوقت واحد LC-SI في نموذج BBM.

تصبح مصفوفة المرونة –اللدونة بالشكل التالي :

(6.7)

$$D_{ij}^{ep} = \left[D_{ij}^e - \frac{D_{ij}^e \cdot \frac{\partial g_1}{\partial \sigma_i^*} \cdot \frac{\partial f_1}{\partial \sigma_i^*} \cdot D_{ij}^e}{H} \right]$$

حيث : (7.7)

$$H = -\frac{\partial f_1}{\partial \sigma_i^*} \cdot \frac{\partial g_1}{\partial P^*} + \frac{\partial f_1}{\partial \sigma_i^*} \cdot D_{ij}^e \cdot \frac{\partial f_1}{\partial \sigma_j^*}$$

4-2-5- تأثير الامتصاص على صلابة التربة

إن نموذج Barcelona Basic Model (ALONSO&GENS1990) يعتمد على متغيرين مستقلين وهما ، الإجهاد الصافي P^* ، إجهاد الامتصاص S ، فالإجهاد الصافي يمثل الفرق بين الإجهاد الكلي P وضغط الهواء المسامي u_a ، بينما الامتصاص هو الفرق بين ضغط الهواء u_a وضغط الماء u_w :

$$S = u_a - u_w, P^* = P - u_a \quad (8.7)$$

وبما أن الضغط في كل مناحي التربة هو الضغط الجوي بالتالي الضغط الكلي يساوي الضغط الصافي (الفعال) :

$$P = P^* \quad (9.7)$$

$$S = - u_w \quad (10.7) \quad \text{والامتصاص :}$$

إن مودل BBM هو امتداد لمودل Cam Clay المعدل بإضافة تأثير الامتصاص في صلابة التربة ، ومقاومة القص .

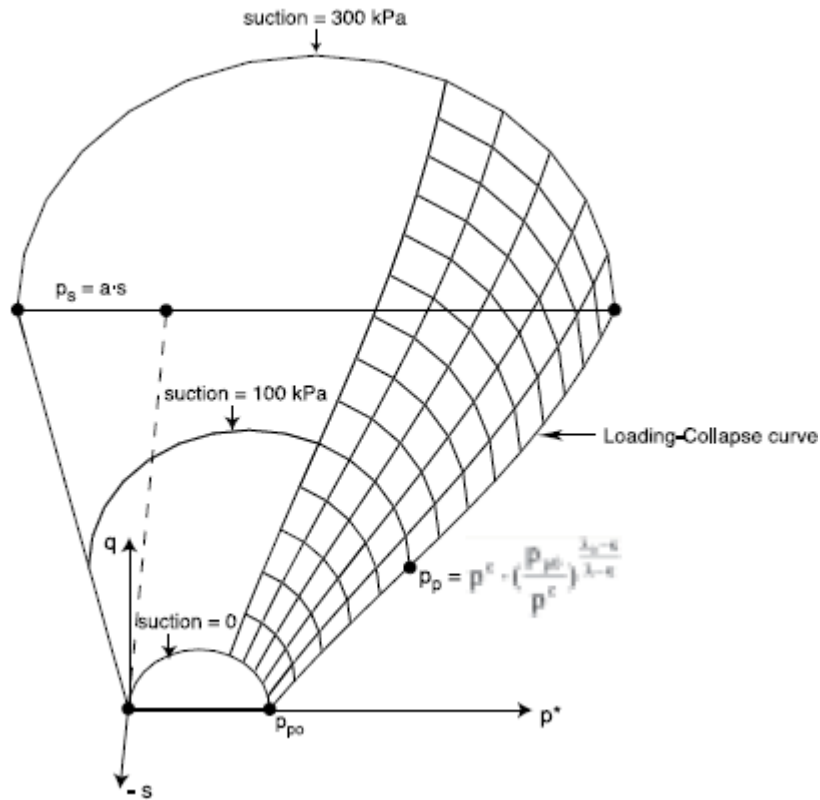
فعندما تكون التربة مشبعة بشكل كامل ، يكون $S=0$ يتوافق مع مودل كام كلاي المعدل .

وعند تجفيف التربة (زيادة الامتصاص) يزداد التماسك الشعري وبالتالي يزداد القطع الناقص في منطقة الشد بنسبة تساوي الدالة a من المودل كما هو موضح في الشكل [4.7]

ضغط التشديد المسبق يحسب من العلاقة :

$$P_p = p^c \cdot (P_{po}/p^c)^{(\lambda-k/\lambda-k)} \quad (11.7)$$

حيث p_c هو الضغط المرجعي :



الشكل [4.7] سطح الخضوع (LC) في مودل BBM.

سطح الانهيار لمودل برشلونة يأخذ شكل منحنى الانهيار -التحميل كما هو موضح في الشكل [4.7].

من أجل السلوك المرن ، المودل يفرض بارامترات مختلفة لصلابة التربة والامتصاص ، حيث البارامتر k_s يعطي صلابة التربة مع الأخذ بالاعتبار تغيرات الامتصاص ، وتدفق المياه ضمن التربة. إن مودل BBM نفذ ضمن برنامج PLAXIS 3D كود العناصر المنتهية .

4-2-6- البارامترات المطلوبة لنموذج Cam clay

يتطلب نموذج Cam Clay ست متغيرات إدخال وهي نسبة الفراغ الأولية e ، ونسبة بواسون لتفريغ وإعادة التحميل μ ، مؤشر التفريغ k ، معامل الانضغاط المرن λ_0 ، ضغط التشديد المسبق p_{po} وزاوية الاحتكاك Φ_0 . يتم استخدام المتغيرات الخمس الأولى لمحاكاة صلابة التربة. المتغير السادس يستخدم للتنبؤ بمقاومة التربة.

4-2-7- معلمات الصلابة في نموذج Cam Clay

أن نسبة الفراغ الأولية e_0 تقع قيمها المشتركة في النطاق 0.4 للتربة الكثيفة جدًا إلى 1.5 للتربة الرخوة جدًا. ومع ذلك، يمكن أن تصل قيمته إلى بعض القيم العالية جدًا حتى 3 في حالة الغضار الطري جدًا.

إن نسبة Poisson μ أثناء التفريغ وإعادة التحميل تتراوح بين 0.15-0.22 (لمعظم أنواع الترب).

أما بقية العوامل فيمكن استنتاجها من تجربة ثلاثي المحاور أو من اختبار خلية الأدومتر ، ففي اختبار خلية الأدومتر على افتراض أن C_c ، C_s هي مؤشر الانتفاخ والانضغاط يمكن استخدام العلاقات لتحويلها إلى معلمات Cam Clay:

$$\lambda = \frac{C_c}{2.3} \quad (14.7) \quad k = \frac{2C_s}{2.3} \quad (12.7)$$

من الأفضل استخدام :

$$\lambda^* = \frac{\lambda_0}{(1+e)} \quad (14.7) \quad k^* = \frac{K}{(1+e)} \quad (13.7)$$

حيث :

قرينة الانضغاط λ :

$$\lambda = \frac{C_c}{2.3} \quad \text{حيث: } (17.7)$$

C_c : قرينة الانضغاط الممثلة لميل منحنى العلاقة بين لو غارتم الإجهادات الفعالة ومعامل المسامية والناتج عن التحميل في تجربة الانضغاطية .

قرينة الانتفاخ κ

$$\kappa = \frac{2C_r}{2.3(1+e_0)} \quad (18.7)$$

حيث C_r قرينة الانتفاخ الممثلة لميل منحنى العلاقة بين لو غارتم الإجهادات ومعامل المسامية الناتج عن عملية رفع الحمولة في تجربة الانضغاطية .

معامل المقاومة M :

$$(19.7)$$

$$M = \frac{6\sin\phi}{3 - \sin\phi}$$

حيث ϕ زاوية الاحتكاك الداخلية والناتجة من تجربة القص المباشر للتربة.

اعتمادا على هذه العلاقات يمكن استخراج قيم هذه المعاملات واعتمادها في النموذج البرمجي. وبناء على ذلك تم اجراء التجارب المخبرية اللازمة لاستخراج المعاملات C_c, C_s ، وهي تجربة الانضغاطية بمرحلتي التحميل ورفع الحمولة، وتجربة القص المباشر لاستخراج قيمة ϕ .

تم تحديد ضغط التشديد المسبق مباشرة من اختبار التشديد، حيث ضغط التشديد المسبق p يمثل أكبر إجهاد سبق وتعرضت له العينة ، ويمكن إيجاد قيمة p_{po} من خلال طريقة كاساغراندي التخطيطية وذلك برسم المنحني الذي يمثل العلاقة بين $(e, \log \sigma)$.

الرمز K_0^{NC} هو معامل الضغط الأرضي في وقت الراحة عند تشديد التربة بشكل طبيعي يتم توقع قيمته بشكل جيد من خلال الصيغة التجريبية:

$$K_0^{NC} = 1 - \sin \phi \quad (20.7)$$

حيث ϕ : زاوية احتكاك التربة

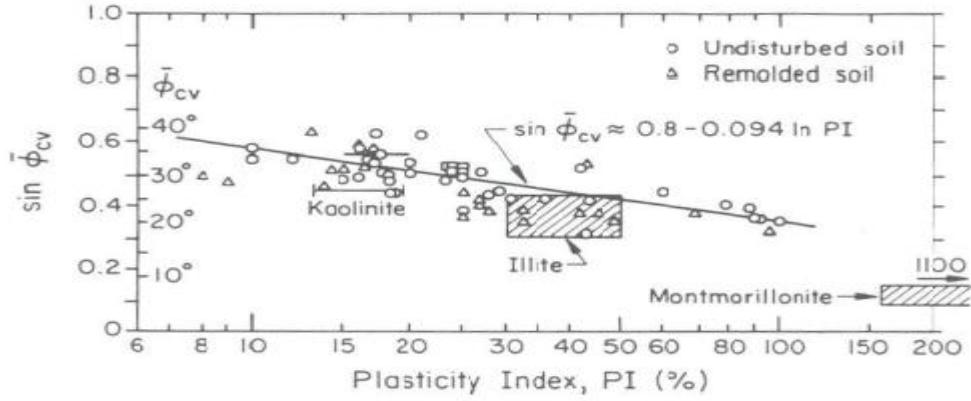
يمكن استخدام هذه العلاقة إذا لم تتوفر معلومات حول الثابت في الموقع الجغرافي .

4-2-8-بارامترت قوة القص في نموذج camclay:

زاوية الاحتكاك الداخلي هي بارامتر القص المستخدم في Cam Clay، يتم استخدام القيمة " ϕ' " لتحديد قيمة M ميل خط الحالة الحرجة وفقاً للمعادلة التالية: (21.7)

$$M = \frac{6 \cdot \sin \phi'}{3 - \sin \phi'}$$

في حالة عدم وجود معلومات حول زاوية الاحتكاك ، يمكن استخدام الرسم البياني في الشكل [5.7] الرمز cv يشير الرسم البياني إلى زاوية الاحتكاك في الحالة الحرجة. قيمته معطاة كدالة من مؤشر اللدونة للتربة ، وبالتالي فإن الرسم البياني مناسب فقط للغضار.



الشكل [5.7] زاوية الاحتكاك في الحالة الحرجة كدالة لمؤشر اللدونة (Mayne and Kulhawy (1990).

إن مودل camclay مناسب لنمذجة الغضار في حالة التشبع الكامل، حيث لا يمكن نمذجة التربة في حالة الإشباع الجزئي، وخلال دورات التصريف لا تظهر إجهادات حجمية قابلة للعكس، ولا يمكن تمثيل التغيرات الحجمية للتربة من انتفاخ وتقلص.

3-4- بارامترات نموذج برشلونة Basic Model Barchelona

يحتوي نموذج BB على سبع بارامترات إضافية مقارنة بنموذج CamClay المعدل. ثلاثة منهم تدل على صلابة التربة المرتبطة بالسطح العائدي LC (نقطة الخضوع)، وهي تسمى β , λ and P_c تصف البارامترات K_s و s_0 و λ_s صلابة التربة مع اختلاف الامتصاص. يتم استخدام المعلمة α لتعكس تأثير الامتصاص على تماسك التربة.

البارامتر β يعطي النسبة التي يزداد عندها الامتصاص مع زيادة ضغط التشديد المسبق λ إن هيئة وشكل سطح الخضوع حساس لقيمتها فتتغير بقيمتها يؤدي لتوسيع واضح في النطاق المرن.

P_c الضغط المرجعي يؤثر على قياس المجال المرن إن النسبة P_p^0/P_c هي عامل حاسم حيث $P_p^0/P_c=1$ يصبح سطح الاندماج LC وهذا يزيل أي تأثير للامتصاص على ضغط التشديد المسبق

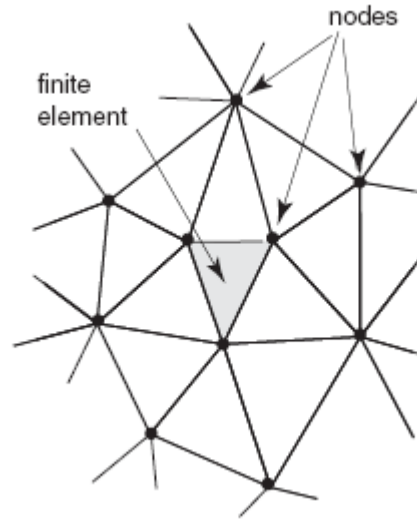
1-3-4- بارامترات الصلابة المرتبطة بالامتصاص:

فحص مخبري واحد كافي لتحديد البارامترات K_s , S_0 , λ_s الفحص يتضمن تجفيف التربة تحت حمل ثابت، النتائج تعطي ضغط التشديد المسبق بالامتصاص S_0 ، معامل الضغط لتحميل الامتصاص الأساسي λ_s ، متغير الصلابة المرتبط بالتحميل ولا تحميل K_s .

4-3-2- تنفيذ طريقة العناصر المحدودة

تم تطوير تعبير المصفوفة لربط المتغيرات العقدية لكل عنصر ويشار إلى المصفوفة عادة باسم "مصفوفة العناصر". مصفوفات العناصر هي مجتمعة لتشكيل مجموعة من المعادلات الجبرية التي تصف كامل النظام. وأخيراً تم حل مجموعة المعادلات الجبرية للحصول على القيم العقدية للمجهول.

تعتمد الدراسة الحالية على الإزاحة بطريقة العناصر المحدودة، حيث تلعب الإزاحة دور المجهول العقدي الأساسي الواجب تحديده. والضغط في جسم التربة غير المشبعة هي متغيرات ثانوية.



الشكل [6.7] شبكة العناصر المنتهية

في هذه الدراسة يتم استخدام طريقة العناصر المحدودة لحل معادلات التوازن. تقسم هذه الطريقة العنصر المدروس إلى العديد من الأجزاء الفرعية تسمى "العناصر المحدودة" متصلة بعدد من النقاط تُعرف باسم "العقد" كما هو موضح في الشكل [6.7]. ، تتخذ بشكل عام أشكالاً بسيطة (مثل المثلث أو المستطيل) يتم تجميعها لتمثيل مجال الحل و يتم حساب المتغيرات الغير معروفة و المطلوب حلها في العقد، باستخدام طرق رياضية خاصة.

تم تقسيم شبكة العناصر بأبعاد (very coarse) ولعدد نقاط (15733) نقطة .

