الجمهورية العربية السورية
وزارة التعليم العالي
جامعة دمشق
كلية الهندسة المدنية
قسم الهندسة الجيوتكنيكية

# فعالية أوتاد الكلس المكروية
# لتخفيض طاقة وضغط الإنتفاخ لتربة غضارية إنتفاخية

دراسة أعدت لنيل درجة الماجستير في الهندسة المدنية

إعداد
المهندس محمد الحاج

إشراف
الدكتور المهندس طلال عواد

العام الدراسي
2015 - 2014

## شكر وتقدير :

كل الشكر والامتنان إلى الأستاذ الدكتور طلال عواد على كل ما قدمه لي من نصح وإرشاد وعون لإنجاز هذا العمل المتواضع.

كل الشكر والامتنان إلى جميع أساتذتي الكرام في قسم الهندسة البيوتكنيكية الذين لم يألوا نصحاً أو تصويباً أو ارشاداً إلا وقدموه.

كل الشكر والامتنان إلى سيادة وزير الموارد المائية الدكتور المهندس كمال الشيخة وزملائي بالعمل جميعاً وأخص بالشكر المهندس طاهر حاج حسن على ما قدموه لي من عون ومساعدة لإنجاز هذا العمل.

كل الشكر والامتنان إلى كل من مدير البحث العلمي الدكتور المهندس سامي نقولا ومدير التدريب والتأهيل المهندس أيمن ظاهر في وزارة الأشغال العامة.

كل الشكر والامتنان إلى مدير زراعة ريف دمشق المهندس علي سعادات على المساعدة في تأمين مكان اجراء البحث.

الشكر الجزيل لجميع العاملين في مخبر ميكانيك التربة اساتذة ومحضرين على كل ما قدموه من عون ومساعدة لإنجاز هذا العمل .

وأخيراً وليس آخراً الشكر الجزيل لعائلتي التي ساندتني وتحملت عبء تفرغي لإنجاز هذا العمل.

**ملخص :**

إن الانتشار الواسع للتربة الغضارية الانتفاخية في سورية و الأضرار التي تلحقها بالمنشآت عند تغير رطوبتها زيادة أو نقصاناً بسبب خواصها الانتفاخية سواء عند استخدام هذه التربة كمادة انشاء كما في السدود أو عند التأسيس عليها كما في الأبنية و المطارات و الطرق و السكك الحديدية , إضافة الى الأضرار الناجمة عن انهيار المنحدرات المكونة من التربة الغضارية الانتفاخية , كل ذلك يجعل من تحسين التربة الغضارية الانتفاخية أمراً ضرورياً .

هناك العديد من الطرق لتحسين التربة الغضارية الانتفاخية وتعتبر طريقة تحسين التربة المذكورة عن طرق الإضافات الكيميائية واحدة من الطرق الهامة في هذا المجال , وبالرغم من أنه تم تطوير واستخدام العديد من الإضافات الكيميائية لهذا الغرض إلا أن الكلس و الاسمنت بقيا الأكثر استخداماً بسبب توفرهما وكلفتهما الاقتصادية المنخفضة .

هناك العديد من الدراسات السابقة التي تناولت موضوع تحسين التربة الغضارية الانتفاخية عن طريق الخلط المباشر للتربة مع الكلس , وقد أثبت الكلس فعالية في هذا المجال , بينما كانت الدراسات التي تطرقت لتحسين الترب الغضارية باستخدام أوتاد الكلس قليلة و قد تركز معظمها على إجراء تجارب على نماذج مخبرية دون ربط النتائج المخبرية بتجارب حقلية تبين مدى صحة ودقة النتائج المخبرية التي تم التوصل اليها .

اخترنا موضوع اختبار مدى فعالية طريقة أوتاد الكلس المكروية لتخفيض ضغط الانتفاخ والانتفاخ النسبي و قرينة الانتفاخ في التربة الغضارية الانتفاخية المدروسة, وذلك بسبب توفر مادة الكلس محلياً وبأسعار رخيصة وبسبب قلة الأبحاث التي تعرضت لهذا الموضوع, وإن القيمة المضافة الأخرى في هذا البحث أنه تم اختبار مدى فعالية هذه التقنية لتخفيض الخواص آنفة الذكر وذلك على سبعة أوتاد كلسية بأبعاد حقيقية قطر ( 10) cm و عمق ( 6) m منفذة في الحقل , وتم التحقق من النتائج الحقلية عبر عدة تجارب مخبرية جيوتكنيكية وكيميائية.