4-3-4- العلاقات الحركية والتوازن:

$$\sigma_x \quad L_T \sigma + \hat{b} = 0 \quad (22,7) \quad \text{علاقة التوازن الأساسية}$$

حيث σ هي عامل الإجهاد، و b عامل قوى الجسم، L_T هو التنقل لما يسمى مصفوفة التفاضل .

$$L = \begin{pmatrix} 0/\sigma_x & 0 & 0 \\ 0 & \sigma/\sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & \sigma/\sigma_y \\ \sigma/\sigma_y & \sigma/q & 0 \\ 0 & \sigma/\sigma_z & \sigma/\sigma_y \\ \sigma/\sigma_z & 0 & \sigma/q \end{pmatrix}$$

يمكن كتابة السلالة في أي وقت من حيث المشتقات المكانية للإزاحة في تلك النقطة. تسمى هذه العلاقة بين السلالات و الإزاحة المعادلة الحركية. في شكل مصفوفة

$$\varepsilon = Lu \quad (23,7)$$

حيث ε يدل على عامل السلالة و $u = [u_x, u_y, u_z]^T$ هو عامل الإزاحة عند النقطة المعتبرة .

الإزاحة u هي المجهول الأساسي الذي سيتم تحديده. اعتمادا على قيم الإزاحة المحسوبة ، يتم تحديد المجهول الثانوي (الإجهاد) باستخدام المعادلات الحركية والتكوينية. شروط الحدود للمتغيرات الأولية تسمى الشروط الحدية الأساسية بينما تلك من المجال الثانوي تسمى الظروف الطبيعية أو الحدود .

هناك طريقتان معروفتان لدمج الضغوط محليًا ، وهما طرق صريحة وطرق ضمنية.

4-4-التحقق من صحة تطبيق نموذج Barchelona basic model

1-4-4- بارامترات نموذج BARCELONA Basic Model [56]:

$\mu-1$ نسبة بواسون (معامل التوسع الجانبي للتربة) .

وهي نسبة تفرض للترب الغضارية ونفرضها في دراستنا $\mu = 0.15$

$K-2$ ميل خط التحميل وعدم التحميل للترب المشبعة، مرتبط بدليل الانتفاخ للتربة المدروسة

كما في الشكل [7.7] الذي يوضح كيفية استنتاج قيمته.

Cs : دليل الانتفاخ للتربة المدروسة.

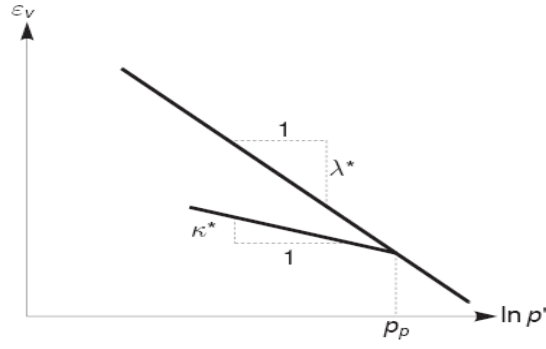
$$K = \frac{2Cs}{2.3} \quad (24,7)$$

$$K=0.072$$

λ_0-3 ميل خط الضغط للترب المشبعة، مرتبط بدليل الانضغاط للتربة كما في الشكل

[7.7] الذي يوضح قيمة .

$$\lambda = \frac{Cc}{2.3} \quad (25,7) \quad Cc: \text{معامل الانضغاط للتربة المدروسة}$$



الشكل [7.4] العلاقة اللوغارتمية بين الحالة الحجمية والإجهاد الحقيقي

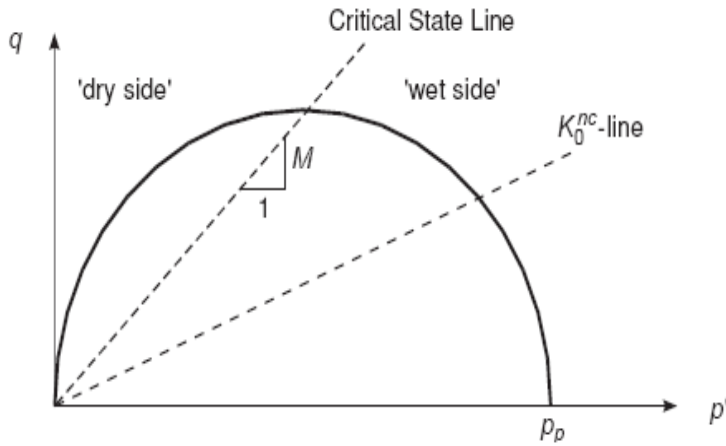
وحسب ماسبق $\lambda = 0.122$

KS-4، متغير يتعلق بالصلابة المرنة نتيجة للامتصاص ، معامل التحميل وعدم التحميل للامتصاص.

$$K_S=0$$

M-5 ميل خط الحالة الحرجة: يحدد شكل سطح الخضوع (القطر الصغير) كما في الشكل [8.7] ويؤثر على معامل ضغط الأرض الجانبي ، ويحسب من العلاقة التالية :

$$M = \frac{6 \sin \Phi}{3 - \sin \Phi} \quad (26,7)$$

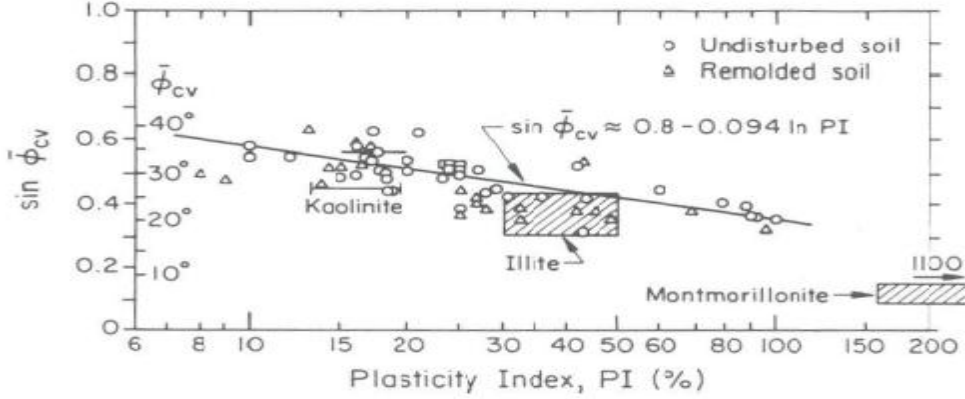


الشكل [8.4] سطح الخضوع في مودل كام كلاي

$$M=0.856$$

6- زاوية الاحتكاك الحرجة عند $CS(\Phi_{cr})$ بالدرجات في الحالة الحرجة ، وهي من البارامترات المطلوبة في النموذج ، وهذه القيمة نستنتجها من مخطط يربط بين دليل اللدونة والزاوية كما هو موضح في الشكل [9.7] .

$$(P_{hi})\Phi_r=28.5$$



الشكل [9.4] زاوية الاحتكاك في الحالة الحرجة كدالة لمؤشر اللدونة Mayne and Kulhawy (1990).

7-G معامل القص ويعطى بالعلاقة :

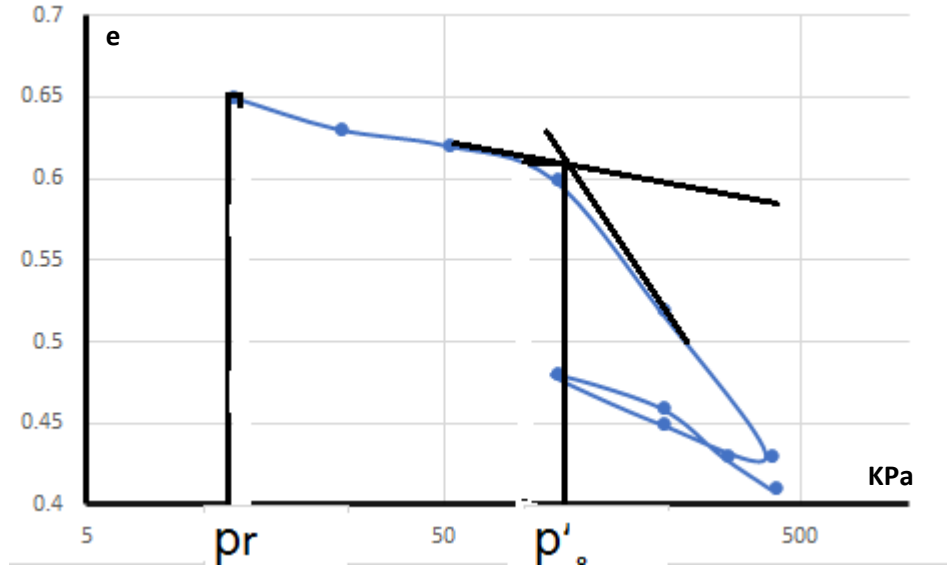
$$G = \frac{3(1-2\mu)K}{2(1+\mu)} \quad (27,7)$$

$$G=0.0657Kn/m^2$$

8-نسبة الفراغ الأولية ، $e_o=0.642$.

9- P_o ضغط التشديد المسبق للتربة المشبعة ، ويتم حسابه من تجربة التشديد بعد إجراء تجربة التشديد واستنتاج قيمته من مخطط الانضغاطية:

$$P_o=1kg/cm^2$$



الشكل [10.4] ضغط التشديد المسبق والإجهاد الحقيقي المرجعي.

10- Pr الإجهاد الحقيقي المرجعي (الوسطي)، ويمكن إيجاد قيمة p_r من خلال طريقة كاساغراندي التخطيطة وذلك برسم المنحني الذي يمثل العلاقة بين $(e, \log \sigma)$:

$$Pr = 0.125 \text{ kg/cm}^2$$

10-r بارامتر للتحكم بالامتصاص النهائي (er) .

$$r = 0.85$$

11- β بارامتر للتحكم بصلاية التربة مع الامتصاص: وهو بارامتر يشير إلى المعدل الذي

يزداد عنده ضغط التشديد المسبق مع الامتصاص ويفرض بين (0.03-0.01).

$$\beta = 0.02$$

12- K_o^{nc} دفع التربة الجانبي: وهو ضغط الإجهاد الموحد المعتاد في ظروف التربة المشددة

تشديد طبيعي.

$$K_o^{nc} = M/2.8$$

$$K_o^{Nc} = 0.305$$

13- POP الضغط الزائد ما قبل التشديد .

$$POP=80 \text{ KN/M}^2$$

14- OCR درجة التشديد المسبق.

$$OCR= 1$$

P_{eq} : الإجهاد الذي تتعرض له التربة حالياً على عمق 534m ، P^P : ضغط التشديد المسبق.

$$P_{eq} = 534 * 1.87 = 998.5 \text{ gr/cm}^2$$

15- α معامل لعدم الارتباط يقانون الجريان:

$$\alpha = M \frac{\tan \Phi'}{\tan \Phi}$$

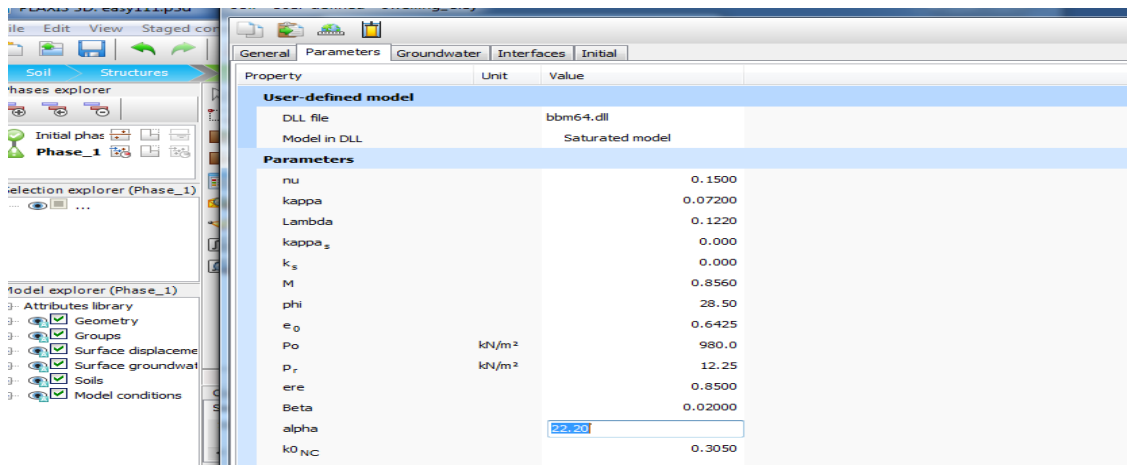
$$\alpha=22.2$$

حيث: Φ' : زاوية الاحتكاك الداخلي عند الحالة الحرجة.

وباستخدام البارامترات السابقة في المودل.

مع العلم أن دليل الانتفاخ للتربة : $C_s = 0.0830$ ، $C_c = 0.282$ معامل النقل

وبذلك تكون البارامترات السابقة هي المطلوبة لمودل برشلونة وكانت قيمها كالتالي :



Property	Unit	Value
User-defined model		
DLL file		bbm64.dll
Model in DLL		Saturated model
Parameters		
nu		0.1500
kappa		0.07200
Lambda		0.1220
kappa _s		0.000
k _s		0.000
M		0.8560
phi		28.50
e ₀		0.6425
P ₀	kN/m ²	980.0
p _r	kN/m ²	12.25
ere		0.8500
Beta		0.02000
alpha		22.20
k _{0 NC}		0.3050

الشكل [11.4] بارامترات النموذج المدروس.

الجدول (4-3) معاملات المثال المرجعي

القيمة	المعامل
0.15	μ
0.072	K_{appa}
0.122	λ_o
0	K_s
0.856	M
28.5	$(P_{hi})\Phi_r$
0.0657Kn/m ²	G
0.642	e_o
$P_o=1\text{kg/cm}^2$	P_o
$Pr=0.125\text{ kg/cm}^2$	Pr
0.85	r
0.02	β
22.2	α
0.305	K_o^{nc}
80	POP
1	OCR

2-4-4- طريقة الحساب فى -PLAXIS-2020:

وظفت طريقة التحليل fully coupled Flow –Deformation

وهذا الحساب يركز على التشوه المقرون بشكل كامل بالجريان وهو التحليل المعتمد على زمن التشوه والإجهاد الكلي والمسامية وإدخال نفاذية التربة المطلوبة واستخدم فاصل زمني غير صفري.

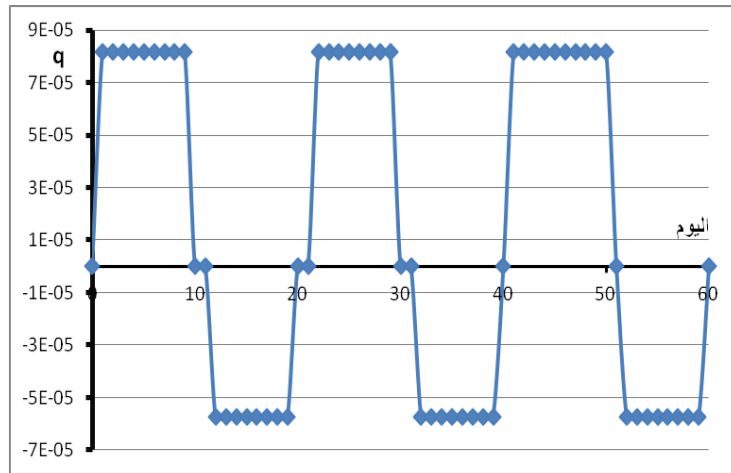
إن هذا التحليل مترافق دوماً بحساب تأثير الامتصاص لكن إذا تم تجاهله قد يؤدي لنتائج غير متوقعة ويولد عدم توازن وعدم اعتبار لضغط الماء المسامي في منطقة التربة غير المشبعة بالإضافة لأن الانتقال بين المراحل من حالة الامتصاص لحالة عدم الامتصاص قد يؤدي لإزالة ضغط الماء المسامي وعدم توازن المنطقة الغير مشبعة، لذلك قام بلاكسس ببناء تحليل سلامة بحيث يتم حل أي عدم توازن بسبب التغيير من الامتصاص لعدم الامتصاص، فعندما نفعل حساب

Flow –Deformation fully coupled نجد أن خيار Ignore suction غير مفعل والدراسات قائمة حتى يتم التأكد من صحتها .

تدفق المياه :

إن تدفق المياه ضمن التربة لا يكون ثابت ويختلف مع الوقت حسب الهطول المطري ومعدل التبخر عن سطح الأرض ، والعمق عن سطح الأرض ، مما يؤدي لتغير الامتصاص مع الوقت، لذلك من الضروري أن نأخذ هذه الحالات بالاعتبار.

تم في هذه الدراسة تطبيق دورات التجفيف والترطيب من خلال جدول (Discharge Function) ضمن (Precipitation) معدل التسرب والتدفق يعطي التدفق مع الزمن في كل دورة ترطيب وتجفيف حيث تم حساب كمية الماء التي كانت تغمر بها العينة خلال مرحلة الترطيب، وكذلك تم حساب كمية المياه المتبخرة وفقاً لنسبة التجفيف ودرجة حرارة التجفيف في الوسط المدروس كما يوضح الشكل [10.7]:



الشكل [10.4] مخطط تدفق الماء في دورات الترطيب والتجفيف

يوضح المخطط السابق تطبيق ثلاث دورات ترطيب وثلاث دورات تجفيف واستمرت كل دورة ما يقارب عشرة أيام ، وتم حساب كمية الماء المتدفقة وفق حجم المسام الذي حصلنا عليه وحجم عينة التربة المدروسة $q=8.174E-05m^3/day$

$$v = \pi \cdot r^2 = 127.23 \text{ cm}^2 = 0.00012723 \text{ m}^3 = \text{حجم العينة}$$

$$0.6425 = e_0 = \text{نسبة الفراغات}$$

$$8.17482 \text{ E-}05 = \text{حجم الماء} = \text{نسبة الفراغ} * \text{حجم العينة الكلي}$$

$$- \text{أما التجفيف وفق درجة الحرارة المطبقة وكمية المياه المتدفقة} q = 5.72 \text{ E-}5 \text{ m}^3/\text{day}$$

5-4- المودل المستخدم :

تبين بالبحث المرجعي أن دورات الترطيب والتجفيف على التربة المنتفخة لها أهمية وفعالية في تخفيف أثر الانتفاخ ولذلك إن الدراسة التحليلية والنمذجة العددية مهمة لتوقع نتائج دورات الانتفاخ والتقلص واستباق الأثر السيء لوجود للترب المنتفخة.

إن التربة المستخدمة هي تربة سوداء منتفخة من منطقة الوعر في حمص والمعطيات الحقلية كما واردة في الفصل الأول .

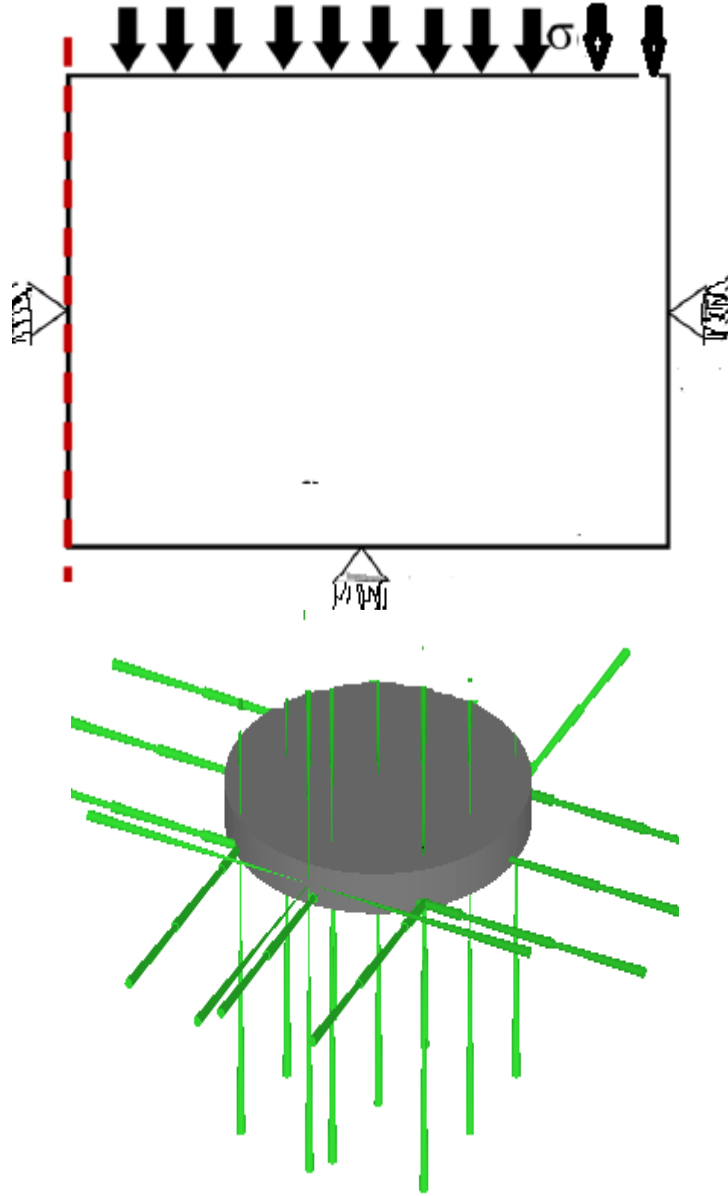
5-4-1- المودل المستخدم

يبين الشكل [11.4] المودل العددي المستخدم الذي يمثل عينة التشديد الاسطوانية وهي مثبتة من كل الجهات وتتعرض للضغط من الأعلى بحمل شاقولي.

- الشروط الطرفية للمودل تحاكي شكل وظروف العينة حيث وضعت من كل الجهات وثيقة ومن الأسفل مثبتة fixed .

- عدد دورات التجفيف والترطيب نعطيها من خلال جدول يعطي التقسيمات الزمنية حسب الفقرة 2-4-7 .

-التصريف من الأسفل ومن الأعلى .



الشكل [11.4] المودل المستخدم

المودل المدروس هو مجسم لعينة التربة المدروسة في تجربة التشديد فهي عينة اسطوانية الشكل أبعادها (50*20) وهي تمثل وسط متناظر من

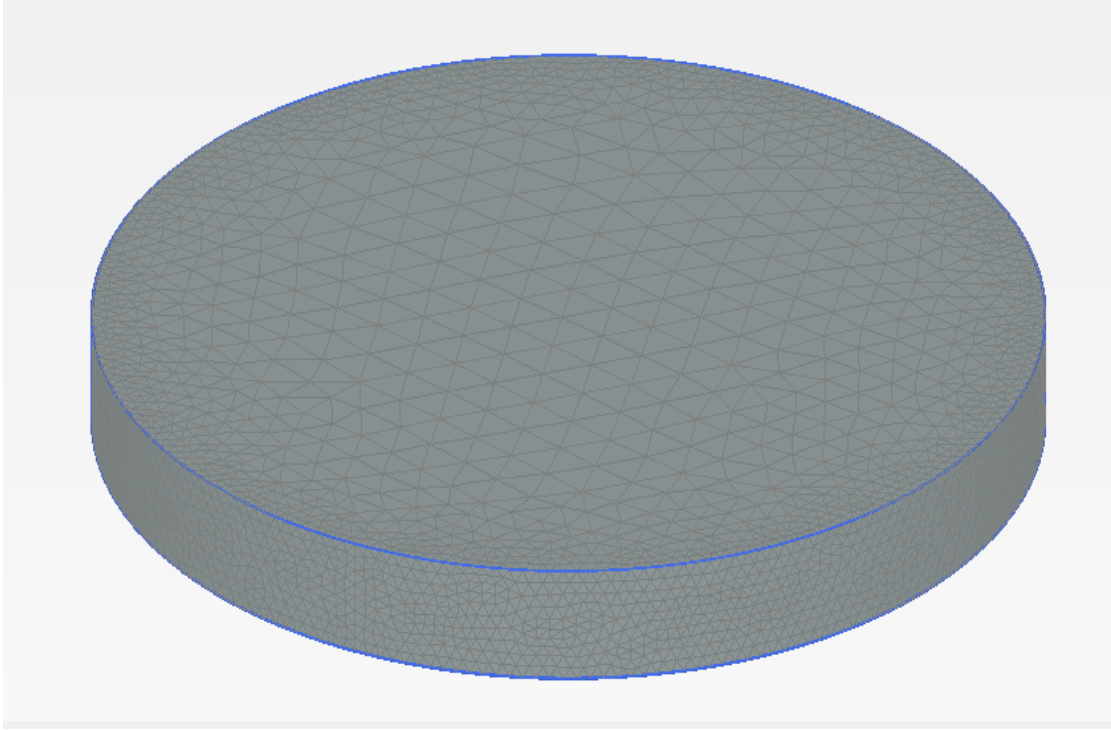
2-5-4 الشروط الطرفية :

- الاجهادات والتشوهات متناظرة حول محور مار من مركز العينة (axisymmetric).
- العينة المدروسة محصورة من ثلاث جهات (الأسفل والجوانب)، بالتالي تم منع التشوه الجانبي الأفقي عند السطوح الجانبية للعينة وسمح بالتشوه الشاقولي فيها، كما تم منع التشوهات الشاقولية والأفقية عند السطح السفلي للعينة وذلك لأننا ندرس حركة التربة الشاقولية .

- وضعت حدود مغلقة للجريان وحدود مغلقة للتسرب عند الأسطح الجانبية للعينة.

3-5-4-التقسيم بطريقة العناصر المنتهية :

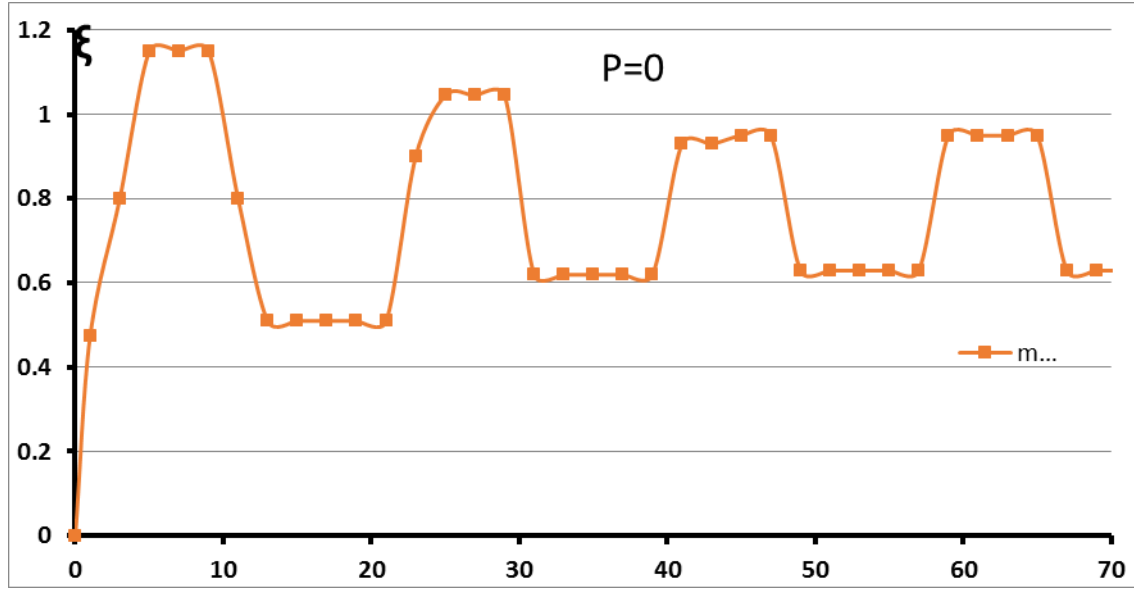
تم تقسيم المودل بطريقة العناصر المنتهية التي تحل مسألة التأثير المتبادل بين التربة والماء ومن أجل سرعة الحساب تم تقسيم شبكة العناصر المنتهية وفق عناصر بسيطة مثلثية وكان المخطط كالتالي:



الشكل [12.4] شبكة العناصر المنتهية

4-6-تحقيق المودل المستخدم :

بإدخال المعطيات على المودل المستخدم وإجراء الحساب باستخدام plaxis 2020 للحصول على الإزاحة الكلية لكل نقاط التربة من شبكة العناصر المنتهية من أجل تحقيق المودل المطلوب حصلنا على المخطط لتالي لأكبر إزاحة لنقاط التربة في العينة :

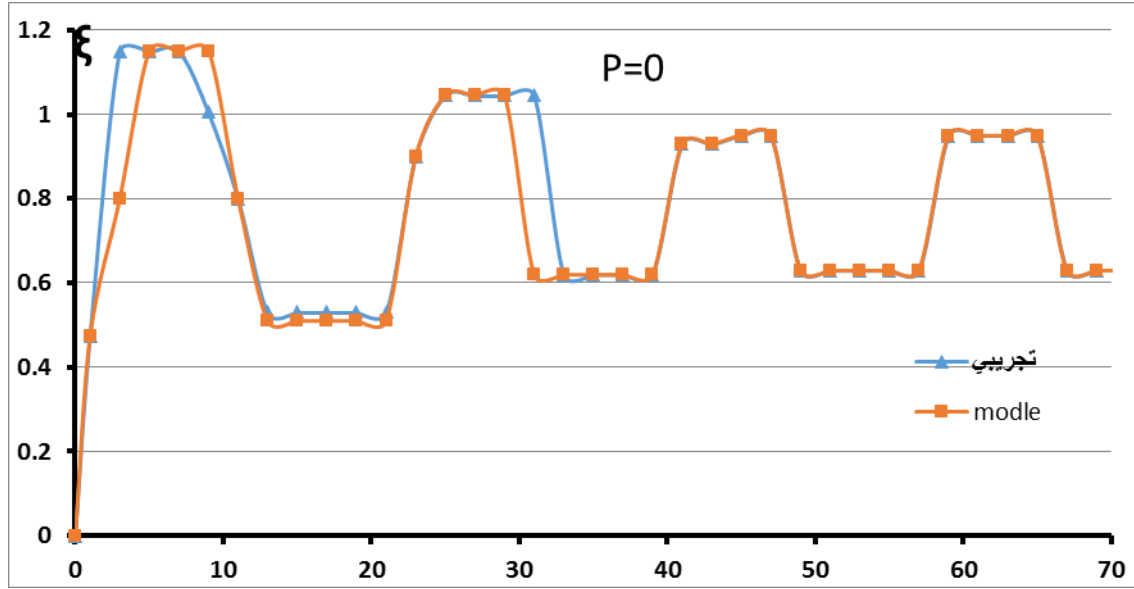


الشكل [13.4] شبكة العناصر المنتهية

1-6-4- معايرة النموذج دون تحميل

في هذا القسم سنقوم بمعايرة المودل المستخدم وذلك باستخدام النتائج التجريبية التي حصلنا عليها بتطبيق دورات الترطيب والتجفيف على التربة المدروسة مع الإشارة أن نسبة الرطوبة البدائية في دورات التحميل ودون تحميل هي متماثلة وذلك لتأثير الرطوبة البدائية على نسبة الانتفاخ.