أثبت هذا البحث حقلياً و مخبرياً فعالية أوتاد الكلس المكروية لتخفيض ضغط الانتفاخ والانتفاخ النسبي و قرينة الانتفاخ وقرينة اللدونة في التربة الغضارية الانتفاخية المدروسة , و قد أظهرت النتائج المخبرية انخفاض كل من حد السيولة و قرينة اللدونة و قرينة الانتفاخ و ضغط الانتفاخ و الانتفاخ النسبي مع الاقتراب من الوتد الكلسي , و أن مدى انتشار أثر الكلس أفقياً حول الوتد الكلسي يصل تقريبا حتى (5*D )اعتباراً من سطح الوتد الكلسي حيث ( D ) قطر الوتد الكلسي , إلا أن مجال التأثير الفعال لأوتاد الكلس المكروية على الخواص الانتفاخية للتربة يصل حتى (3*D ). كما تبين أيضاً أن أثر الكلس على تحسين خواص التربة يزيد مع العمق .

**كلمات مفتاحية:**

**أوتاد الكلس المكرويـة , تربة غضاريـة، تربة انتفاخية، ضغط الانتفاخ ، انتفـاخ نسبي ، طاقة الانتفاخ , Expansive Clay ، Micro Lime Piles ، Swelling Pressure ، Swelling Potential .**

# فهرس المحتويات


| الفصل | العنوان | الصفحة |
|---|---|---|
| | صفحة العنوان | |
| | شكر وتقدير | 1 |
| | ملخص | 2 |
| | فهرس المحتويات | 3 |
| | فهرس الجداول | 6 |
| | فهرس الأشكال | 8 |
| | المواصفات القياسية للتجارب المستخدمة في البحث | 11 |
| | 1- مقدمة | 12 |
| | 1-1 المشكلة العلمية في البحث وأسباب اختياره | 12 |
| | 1-2 مجال وأهداف البحث | 13 |
| **الأول** | 1-3 الفرضية العلمية للبحث | 13 |
| | 1-4 منهجية البحث | 14 |
| | 1-4 -A تنفيذ البحث في الموقع | 16 |
| | 1-4 - B التجارب الحقلية المنفذة | 20 |
| | 1-4 - C التجارب المخبرية المنفذة | 21 |
| | 2- الدراسة المرجعية | 25 |
| | 2-1 تحسين مواصفات التربة | 25 |
| | 2-2 دراسة مرجعية عن الكلس | 27 |
| | 2-2-1 مقدمة | 27 |
| | 2-2-2 تواجد الكلس في سوريا | 29 |
| | 2-2-3 تفاعلات الكلس مع التربة الغضارية | 30 |
| | 2-2-4 آلية تحسين التربة بالكلس | 34 |
| **الثاني** | 2-2-5 طرق تحسين التربة بالكلس ( Lime Stabilization) | 37 |
| | 2-2-6 نوع الكلس المستخدم و التجارب التي تمت عليه | 38 |
| | 2-3 دراسة مرجعية عن الترب الغضارية | 41 |
| | 2-3-1 مقدمة | 41 |
| | 2-3-2 وجود الترب الغضارية في سوريا | 43 |
| | 2-3-3 بارامترات الانتفاخ | 45 |
| | 2-3-3-1 طاقة الانتفاخ ( Swelling Potential ) | 45 |
| | 2-3-3-2 ضغط الانتفاخ ( Swelling Pressure ) | 48 |
| | 2-3-4 تحديد وتصنيف الترب الانتفاخية | 50 |
| | 2-3-4-1 تحديد الترب الانتفاخية | 50 |