وبين المخطط التالي مقارنة بين المنحني التجريبي الذي يوضح التغيرات التي تبديها التربة مع تطبيق دورات الترطيب والتجفيف مع الزمن ودون تحميل للعينة والمنحني العددي الذي حصلنا عليه نتيجة النمذجة العددية باستخدام مودل برشلونة وبمقارنة المنحني الناتج مع المنحني التجريبي لاحظنا تقارب النتائج مع بعضها بما يحقق مصداقية المودل كما في الشكل [13.7] :



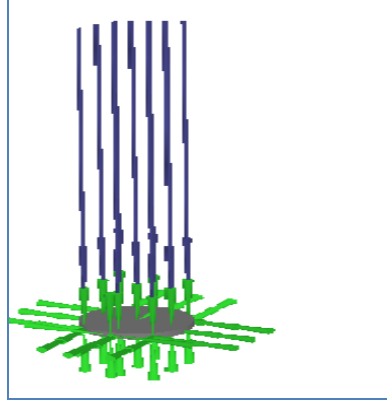
الشكل [14.4] مقارنة بين المنحني التجريبي والعددي دورات دون تحميل .

نلاحظ زيادة كبيرة في تشوهات الانتفاخ خلال الدورة الأولى وحدث ما يسمى بالانتفاخ الحر وهذا ما نلاحظه في المنحني التجريبي والعددي ، وأيضاً السمة المميزة للمنحنيين هي أن مقدار تشوه الانتفاخ في الدورتين الثانية والثالثة تساوي مقدار التقلص في دورة التجفيف الثانية والثالثة. في البداية ، تمتص التربة كمية كبيرة من الماء بشكل مكثف تقريباً ، وفقاً لذلك ، يتم الوصول إلى التشوه الأقصى للانتفاخ سريعاً نسبياً.

تجدر الإشارة أيضاً إلى أنه مع زيادة عدد دورات تجفيف الترطيب ، يتناقص تشوه الانتفاخ إلى حد ما ، يتم تحقيق استقرار تشوهات تقلص في غضون 10 ... 14 يوماً، ميزة هامة لتشوهات تقلص هو أنه مع زيادة في عدد دورات الترطيب ، تقل تغيرات الانتفاخ و تشوه التقلص المستقر النهائي في الدورتين الثانية والثالثة من الترطيب - التجفيف متساوي تقريباً، في حالة عدم وجود حمل خارجي ، يصل تشوه الانتفاخ خلال الساعات الست الأولى إلى أكثر من نصف القيمة المستقرة النهائية ، في نفس الوقت نلاحظ وجود تقارب جيد جداً بين قيم تشوهات الانتفاخ والتقلص التجريبية وقيم التشوهات الانتفاخ والتقلص للنموذج المقترح المدروس ، لكن نلاحظ استجابة النموذج المقترح تكون بعد عدة أيام من التجربة ، مما يعطي موثوقية للمثال المرجعي المدروس ، وفي الفقرة التالية سوف ندرس تأثير تحميل النموذج المقترح للمقارنة النتائج التجريبية والعددية .

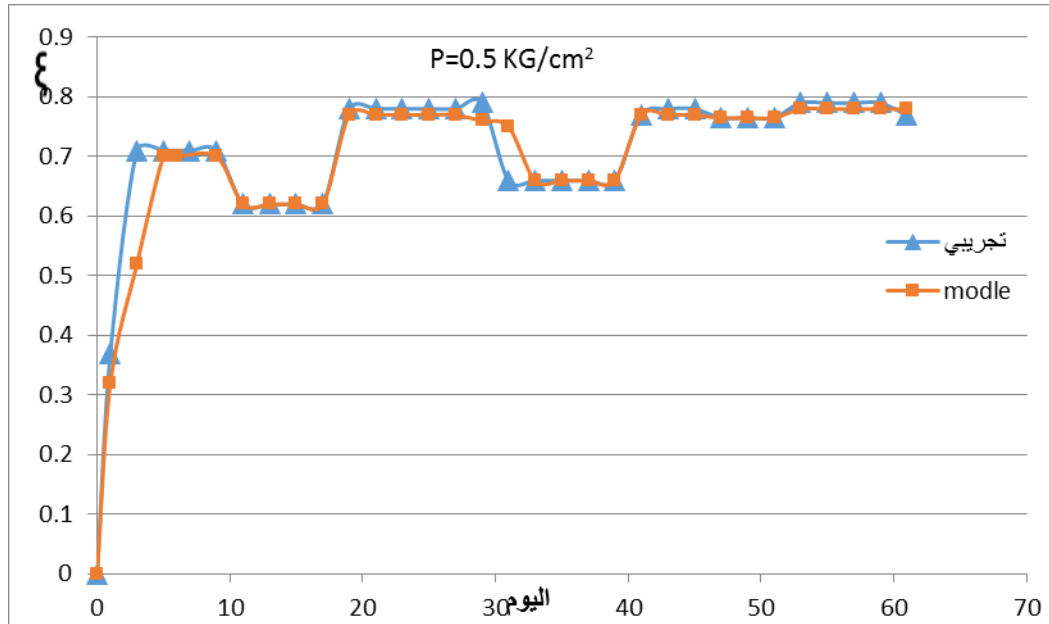
2-6-4- تطبيق إجهاد 0.5 Kg/cm^2

بعد مقارنة المنحني العددي من المنحني التجريبي وفق نموذج التربة المستخدم في البرنامج في الشكل [13.7]، وتحقيق النموذج تقارباً جيداً مع النتائج التجريبية دون تحميل العينة ، تمت محاكاة تحميل العينة بتطبيق حمولة على العينة بمقدار 0.5 Kg/cm^2 ، كما يوضح الشكل التالي :



الشكل [15.4] تطبيق الحمولة على التربة .

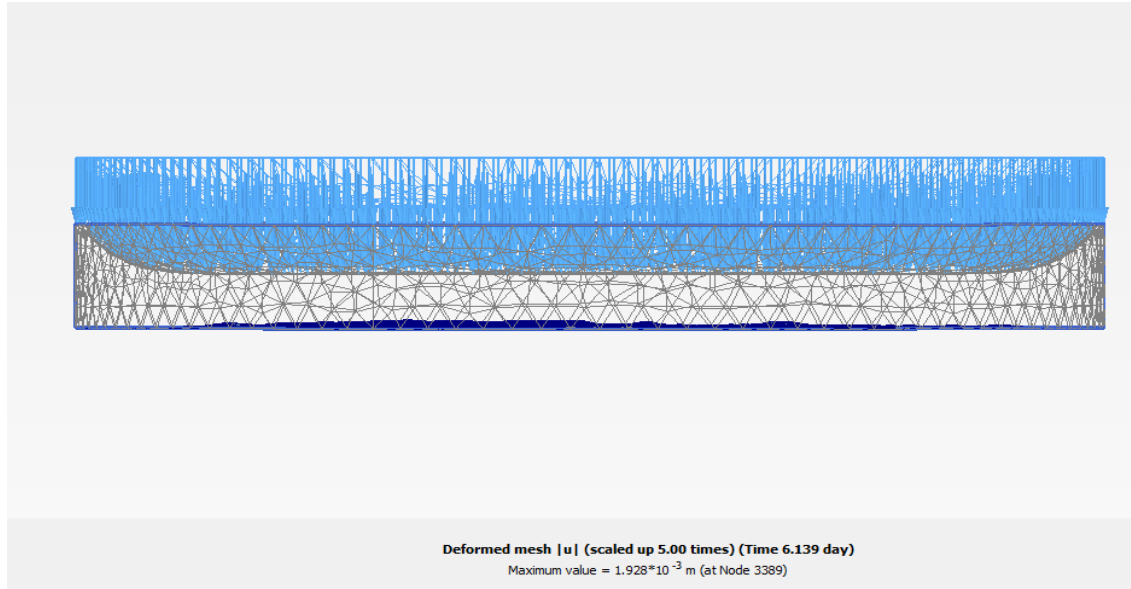
وبتطبيق دورات الترطيب والتجفيف وإجهاد بقيمة 0.5kg/cm^2 ، يبين المخطط التالي مقارنة المنحني التجريبي مع المنحني العددي الناتج :



الشكل [16.4] مقارنة المنحني التجريبي و العددي لحمولة $P=0.5\text{ Kg/cm}^2$

من المخطط نلاحظ، أن استجابة التربة للتغيرات الشاقولية في المنحني العددي تكون متأخرة عن المنحني التجريبي بعد ثلاثة أيام في بعض النقاط، لكن هذه النتائج تعطي مصداقية للمثال المرجعي المدروس بسبب وجود تقارب جيد بين قيم تشوهات الانتفاخ والتقلص التجريبية والعددية .

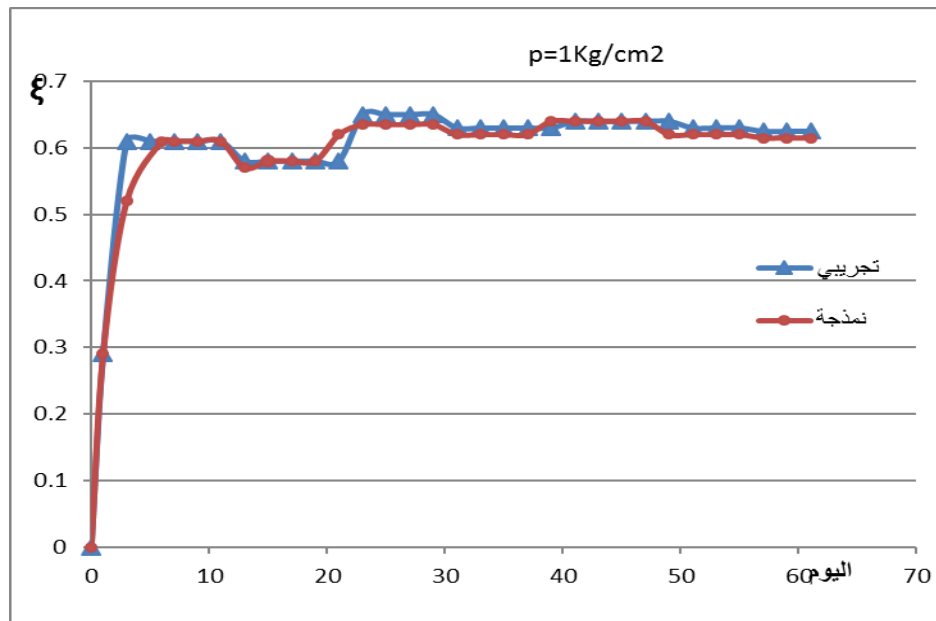
ويبين الشكل التالي عينة التربة وتشوه شبكة العناصر المنتهية مع تطبيق الحمولة:



الشكل [17.4] تشوه شبكة العناصر المنتهية مع تطبيق الحمولة.

3-6-4- تطبيق إجهاد 1kg/cm^2 :

لدراسة سلوك التربة مع تغير الحمولة المطبقة ، الشكل [76] يوضح مقارنة المنحني العددي مع المنحني التجريبي من أجل حمولة 1kg/cm^2 :

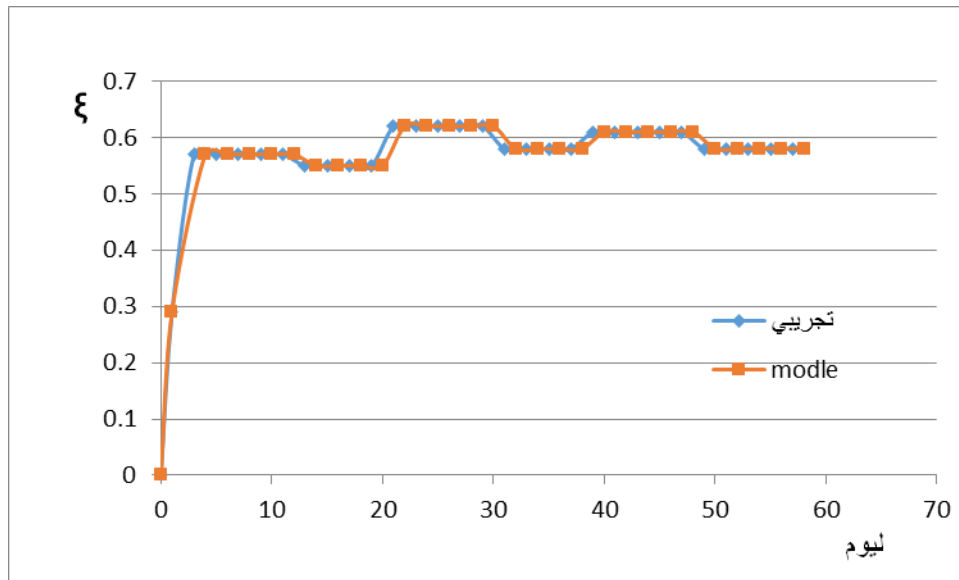


الشكل [18.4] مقارنة المنحني التجريبي و العددي لحمولة $P=1\text{ Kg/cm}^2$

وصول النموذج لقيمة تشوه انتفاخ تقارب التجربة، واستقرار التشوه بعد ثلاث دورات من الترطيب والتجفيف

4-6-4- تطبيق إجهاد 1.5kg/cm^2 :

تم محاكاة وضع العينة في جهاز التشديد مع تطبيق دورات الترطيب والتجفيف وتطبيق إجهاد قيمته 1.5kg/cm^2 ، حيث تم الوصول لمرحلة التوازن بعد تطبيق ثلاث دورات ترطيب وثلاث دورات تجفيف وكان المخطط كالتالي :



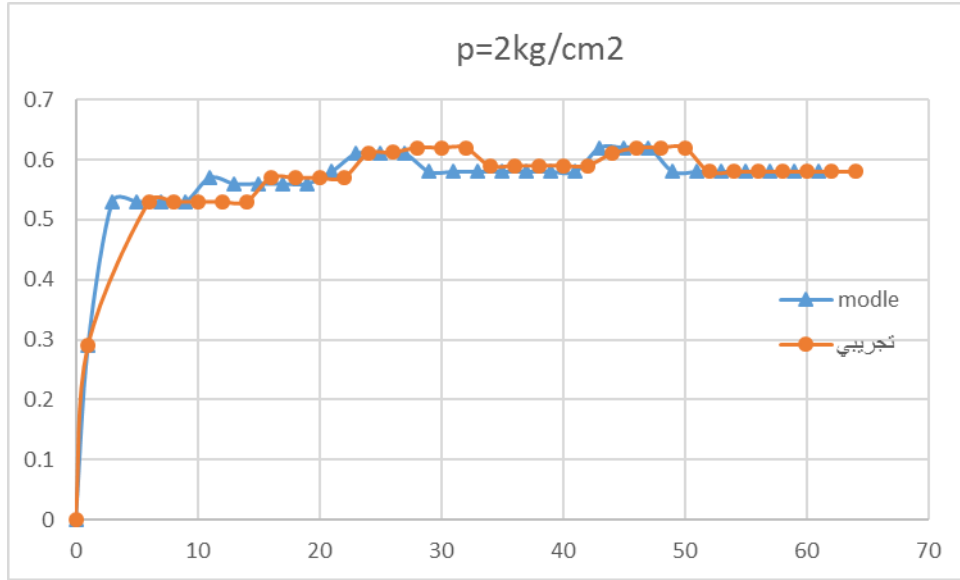
الشكل [19.4] مقارنة المنحني التجريبي و العددي لحمولة $P=1.5\text{ Kg/cm}^2$.

نلاحظ من الشكل السابق التقارب الواضح بين القيم التجريبية والعددية ، ووصول التشوه للاستقرار بعد ثلاث دورات مما يعطي مصداقية أكثر للمودل العددي.

5-6-4- تطبيق إجهاد 2kg/cm^2 :

بنهاية مرحلة التحميل تم تطبيق دورات الترطيب والتجفيف مع تطبيق إجهاد قيمته 2 kg/cm^2

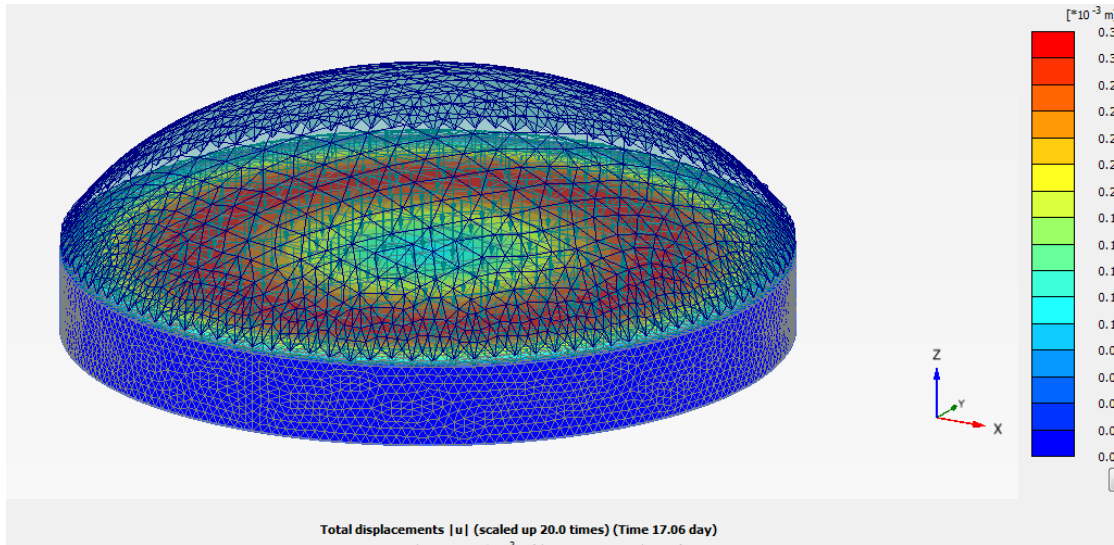
على النموذج المدروس ، وتمت مقارنته مع المنحني التجريبي كما يبين الشكل التالي :



الشكل [20.4] مقارنة المنحني التجريبي و العددي لحمولة $P=2 \text{ Kg/cm}^2$

نلاحظ من المخطط مع زيادة الحمل من 1.5 إلى 2 kg/cm^2 ، يقل التشوه بنسبة 19% فقط. ومن الملاحظ أيضاً أن القوانين التي تحكم التغيرات في التشوهات النسبية للتربة من قيم الضغط في الدورتين الثانية والثالثة تتطابق في المودل العددي كما التجربة.

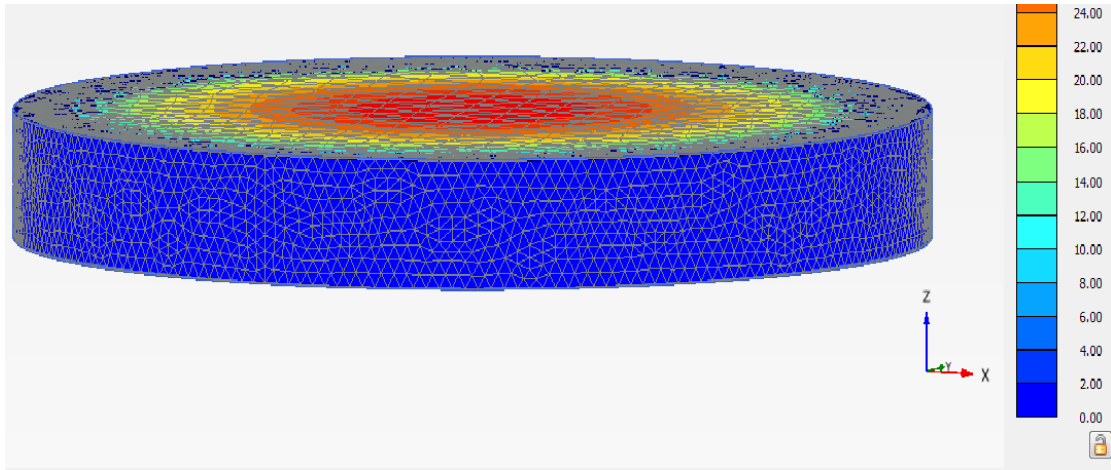
وبين الشكل التالي تغير المودل المستخدم، وسلوك التربة عند تعرضها للتربيط وانتفاخ العينة :



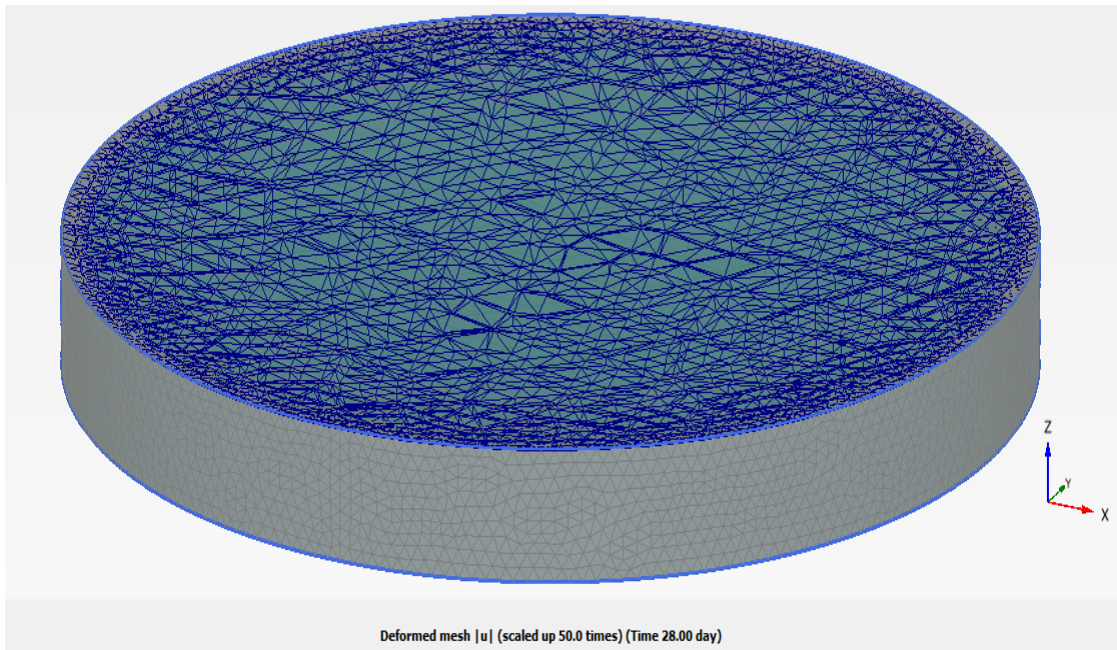
الشكل [21.4] عينة التربة عند الانتفاخ.

يتوضح من الشكل [20.7] تغير وزيادة أبعاد شبكة العناصر المنتهية عند تربيط التربة.

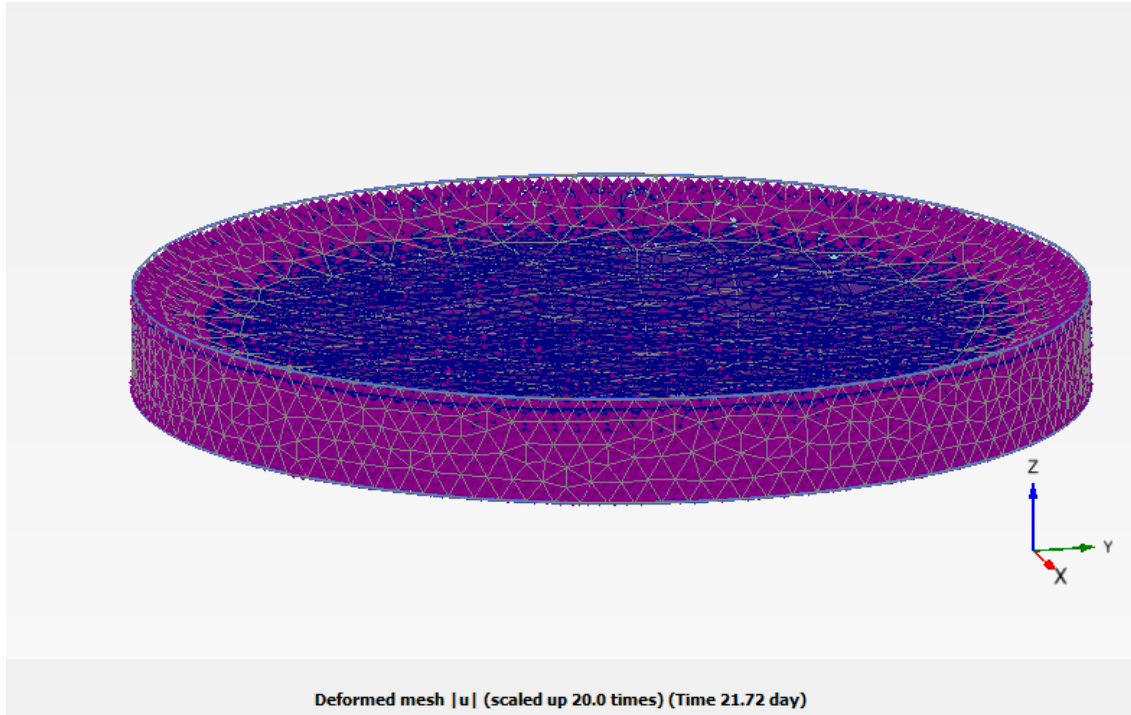
وبين الشكلان التاليان تغير العينة عند التقلص:



الشكل [22.4] عينة التربة عند التجفيف.

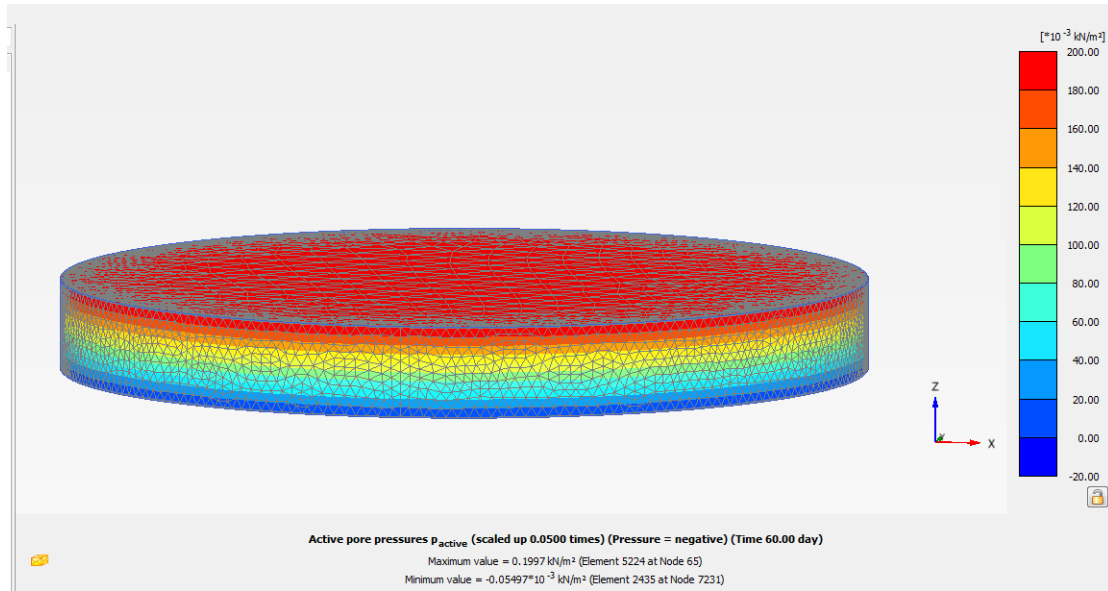


الشكل [23.4] تشوه شبكة العناصر المنتهية عند التجفيف



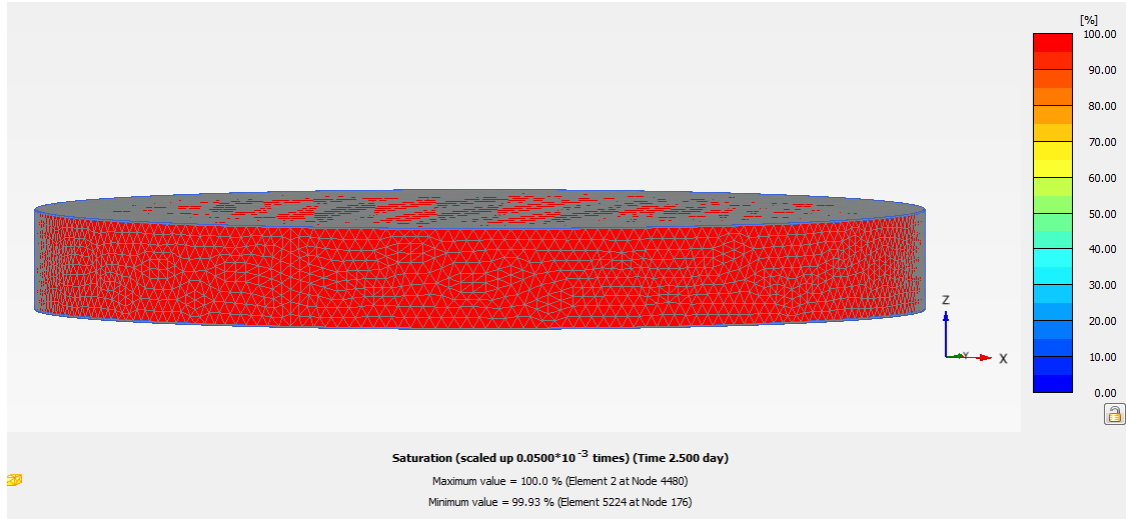
الشكل [24.4] تشوه شبكة العناصر المنتهية عند التجفيف بعد 21 يوم.

نلاحظ من الشكل السابق تغير أبعاد شبكة العناصر المنتهية عند تجفيف العينة .



الشكل [25.4] تغير ضغط الماء المسامي مع الزمن

ويوضح المخطط التالي درجة الإشباع بعد يومين من الغمر والترطيب



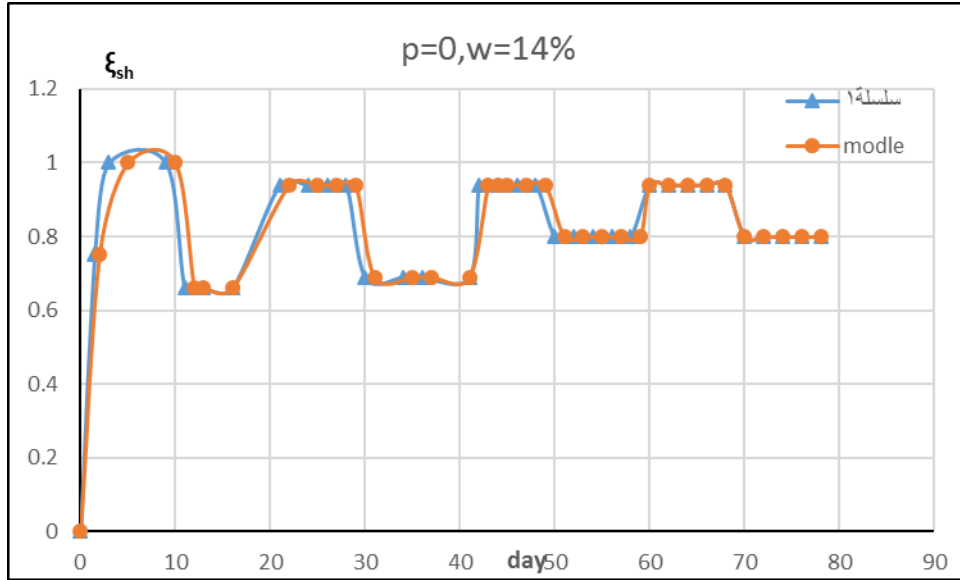
الشكل [26.4] درجة الإشباع للمودل مع الزمن.