| | | |
|---|---|---|
| | 2-3-4-2 تصنيف الترب الانتفاخية | 51 |
| | 2-3-4-3 تحديد بارامترات انتفاخ التربة الغضارية | 54 |
| | 2-4 الدراسات السابقة | 57 |
| | 3- الدراسة الحقلية | 65 |
| | 3-1 تنفيذ الأوتاد الكلسية | 65 |
| | 3-2 تنفيذ البلاطات البيتونية | 66 |
| | 3-3 تنفيذ وتد كلسي منفرد بدون بلاطة بيتونية | 68 |
| | 3-4 تحديد مواصفات التربة على كامل عمق السبور | 68 |
| **الثالث** | 3-5 رسم و توصيف المقطع الجيولوجي لطبقات تربة الموقع | 70 |
| | 3-6 نتائج التجارب المخبرية لتحديد مواصفات تربة موقع البحث | 70 |
| | 3-7 تصنيف تربة موقع البحث مع العمق . | 72 |
| | 3-8 تحديد مقدار انتفاخ وانكماش التربة تحت البلاطات البيتونية | 73 |
| | 3-9 تحديد مقدار انتفاخ التربة تحت البلاطات البيتونية في حالة محاكاة الهطول المطري الأعظمي | 80 |
| | 4- دراسة تجريبية تحليلية حول مدى فعالية أوتاد الكلس لتخفيض الخواص الانتفاخية للتربة الغضارية المدروسة ومدى انتشار اثر الكلس على خواص التربة أفقياً حول الوتد الكلسي . | 83 |
| | 4-1 الفرضية العلمية والمنهجية المتبعة للتحقق منها | 83 |
| | 4- 2 التجارب المخبرية | 84 |
| | 4-2-1 تجربة الرطوبة الطبيعية ASTM-D 2216 -71 | 84 |
| | 4- 2-2 تجربة الوزن الحجمي الطبيعي | 88 |
| **الرابع** | 4-2-3 الوزن الحجمي الجاف | 91 |
| | 4-2-4 تجربة الوزن النوعي ASTM-D 854 – 92 | 94 |
| | 4-2-5 المسامية الابتدائية | 98 |
| | 4-2-6 تجربة حدود اتربرغ ASTM-D 4318 -93 | 101 |
| | 4- 2-6-1 تجربة حد السيولة | 101 |
| | 4- 2-6-2 تجربة حد اللدونة | 105 |
| | 4- 2-6-3 قرينة اللدونة | 108 |
| | 4-2-6-4 تصنيف عينات التربة بحسب USCS (ASTM D-2487- 06) | 112 |
| | 4- 2-7 تجربة الانتفاخ النسبي | 117 |
| | 4- 2-8 تجربة ضغط الانتفاخ | 120 |
| | 4- 2-9 تجربة قرينة الانتفاخ | 124 |
| | 4-2-10 تجربة PH | 130 |
| | 4- 2-11 تجربة الاستهلاك الأولي للكلس | 135 |

| | | |
|---|---|---|
| | 4- 3 مقارنة اقتصادية بين طريقة أوتاد الكلس المكروية وطريقة الخلط المباشر بالكلس من حيث كمية الكلس المستخدمة | 137 |
| | النتائج والتوصيات | 140 |
| | 5-1 النتائج | 140 |
| | 5-1-1 النتيجة العامة للبحث | 140 |
| **الخامس** | 5-1-2 نتائج الدراسة الحقلية | 140 |
| | 5-1-3 نتائج الدراسة المخبرية | 140 |
| | 5-1-4 نتائج الدراسة الاقتصادية | 142 |
| | 5-1-5 العلاقات الرياضية لتغير المواصفات الأساسية للتربة الغضارية الانتفاخية نتيجة المعالجة بأوتاد الكلس منسوبة إلى قطر الوتد الكلسي ( D ) | 142 |
| | 5-2 التوصيات و الآفاق البحثية | 143 |
| **السادس** | ▪ المراجع ( References ) | 144 |
| | ▪ Abstract | 147 |