7-7-4-تطبيق دورات تغيير الرطوبة :

تبين في الدراسة التجريبية التأثير الواضح لقيمة ومحتوى الرطوبة الأولية للتربة على قيمة سلوك تشوه التربة ومقدار تشوه الانتفاخ والتقلص ، لذلك تم في هذا القسم محاكاة دورات الترطيب – التجفيف مع تغيير قيم الرطوبة الأولية المطبقة حيث أخذت القيم (14%,21%).

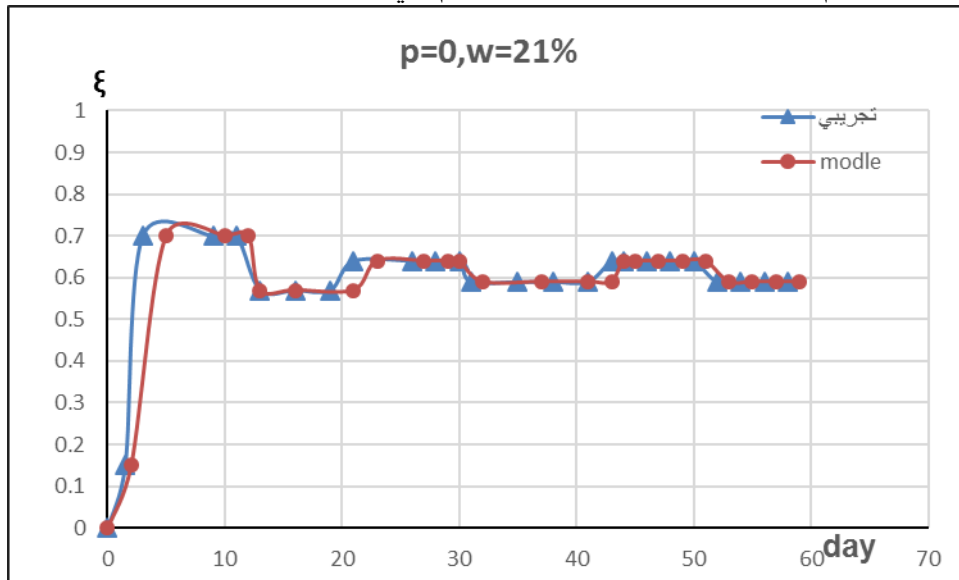
1-7-4- دورات الرطوبة دون تحميل :

تم محاكاة وضع العينة في جهاز التشديد و الرطوبة الأولية من خلال تغيير قيم الترطيب الأولي في بارامترات النموذج المقترح وكانت نتائج النمذجة لدورات الترطيب والتجفيف دون تحميل كما يلي :



الشكل [27.4] مقارنة المنحني التجريبي و العددي مع تغيير الرطوبة .

ومن أجل قيم الرطوبة 21% كان المخطط كم يلي :

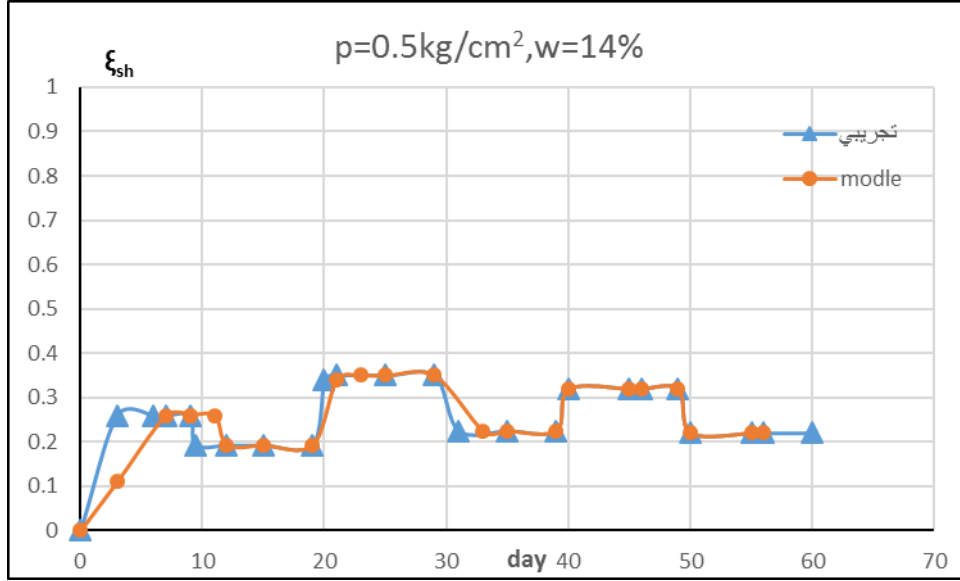


الشكل [28.4] مقارنة المنحني التجريبي و العددي مع تغيير الرطوبة .

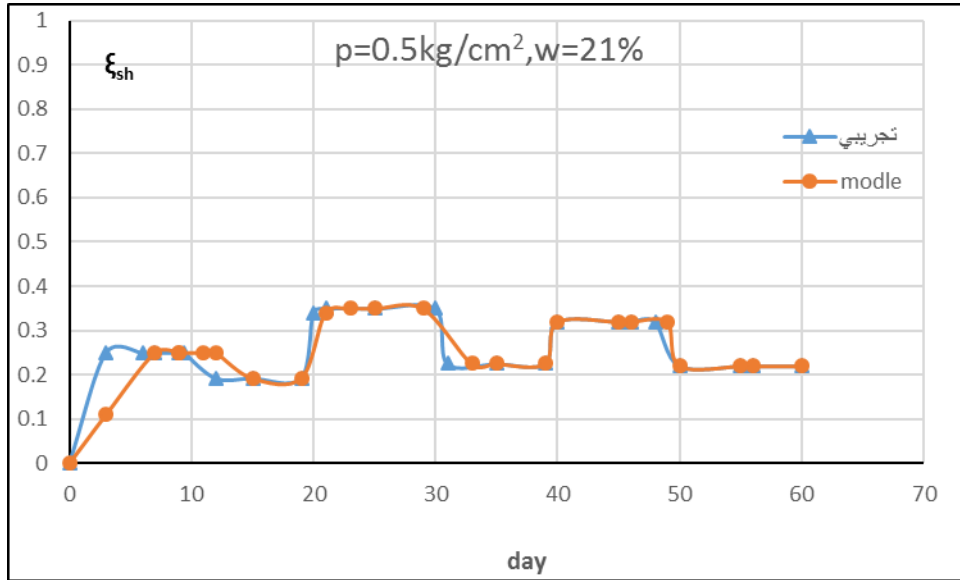
ومن المخطط نلاحظ تقارب جيد جداً بين قيم التشوهات التجريبية وقيم تشوهات الانتفاخ والتقلص في النموذج المقترح من أجل قيم الرطوبة البدائية 14%, 21% ،ومن ذلك نستنتج أن المودل المقترح قادر على نمذجة سلوك التربة الغضارية المنتفخة في دورات الترطيب والتجفيف.

2-7-4- دورات الرطوبة 0.5kg/cm^2 :

من أجل دراسة أثر الرطوبة الأولية على دورات الترطيب والتجفيف وتحت التحميل يبين الشكل التالي منحنيات الانتفاخ- التقلص من أجل قيم الرطوبة الأولية 14-21%، وتحت حمولة 0.5 kg/cm^2 .



الشكل [29.4] مقارنة المنحني التجريبي و العددي مع تغيير الرطوبة .

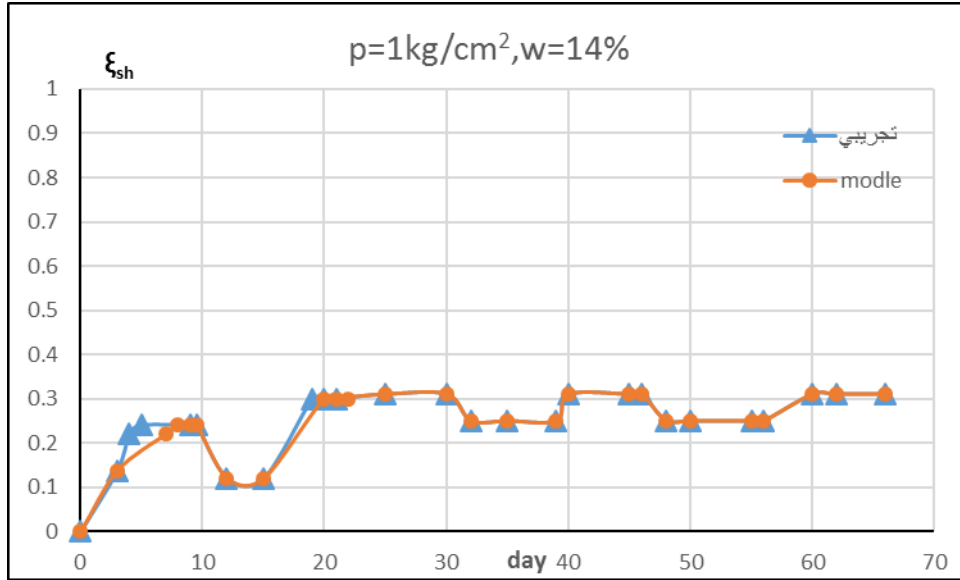


الشكل [30.4] مقارنة المنحني التجريبي و العددي مع تغيير الرطوبة .

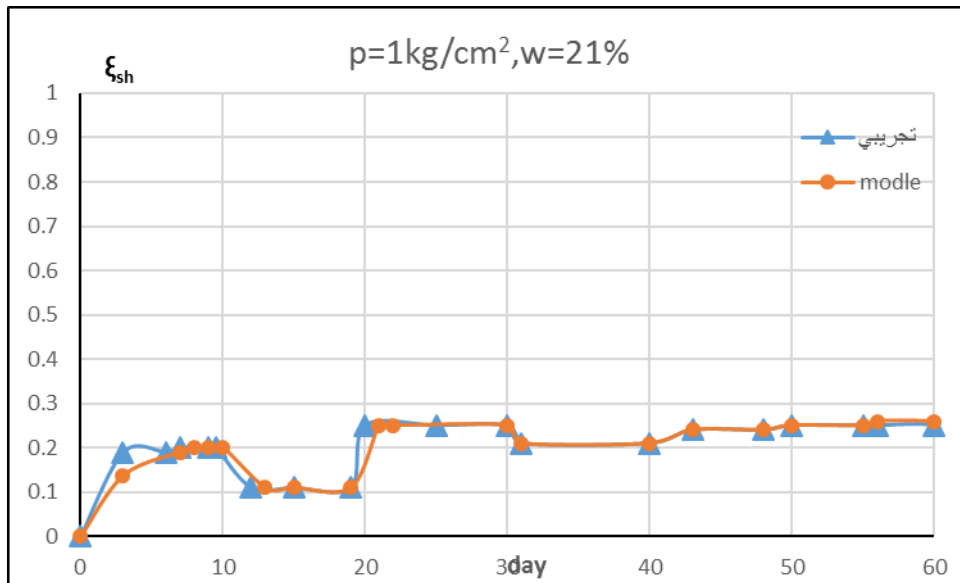
نلاحظ من المنحنيات السابقة أن تحميل التربة يؤدي إلى تناقص قيمة تشوهات الانتفاخ والتقلص ، بالإضافة لتأثير محتوى الرطوبة البدائي حيث انخفضت قيمة التشوهات مع زيادة محتوى الرطوبة الأولي من 14% إلى 21%.

3-7-4- دورات الرطوبة 1 kg/cm^2 :

من أجل دراسة تأثير الرطوبة الأولية على مقدار تشوهات الانتفاخ والتقلص ، أجرينا الحساب على المثال النموذجي من أجل $P=1 \text{ kg/cm}^2$ ، ويبين الشكل التالي منحنيات دورات الترطيب – التجفيف :



الشكل [31.4] مقارنة المنحني التجريبي و العددي مع تغيير الرطوبة .

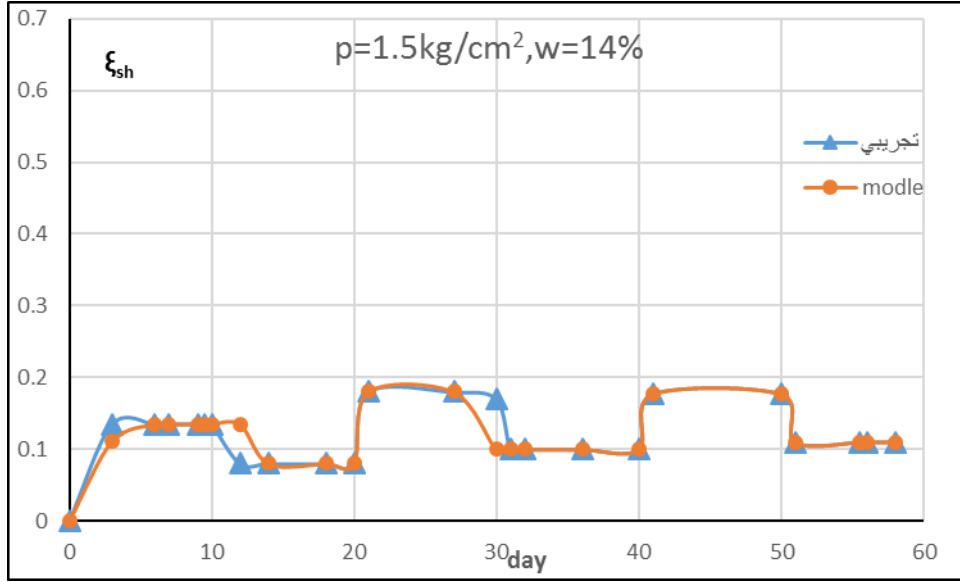


الشكل [32.4] مقارنة المنحني التجريبي و العددي مع تغيير الرطوبة .

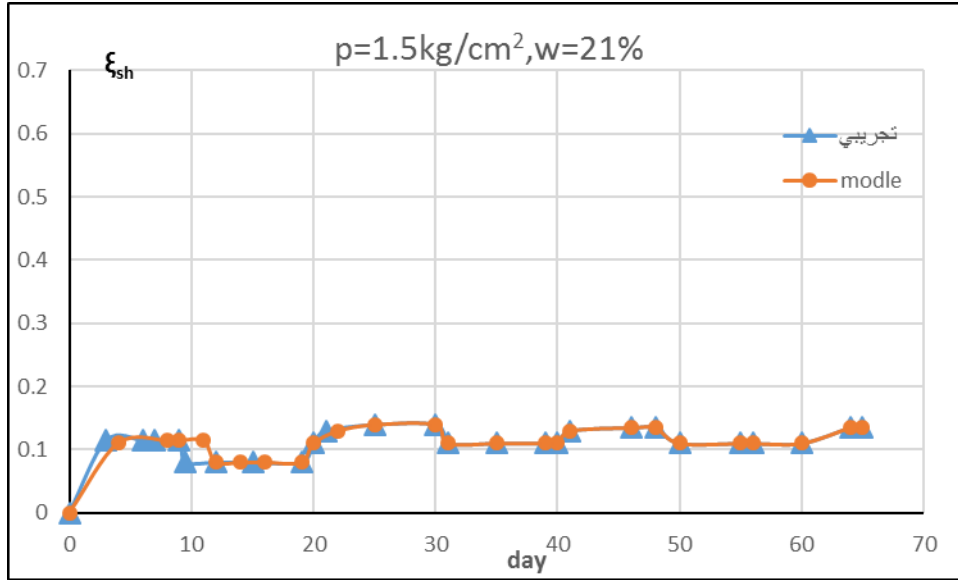
يتبين من المنحنيات السابقة أن مقدار الفرق بين تشوهات الانتفاخ والتقلص عند الرطوبة 14%، يكون أكبر من الفرق بين قيمة تشوهات الانتفاخ والتقلص عند قيمة رطوبة أولية 21%.

4-7-4- دورات الرطوبة مع تحميل $1,5 \text{ kg/cm}^2$:

ولاستكمال دراسة تأثير محتوى الرطوبة الأولية مع تحميل العينة بإجهاد $P=1.5\text{Kg/cm}^2$ ، كما توضح المخططات التالية:



الشكل [33.4] مقارنة المنحني التجريبي و العددي مع تغيير الرطوبة .

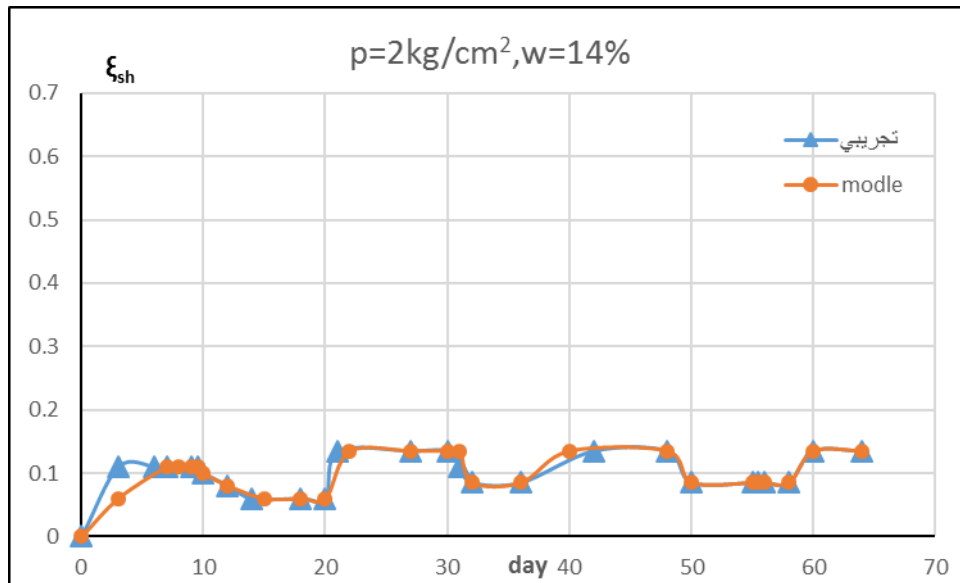


الشكل [34.4] مقارنة المنحني التجريبي و العددي مع تغيير الرطوبة .

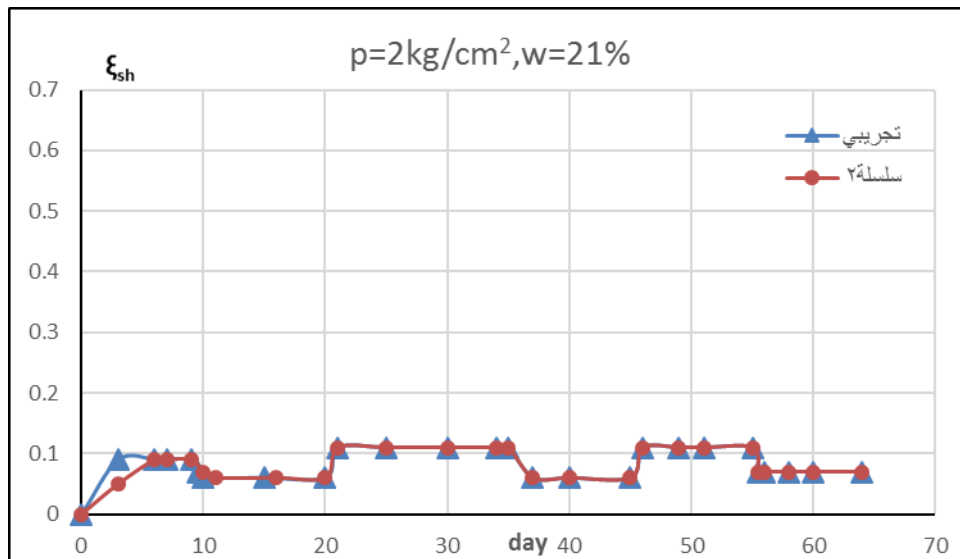
من المنحنيات السابقة يتبين تأثير محتوى الرطوبة الأولي على قيمة تشوهات الانتفاخ والتقلص ، وتناقص قيمة التشوهات مع تحميل التربة بإجهاد $P=1.5\text{Kg/cm}^2$ حيث تناقصت قيمة التشوهات بقيمة أكبر مع زيادة الرطوبة الأولية .

5-7-4- دورات الرطوبة مع تحميل 2kg/cm^2 :

وبنهاية مرحلة التحميل من أجل $P=2\text{Kg/cm}^2$ ، تبين المنحنيات دورات الترطيب والتجفيف من أجل قيم الرطوبة الأولية ($P=14\%, P=21\%$):



الشكل [35.4] مقارنة المنحني التجريبي و العددي مع تغيير الرطوبة .



الشكل [36.4] مقارنة المنحني التجريبي و العددي مع تغيير الرطوبة .

نلاحظ من المنحنيات أنه مع الزيادة المستمرة في رطوبة التربة والنقص يتأثر مقدار انتفاخ التربة أيضاً بحجم قيمة الضغط ، فعند حمولة $P=2 \text{ Kg/cm}^2$ نلاحظ حدوث تشوهات أكبر بنسبة 44% ، في الدورة الأولى وكان نطاق التغيرات في رطوبة التربة أثناء التقلص أكبر بنسبة 55% من عملية الانتفاخ ، لذلك كان تشوه التقلص بهذه الدورة إلى 44% أكبر من الانتفاخ .

8-4- الاستنتاجات

تضمن هذا القسم دراسة عددية بطريقة العناصر المنتهية على التربة الغضارية المنتفخة المعرضة لدورات متعددة من الترطيب والتجفيف وبعض البارامترات المؤثرة عليها. وذلك باستخدام نموذج برشلونة الأساسي (BBM-model) باستخدام برنامج Plaxis 2020 ، وبتطبيق عدة دورات ترطيب وتجفيف بدون تحميل ثم مع تحميل ، أظهر تحقيق المودل على قياسات تجريبية تقارباً كبيراً بين النتائج العددية والتجريبية وقد توصلنا إلى العديد من النتائج التي تم ذكرها في سياق البحث والتي يمكن تلخيص أهمها بالنقاط التالية:

- إن التربة المنتفخة تعطي في الدورة الأولى قيمة كبيرة للانتفاخ تتناقص مع تكرار دورات الترطيب والتجفيف .
- تتناقص قيمة تشوه الانتفاخ للعينة المدروسة حتى يثبت بعد الدورة الثالثة من الترطيب والتجفيف .
- يتناقص مطال التقلص حتى يثبت بعد الدورة الثالثة من الترطيب والتجفيف.
- هذه الدراسة تسمح بالحصول على فكرة تقريبية عن تأثير انتفاخ التربة وتقلصها بحالة الترطيب والترطيب الجزئي وكذلك التجفيف والتجفيف الجزئي على الإجهادات وتوزيع الضغوط ضمن التربة ، ليتم تلافي الأثر السيئ المحتمل لهذه التغييرات .
- تتأثر القيمة المستقرة النهائية لتشوهات تقلص وانتفاخ التربة الغضارية بشكل كبير بقيمة الضغط الخارجي ، مع زيادة الضغط الخارجي وفقاً لانخفاض قدرة الامتصاص للتربة ، تنخفض أيضاً قيمة تشوهات الانتفاخ والتقلص.
- تعتمد القيمة النهائية لتشوهات الانتفاخ والتقلص بشكل أساسي على رطوبة التربة الأولية ؛ كلما زاد مدى التباين في الرطوبة ، زاد مقدار تشوه التربة. نطاق التغيرات في رطوبة التربة في الدورتين الثانية والثالثة من (دورات ترطيب تجفيف) هو نفسه. وفقاً لذلك ، في هذه الدورات يتم تحقيق نفس مجموعة التغيرات في تشوهات الانتفاخ والتقلص. نتيجة لذلك ، تعتمد القيمة النهائية لتشوهات الانتفاخ والتقلص على مدى التغيرات في رطوبة التربة ؛ كلما زادت التباين في رطوبة التربة ، زاد تشوهات الانتفاخ والتقلص. حجم تشوهات الانتفاخ يعتمد أيضاً على تشوهات التقلص. وكلما زاد حجم الأخير ، زاد تشوه انتفاخ التربة و قدرة امتصاص الانتفاخ والتقلص مقارنة بدورة التجفيف الأولى.
- من دراسة الرطوبة الأولية تبين كلما زادت قيمة الرطوبة الأولية انخفض عدد دورات الترطيب والتجفيف للتربة اللازمة للوصول لمرحلة التوازن .

الفصل الخامس

الاستنتاجات والتوصيات

5-1- الاستنتاجات:

- تضمن هذا البحث دراسة تجريبية للتربة الغضارية المعرضة لدورات متكررة من الترطيب والتجفيف، سمحت هذه الدراسة بدراسة التغيرات والتشوهات التي تحدث في التربة الغضارية مع تكرار دورات الترطيب والتجفيف، حيث تم تصميم جهاز يسمح بتجفيف عينة التربة المدروسة لدرجة الحرارة المطلوبة وذلك لمحاكاة ظروف التربة في الحقل، أما الترطيب فكان من خلال غمر التربة بشكل مستمر.

- كذلك تضمنت هذه الدراسة تطبيق دراسة عددية تحليلية بطريقة العناصر المنتهية للتربة المنتفخة المعرضة لدورات متعددة من الترطيب والتجفيف، حيث تم تصميم مودل عددي لعينة التربة المتوضعة في جهاز التشديد باستخدام برنامج PLAXIS 2020 ، وباستخدام مودل Barcelona Basic Mode برشلونة الأساسي ، وهو المودل العددي الوحيد القادر على نمذجة سلوك التربة الغضارية المنتفخة ، حيث تم نمذجة سلوك التربة المنتفخة من خلال إدخال البارامترات الي حصلنا عليها في الدراسة التجريبية على النموذج المقترح تطبيق دورات الترطيب والتجفيف للحصول على محاكاة للتربة في الموقع .

- نتائج الدراسة التجريبية بينت أن التربة الغضارية المعرضة لدورات متكررة من الترطيب والتجفيف، تبدي سلوكاً حقيقياً متغيراً، حيث تكون التشوهات في البداية كبيرة ومدى التباين بين تشوهات الانتفاخ والتقلص يكون كبيراً في البداية، ومع تكرار الدورات يقل التباين بين تشوهات الانتفاخ والتقلص وتثبت التشوهات حتى تتوازن في الانتفاخ والتقلص.

- أظهرت الدراسة البارامترية أن محتوى الرطوبة البدائي للتربة في بداية دورات الترطيب والتجفيف من البارامترات الهامة والمؤثرة على سلوك التربة المنتفخة، حيث بينت الدراسة التجريبية أنه كلما زاد محتوى الرطوبة البدائي انخفضت قيمة تشوهات الانتفاخ والتقلص الحاصلة للتربة فالعلاقة بين محتوى الرطوبة البدائي وقيمة التشوهات الحاصلة علاقة عكسية، مما يساهم في تقليل عدد دورات الترطيب والتجفيف اللازمة للوصول لعتبة التوازن والثبات.

- أظهرت الدراسة البارامترية أن قيمة الحمولة المطبقة على التربة في بداية دورات الترطيب والتجفيف، من البارامترات المؤثرة على سلوك التربة المنتفخة المعرضة لدورات متكررة من الترطيب والتجفيف، وقيمة تشوهات الانتفاخ والتقلص تتناقص بشكل خطي مع زيادة قيمة الحمولة البدائية المطبقة في بداية دورات

الترطيب والتجفيف، حتى تصل لمرحلة تكون فيها التشوهات غير ملموسة مع حمل مطبق يصل إلى 2Kg/cm^2 وتطبيق دورات الترطيب والتجفيف المتكررة.

- دورات الترطيب وتشوه الانتفاخ تتحدد بالعلاقة التالية كما يلي:

$$\xi_{sw} = -0.0219d^2 + 0.305d + 0.1615 \quad -$$

حيث: d الزمن بالأيام ، من أجل الدورة الأولى.

- دورات الترطيب وتشوه الانكماش تتحدد بالعلاقة التالية في درجة الحرارة كما يلي:

$$\xi_{sh} = \sigma_y d^{\beta_y} \quad -$$

حيث: d الزمن بالأيام ، والثابت الموجودة $\alpha_y = 0.099, \beta_y = 0.614$ ثابتة من أجل الدورة الأولى .

- العلاقة بين تشوه الانتفاخ وتشوه التقلص في الدورتين الثالثة والثانية من خلال العلاقة:

$$\xi_{sh} = 0.83\xi_{sw} - 0.0023$$

- يمكن تقريب دورات التجفيف من خلال قانون القوة المتمثلة في التجفيف كمايلي:

$$\xi_{sw} = -\sigma_y t^{\beta_y}$$

- يتم تحديد هذه الثوابت بواسطة شبكة لوغاريتمية من الإحداثيات، وهي ثابتة لكل دورة، التغير يكون فقط عند الانتقال من دورة لأخرى.

- في الدراسة العددية تم تطبيق سلسلة دورات الترطيب والتجفيف على النموذج المقترح حيث أعطت التربة قيمة كبيرة لتشوهات الانتفاخ والتقلص في بداية الدورات، ومع الزمن وتكرار هذه الدورات وصلت التربة لمرحلة الثبات واستقرار التشوهات مع الوقت.

- أظهرت الدراسة التحليلية أن محتوى الرطوبة البدائي للتربة من البارامترات الهامة التي تؤثر على سلوك التربة وقيمة التشوهات الحاصلة في دورات الترطيب والتجفيف.

- يمكن استخدام المودل العددي المقترح من أجل دراسة أنواع مختلفة من التربة المنتفخة مع تطبيق دورات الترطيب والتجفيف وذلك لدراسة سلوكية التربة والتغيرات والتشوهات التي تبديها التربة المنتفخة مع تطبيق دورات الترطيب والتجفيف.

- إن البارامترات المؤثرة على قيمة تشوهات الانتفاخ والتقلص يمكن أن نستفيد منها في تجنب الأثر السيء لسلوك التربة المنتفخة قبل المباشرة بالبناء عليها.

- من المفضل أن تكون التربة برطوبة مرتفعة نسبياً، فهناك علاقة عكسية بين معدل الرطوبة الأولية ومقدار الانتفاخ والتقلص، فالرطوبة الأولية المرتفعة تساهم في تقليل عدد دورات الترطيب والتجفيف اللازمة للوصول إلى مرحلة التوازن وثبات التغيرات.

- مع زيادة عدد دورات الترطيب والتجفيف المطبقة على التربة الغضارية المنتفخة، تتخفض قيمة التشوهات الحاصلة مع الوقت حتى تصل لمرحلة الثبات، وهذه النتيجة ممكن أن تؤخذ بالاعتبار عند التأسيس على هذا النوع من التربة حتى تخفف من الضرر الحاصل نتيجة سلوكها الانتفاخي.

- إن العلاقات المستنتجة من البحث تطبق على التربة الغضارية التي تطابق مواصفاتها التربة المدروسة في البحث .