# فهرس الجداول


| رقم الجدول | التسمية | الصفحة |
|---|---|---|
| 1 | الوزن الذري لعناصر ومركبات الكلس | 29 |
| 2 | أهم أنواع الكلس | 38 |
| 3 | نتائج التحليل الكيميائي لعينة الكلس في مخبر الكيمياء في كلية العلوم بدمشق | 40 |
| 4 | مواصفات التربة مقابل طاقة الانتفاخ | 46 |
| 5 | طريقة تصنيف التربة حسب ( USBR) | 51 |
| 6 | طريقة تصنيف التربة حسب ( USAEWES ) | 52 |
| 7 | مواصفات تربة موقع البحث حتى عمق 5.5 متر | 71 |
| 8 | نتائج مراقبة المناسيب وحركة البلاطات البيتونية مع الهطولات المطرية | 74 |
| 9 | انخفاض قيم الرطوبة الطبيعية للتربة على عمق ( 0.75 ) m مع الاقتراب الوتد الكلسي | 85 |
| 10 | انخفاض قيم الرطوبة الطبيعية للتربة على عمق ( 2.5 ) m مع الاقتراب الوتد الكلسي | 87 |
| 11 | ارتفاع قيم الوزن الحجمي للتربة على عمق (0.75 ) m مع الاقتراب الوتد الكلسي | 89 |
| 12 | ارتفاع قيم الوزن الحجمي للتربة على عمق (2.5 ) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي | 90 |
| 13 | ارتفاع قيم الوزن الحجمي الجاف للتربة على عمق ( 0.75 ) m مع الاقتراب الوتد الكلسي. | 92 |
| 14 | ارتفاع قيم الوزن الحجمي الجاف للتربة على عمق ( 2.5) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي. | 93 |
| 15 | انخفاض قيم الوزن النوعي للتربة على عمق ( 0.75 ) m مع الاقتراب الوتد الكلسي | 95 |
| 16 | انخفاض قيم الوزن النوعي للتربة على عمق (2.5 ) m مع الاقتراب الوتد الكلسي | 97 |
| 17 | انخفاض قيم المسامية الابتدائية على عمق (0.75) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي | 99 |
| 18 | انخفاض قيم المسامية الابتدائية على عمق ( 2.5 ) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي | 100 |
| 19 | انخفاض قيم حد السيولة على عمق (0.75) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي | 103 |
| 20 | انخفاض قيم حد السيولة على عمق ( 2.5 ) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي | 104 |
| 21 | ارتفاع قيم حد اللدونة على عمق ( 0.75 ) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي | 106 |
| 22 | ارتفاع قيم حد اللدونة على عمق ( 2.5 ) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي | 107 |
| 23 | انخفاض قيم قرينة اللدونة على عمق ( 0.75 ) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي | 110 |

| | | |
|---|---|---|
| **24** | انخفاض قيم قرينة اللدونة على عمق (2.5 ) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي | 111 |
| **25** | انخفاض قيم الانتفاخ النسبي على عمق (0.75) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي | 118 |
| **26** | انخفاض قيم الانتفاخ النسبي للتربة على عمق ( 2.5 ) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي | 120 |
| **27** | انخفاض قيم ضغط الانتفاخ على عمق (0.75) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي | 122 |
| **28** | انخفاض قيم ضغط الانتفاخ للتربة على عمق (2.5 ) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي | 123 |
| **29** | تصنيف التربة الغضارية وفقاً لطاقة انتفاخها بناءاً على قيم قرينة الانتفاخ | 124 |
| **30** | انخفاض قيم قرينة الانتفاخ على عمق (0.75 ) مع الاقتراب من الوتد الكلسي | 128 |
| **31** | انخفاض قيم قرينة الانتفاخ للتربة على عمق ( 2.5 ) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي | 129 |
| **32** | ارتفاع قيم ( PH ) للتربة على عمق ( 0.75 ) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي | 133 |
| **33** | ارتفاع قيم ( PH ) للتربة على عمق ( 2.5 ) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي | 134 |
| **34** | نتائج تجربة الاستهلاك الأدنى من الكلس | 136 |
| **35** | مقارنة اقتصادية بين كمية الكلس المستخدمة بطريقة أوتاد الكلس المروية و طريقة الخلط المباشر للكلس مع التربة | 138 |