2-5-التوصيات

استكمالاً لهذه الدراسة يمكن التوصية في الدراسات المستقبلية بالنقاط التالية :

- أنجز هذا البحث لدراسة سلوك الترب الغضارية المنتفخة المعرضة لدورات متكررة من الانتفاخ والتقلص باستخدام مودل برشلونة للترب المنتفخة (BBM) وهذا المودل يأخذ تأثير الامتصاص على سلوك الترب الانتفاخية بعين الاعتبار، لكن اعتمدنا في التحليل على الحساب الذي يتجاهل الامتصاص (SUCTION)، لذلك دراسة سلوك التربة الانتفاخية المعرضة لدورات متكررة من الانتفاخ والتقلص مع تغيرات الامتصاص من المواضيع الهامة لإغناء هذه الدراسة .

- دراسة تأثير معاملات النموذج العددي المقترح على سلوك التربة الغضارية المنتفخة وذلك لتحديد المعامل الأكثر تأثيراً على سلوك التربة الغضارية المنتفخة، والاستفادة منه في تجنب الأثر السيء لسلوك التربة المنتفخة ، من خلال تحديد القيمة الحدية له التي تعطي انتفاخ أعظمي ، مما يعطينا فكرة مبدئية عن القيمة المقبولة عند اختبار التربة قبل التأسيس عليها .

- تطبيق هذه الدراسة على عدة أنواع من التربة المنتفخة ، والتوسع في تطبيق هذه الدراسة على التربة المثبتة بالجير والمواد المثبتة الأخرى ، لتكون نتائجها أكثر شمولية ، .
- استنتاج علاقات تربط بين البارامترات المؤثرة والنشوهات النسبية للانتفاخ والتقلص ، للاستفادة منها في تجنب سلوك التربة الغضارية الانتفاخي .
- إن دراسة التربة الغضارية المنتفخة المشبعة جزئياً وفق مودل برشلونة (BBM) ، من الحالات المهمة للدراسة المستقبلية ، حيث يشكل موضوع الإشباع الجزئي للتربة أقرب واقعية لحالات التربة في الطبيعة .
- في مناطق من توزع التربة في المناطق المتجمدة تتعرض التربة لدورات من التجميد - الذوبان مغايرة لدورات الترطيب -التجفيف وهذا يعطي فكرة هامة للبحث المستقبلي من ناحية الدراسة التجريبية والعديدية .

قائمة المراجع :

Reference

- 1- **Subba Rao, K.S. 2000.** Swell-Shrink Behaviour of Expansive Soils Geotechnical Challenges, Professor and Chainnan, Department of Civil Engineering, Indian Institute of Science, Ban galore- 560 012, India,pp1-68
- 2- **Al-Hussaini,O.M.2017.** Volume change behaviour of some geomaterials under combined influence of freeze-thaw and wet-dry cycles: An experimental investigation, Geoenviromental Research Centre, Cardiff School of Engineering, Cardiff University,pp1-255.
- 3- **F. Zhao, et al .,2018.** Modeling of the swelling–shrinkage behavior of expansive clays during wetting–drying cycles, Key Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2018,Pp1-12.
- 4- **Khana.M.A,Wang.J.X,Patterson.W.P.2017.** A study of the swell-shrink behavior of expansive Moreland clay, aPrograms of Civil Engineering and Construction Engineering Technology, Louisiana Tech University, Ruston, LA, USA; bSchool of Agricultural Sciences and Forestry, Louisiana Tech University, Ruston, LA, USA,Pp1-14.
- 5-**Mokhtari .M, Dehghani.M. 2012.** Swell-Shrink Behavior of Expansive Soils, Damage and ControlDepartment of civil engineering, University of Hormozgan, Bandar abbas, Iran,Pp1-10.
- 6- **Basma,A.A., at El., 1996 .,**Swelling-shrinkage behavior of natural expansive clay, **Applied Clay Science, vol 11. 211-227 .**
- 7- **Cokca, E.2001.,** Use of Class C Fly Ashes for the Stabilization of Expansive Soil,Journal of Geotechnical and Geoenviromental Engineering, Vol. 127, No.7,pp.568-573.
- 8- **مواقع انترنت-**
<http://www.nrcs.usda.gov/technical/worldsoils/mapindx>
- 9- **منشورات جامعة البعث ،كلية الهندسة المدنية ،هندسة الأساسات (3)، عيسى كوسا -**
- 10- **Liu, S et, al (2015):**Field study of treatment for expansive soil/rock channel slope with soilbags, Elsevier Ltd. All rights reserved, Geotextiles and Geomembranes,Pp283-292.
- 11-**Nowamooz,H. Jahangir, E. Masrouri, F.2013.** Volume change behaviour of a swelling soil compacted at different initial states, LGECO, INSA de Strasbourg, 24 Boulevard de la Victoire, 67084, Strasbourg Cedex, France,Pp 1-11.
- 12-**Tripathy, S. Subba Rao, K.S. 2009.** Cyclic swell-shrink behaviour of a compacted expansive soil. *Geotechnical and Geological Engineering* 27(1), pp. 89–103
- 13- **Rosenbalm ,D.2013.** Volume Change Behavior of Expansive Soils due to Wetting and Drying Cycles, A Dissertation Presented in Partial Fulfillment of the Requirements.
- 14- **Mitchell, J.K., Soga, K., 2005.**Fundamentals of Soil Behavior, third ed. John Wiley & Sons Inc., New York, 558.

- 15- Fredlund, D.G. and Rahardjo, H. 1993.** Soil Mechanics for Unsaturated Soils. New York: John-Wiley and Sons
- 16- Grim, R. E.1968.**“Clay Mineralogy”, 2nd ed., McGraw-Hill, NewYork.
- 17- Sharma. R, et, al.2017.** Impact of Cyclic Wetting and Drying on Swelling Behaviour of Stabilised and Non-Stabilished Soil- A Review Study, International Journal of Advance Engineering and Research Development, Volume 4, Issue 12, Pp 1-9.
- 18- Nelson, J.D. and Miller, D.J.1992.** Expansive Soils, Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering, 1st edition, John Wiley and Sons Inc., United States
- 19- Skempton. A; . Lakatos. I .1958.** "Critical State Soil Mechanics., 8, pp. 22–53, doi:10.1680/geot.1958.8.1.22.
- 20-Mehmet , AS. 2012.** Effect of Cycles Swell-Shrink On Swell percentage of an expesive clay stabilized by class fly ash, a thesis submitted to the Graduate school of natural and applied science of Middle east technical university ,pp1-135.
- 21-. Alonso, E.E .et al .2005.** Expansive bentonite–sand mixtures in cyclic controlled-suction drying and wetting, Department of Geotechnical Engineering and Geosciences, Universitat Politècnica de Catalunya, Engineering Geology 81 , Elsevier B.V,213–226
- 22- Curtis, D. R. 2013.** Volume Change Behavior of Expansive Soils due to Wetting and Drying Cycles, A Dissertation Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Doctor of Philosophy, ARIZONA STATE UNIVERSITY,pp 1-319.
- 23- Tripathy, S. Subba Rao, K.S. and Fredlund, D.G. 2002.** Water content – void ratio swell–shrink paths of compacted expansive soils, Published on the NRC Research Press Web site at <http://cgj.nrc.ca> on 24 July 2002,Pp1-22.
- 24--Ring, W.E. 1965.** Shrink–swell potentials of soils. Highway ResearchRecord 119, National Academy of Sciences – National Research Council Publication 1360, pp. 17–21.
- 25-Rao, S.M.Reddy,B.V.Muttharam.M.2001.** The impact of cycling wetting and drying on the swelling behaviour of stabilized expansive soils, Engineering Geology, Vol. 60, Pp.223-233.
- 26-Guney, Y. et al .2007.** Impact of Cycling wetting-drying on swelling behavior of lime-stabilized soil, *Building and Environment*, Vol. 42,Pp681-688.
- 27-ALHomoudA.S.,BasmaA.A., 1995.**CyclicSwellingBehaviorClays of,JordanUniversity of science and technology ,Pp1-10.
- 28-Day, R. W., 1994.** Swell-Shrink Behavior of Compacted Clay, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 120(3),Pp 618-623.
- 29- Rao .M.R. , Rao .A.S,2010.** Swell-Shrink Behaviour of Expansive Soils Under Fly Ash Cushions , Indian Geotechnical Conference , *GEOtrendz* ,December 16–18,Pp 1-4

- 30- Kalkan,E. Ivoke , J. Nobahar , M . 2018.**Effect of Swell-shrink Characteristics on Landslides in Yazoo Clay,Martime Transportation Resrarch And Education Center Tier 1 University Transportation Center U.S Department of Transportation1-98.
- 31- Nowamooz,H. Masrouri,F. 2008.**Hydromechanicalbehaviourofan expansive bentonite/siltmixtureincyclicsuction-controlleddryingand wetting tests.Eng.Geol.101,154–164.
- 32- Wang, Q.,Tang,A.M.,Cui,Y.-J.,Delage,P.,Barnichon,J.-D.,Ye,W.-M., 2013.** The effects of technological voids on the hydro-mechanical behaviour ofcompactedbentonite–sand mixture.SoilsFound.53(2), 232–245.
- 33- Estabragha, A.R. Parsaeib, B. Javadic, A.A. 2013.** Laboratory investigation of the effect of cyclic wetting and drying on the behaviour of an expansive soil, aFaculty of Soil and Water Engineering , University of Tehran ,POBox4411 ,Karaj 31587-77871,Iran bFars Regional Water Company ,POBox351,Shiraz71436-83685,Iran,pp1-11.
- 34- Hanafy,E.A.D.E., 1991.** Swelling/shrinkagechatracteristic curveofdesiccated expansive clays.Geotech.Test.J.14(2),206–211
- 35-Jennings, J.E.B., and Kerrich, J.E. 1962.** The heaving of buildings and the associated economic consequences with particular reference to the Orange Free State goldfields. Civil Engineer in South Africa, Transactions of the South African Institute of Civil Engineering, 4(11): 221–248.
- 36-Parcher, J.V, Liu, P.D. 1965.** Some swelling characteristics of compacted clays. Journal of the Soil Mechanics and Foundations
- 37- Dif, A.F., Blumel, W.F. 1991.** Expansive soils with cyclic drying and wetting. ASTM Geotechnical Testing Journal, 14(1): 96–102.
- 38- Day, R.W. 1999.** Geotechnical and foundation engineering design and construction. McGraw-Hill Co., New York.
- 39-Crescimanno, G., and Provenazano, G. 1999. Soil shrinkage characteristic curve in clay soils: measurement and prediction.** Soil Science Society of America Journal, 63: 25–32.
- .40-Akcanca .F, Aytekin. M .2012.** Effect of wetting–drying cycles on swelling behavior of lime stabilized sand–bentonite mixtures, Published: 26 July 2012, Environmental Earth Sciences volume 66, pages67-74 .
- 41-.Chu,T.Y.and Mou,C.H.,1973.**Volume change characteristics of expansive soils determined by controlled suction.In:Proceedingsofthe3rd InternationalConferenceonExpansiveSoils,Haifa,pp.177–185.
- 42- Doostmohammadi . R., Moosavi. M , Osan, C .2009.** Influence of cyclic wetting and drying on swelling behavior of mudstone in south west of Iran, Springer-Verlag , Environ Geol (2009) 58:999–1009.
- 43- Romero, E and Simms, P .2008.** Microstructure Investigation in Unsaturated Soils: A Review with Special Attention to Contribution of Mercury

- Intrusion Porosimetry and Environmental Scanning Electron Microscopy, Geotech Geol Eng , Springer Science+Business Media,Pp 1-22.
- 44-Mašin, D. 2013.** Double structure hydromechanical coupling formalism and a model for unsaturated expansive clays. *Engineering Geology*, 165: 73–88. doi:10.1016/j.enggeo.2013.05.026.
- 45-Cui, Y.J. Aissa. Y, M., and Delage, P. 2002.** A model for the volume change behavior of heavily compacted swelling clays. *Engineering Geology*, **64**: 233–250. doi:10.1016/S0013-7952(01)00113-
- 46-Noorany, I., S. Frydman and C. Detournay. 1999.** "Prediction of Soil Slope Deformation Due to Wetting," in *FLAC and Numerical Modeling in Geomechanics*, Proceedings of the First International FLAC Symposium (Minneapolis, September 1999), pp. 101-107, C. Detournay and R. Hart, Eds. Rotterdam: Balkema.
- 47- K. LI_, H. NOWAMOOZ, C. CHAZALLON AND B. MIGAUT(2009):** Modelling of Denese Expensive Soils Subjected To Wetting And Drying Cycles Based On Shakedown Theory ,5th European Conference on Computational Mechanics (ECCM V),Pp1-11.
- 48- Mróz,Z, Norris, V. A, Zienkiewicz. O. C.1979.**Application of an anisotropic hardening model in the analysis of elasto–plastic deformation of soils, *Géotechnique* Volume 29 Issue 1, March 1979, pp. 1-34.
- 49- Hujeux, J. C. 1985.** Une loi de comportement pour le chargement cyclique des sols. *Génie Parasismique*, (V.Davidovici, Ed.), Presses de l'E.N.P.C., 287-302.
- .
- 50- Gens, A. Alonso, E.E. 1992.** A framework for the behaviour of unsaturated expansive clays. *Canadian Geotechnical Journal*, **29**(6): 1013–1032. doi:10.1139/ t92-120
- 51-Alonso, E.E., Gens, A. and Josa, A. 1990.** A constitutive model for partially saturated soils. *Geotechnique*, 40(3): 405–430 doi:10.1680/geot.. 1990.40.3.405. UPC, c/ Jordi Girona 1-3, Building D-2, 08034 Barcelona, Spain, Pp1-14.
- 52- Alonso , Vaunat.J. Gens, A. 1999.** Modelling the mechanical behaviour of expansive clays , *Jordi Girona 1–3, Mo´dulo D-2, 08034 Barcelona, Spain*, *Engineering Geology* 54 ,173–183.
- 53--Mamoune,M.S, Bekkouche, A. 2011.** Modeling of the Behavior of Expansive Soils, Department of Civil Engineering, Faculty of Technology, University of Aboubakr Belkaïd-Tlemcen, *Jordan Journal of Civil Engineering*, Volume 5, No. 1, 2011,Pp 1-14.
- 54-Alcantara.A,M. Mokni, Romero .E, Olivella .s.2020.** Modelling of oedometer tests on pellet-powder bentonite mixtures to support mock-up test analysis, September 19, 2020 EasyChair Preprint № 4221,Pp1-7.
- 55 - Gang, W. Wei, X .2015.**Modeling swelling–shrinkage behavior of compacted expansive soils during wetting–drying cycles, Published at www.nrcresearchpress.com/cgj on 24 October 2014, 783–794.

56- GALAVI,V. 2010., Ground Water Flow ,Fully coupled FLOW
Deformation And Undrained analyses in PLAXIS 2Dand 3D, interal report
,Plaxis Bv2010,Pp1-290.

.
.
.

Syrian Arab Republic
Ministry of Higher Education and scientific Research
AL_Baath University
Faculty of Civil Engineering
Department of Geotechnical Engineering



Thesis Submitted in Partial Fulfillment of The Requirements For .Ph.D.Degree.

**Analytical and Experimental study of the Behaviour of
expensive clay exposed to several Shrinking And Swelling
cycles.**

Submitted By :

DAREIN HAIDAR AHMAD

Supervisors:

**Dr:Ali Al -Abdullah
Main Supervisor
Assistant Professor**

**Dr:Muhammad Takla
Associate Supervisor
Assistant Professor**

2022