# فهرس الأشكال


| رقم الشكل | التسمية | الصفحة |
|---|---|---|
| 1 | تشققات في تربة موقع البحث الغضارية الإنتفاخية عند جفافها في فصل الصيف | 14 |
| 2 | تكسر بلاط الأرضيات في المباني في موقع البحث بسبب التربة الغضارية الانتفاخية | 14 |
| 3 | تشققات في جدران الأبنية من الخارج في موقع البحث | 15 |
| 4 | تشققات في جدران الأبنية من الداخل في موقع البحث | 15 |
| 5 | الكلس الحي (CaO ) المستخدم في البحث وهو بشكل كتل حجرية قبل طحنه | 16 |
| 6 | مطحنة الكرات في معمل الاسمنت في عدرا المستخدمة لطحن الكلس الحي. | 17 |
| 7 | الكلس الحي (CaO ) المستخدم في البحث بعد طحنه بشكل بودرة. | 17 |
| 8 | شكل توضيحي فراغي لكيفية استناد البلاطات البيتونية على الأوتاد الكلسية | 19 |
| 9 | شكل توضيحي مستوي لأبعاد وكيفية استناد البلاطات البيتونية على الأوتاد الكلسية | 19 |
| 10 | شكل توضيحي لكل من الوتد المنفرد و البلاطة المستندة على وتد وحيد . | 20 |
| 11 | حفر السبور في موقع البحث | 21 |
| 12 | تشميع وحفظ العينات المستخرجة من السبر المنفرد لزوم تحديد مواصفات التربة مع العمق | 22 |
| 13 | صور عينات سليمة من السبر المنفرد على أعماق مختلفة | 22 |
| 14 | الكشف عن الوتد الكلسي المنفرد | 24 |
| 15 | الوتد الكلسي المنفرد بعد ( 520 ) يوم على تنفيذه بالتربة | 24 |
| 16 | خطوات تنفيذ الوتد الكلسي | 27 |
| 17 | أماكن تواجد الصخور الكلسية في سوريا – المؤسسة العامة للجيولوجيا | 30 |
| 18 | بنية أهم المنرالات الغضارية الشائعة | 31 |
| 19 | ترتيب متوازي لذرات الغضار مع طبقات مائية سميكة حولها | 32 |
| 20 | ترتيب بشكل ( وجه/ حافة ) لذرات الغضار مع طبقات مائية رقيقة حولها | 33 |
| 21 | طحن الكلس وتحضيره في معمل الاسمنت بعدرا | 39 |
| 22 | الكلس الحي المطحون | 39 |
| 23 | الأضرار التي تسببها الترب الغضارية الانتفاخية على الأبنية ( منطقة الصنمين بدرعا) | 42 |
| 24 | الأضرار التي تسببها الترب الغضارية الانتفاخية على الأبنية ( منطقة الصنمين بدرعا) | 43 |
| 25 | أماكن تواجد الترب الغضارية في سوريا – المؤسسة العامة للجيولوجيا | 44 |
| 26 | مخطط تصنيف التربة وفق طاقة الانتفاخ | 47 |
| 27 | مخطط (Vander Merwe - 1964 ) لتصنيف التربة وفق طاقة الانتفاخ | 48 |
| 28 | مخطط طاقة انتفاخ التربة وفقاً ( Seed , Woodward , Lundgren 1956 ) | 53 |
| 29 | تحديد و تقدير مقدار طاقة انتفاخ التربة بحسب ( Popescu , 1956) | 54 |
| 30 | منحني تجربة الانتفاخ الحر ( ISO Test ( EROL 1987 , | 55 |

| | | |
|---|---|---|
| **31** | منحني تجربة الانتفاخ الحر وفقاً ل (EROL 1987) | 56 |
| **32** | قرينة الانتفاخ مقابل تغير حجم التربة | 57 |
| **33** | مخطط تنفيذ الوتد الكلسي في المخبر | 58 |
| **34** | المتانة على الضغط غير المحصور حول الوتد الكلسي | 58 |
| **35** | تنفيذ الأوتاد الكلسية المخبرية في عينة التربة غير المخربة | 59 |
| **36** | انخفاض حد السيولة و قرينة اللدونة مع الاقتراب من الوتد الكلسي | 60 |
| **37** | انخفاض قيم ضغط الانتفاخ مع الاقتراب من الوتد الكلسي | 60 |
| **38** | العلاقة بين مسافة انتشار اثر الكلس حول الوتد الكلسي و بين قطر الوتد الكلسي | 61 |
| **39** | الوتد الكلسي داخل حلقة الأدومتر | 62 |
| **40** | انخفاض الانتفاخ النسبي مع البعد عن الوتد الكلسي | 62 |
| **41** | مراحل تنفيذ أوتاد الكلس | 63 |
| **42** | مقارنة بين نتائج تجربة اختراق المخروط قبل المعالجة بالكلس و بعدها | 64 |
| **43** | مقارنة بين نتائج تجربة البراونة قبل المعالجة بالكلس و بعدها | 64 |
| **44** | تنفيذ الأوتاد الكلسية و ملؤها بالكلس المطحون | 65 |
| **45** | الحفرية اللازمة لتنفيذ البلاطة فوق الأوتاد الكلسية | 66 |
| **46** | تسليح البلاطة البيتونية | 67 |
| **47** | الشكل النهائي للبلاطات البيتونية | 67 |
| **48** | وتد كلسي منفرد بدون بلاطة بيونية | 68 |
| **49** | العينات المأخوذة من السبر المنفرد | 69 |
| **50** | المقطع الجيولوجي لطبقات التربة في موقع البحث | 70 |
| **51** | تجارب ضغط الانتفاخ و الانتفاخ النسبي | 71 |
| **52** | مخططات ضغط الانتفاخ و الانتفاخ النسبي | 72 |
| **53** | تصنيف التربة بحسب USCS ( ASTM D-2487 - 06 ) | 73 |
| **54** | طريقة مراقبة المناسيب وقياس حركة البلاطات البيتونية | 75 |
| **55** | مراقبة حركة المناسيب باستخدام جهاز نيفو دقيق | 75 |
| **56** | الوضع التفصيلي للهطولات المطرية في موقع البحث و في أوقات إجراء قياسات المناسيب | 76 |
| **57** | الهطولات المطرية في أوقات قياسات المناسيب | 77 |
| **58** | نتائج مراقبة المناسيب و حركة البلاطات البيتونية | 78 |
| **59** | نتائج مراقبة حركة و مناسيب البلاطات البيتونية مع الهطولات المطرية | 79 |
| **60** | الهطول المطري و ارتفاع مناسيب البلاطات البيتونية في حالة محاكاة الهطول المطري الأعظمي . | 81 |
| **61** | ارتفاع مناسيب البلاطات البيتونية في حالة الهطول المطري الأعظمي . | 81 |
| **62** | المسافة المتوقعة لانتشار أثر الكلس على خواص التربة حول الوتد الكلسي | 83 |
| **63** | انخفاض قيم الرطوبة الطبيعية على عمق ( 0.75 ) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي | 85 |

| | | |
|---|---|---|
| **64** | انخفاض قيم الرطوبة الطبيعية على عمق (2.5) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي | 86 |
| **65** | ارتفاع قيم الوزن الحجمي على عمق (0.75 ) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي . | 88 |
| **66** | ارتفاع قيم الوزن الحجمي على عمق ( 2. 5 ) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي | 89 |
| **67** | ارتفاع قيم الوزن الحجمي الجاف على عمق(0.75) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي | 91 |
| **68** | ارتفاع قيم الوزن الحجمي الجاف على عمق ( 2.5 ) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي | 93 |
| **69** | انخفاض قيم الوزن النوعي للتربة على عمق (0.75) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي. | 95 |
| **70** | انخفاض قيم الوزن النوعي للتربة على عمق (2.5) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي | 96 |
| **71** | انخفاض قيم المسامية الابتدائية على عمق (0.75) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي | 98 |
| **72** | انخفاض قيم المسامية الابتدائية على عمق (2.5) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي | 100 |
| **73** | انخفاض قيم حد السيولة على عمق (0.75) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي. | 102 |
| **74** | انخفاض قيم حد السيولة على عمق ( 2. 5 ) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي | 103 |
| **75** | ارتفاع قيم حد اللدونة على عمق (0.75) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي | 105 |
| **76** | ارتفاع قيم حد اللدونة على عمق ( 2. 5 ) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي | 107 |
| **77** | انخفاض قيم قرينة اللدونة على عمق (0.75) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي | 109 |
| **78** | انخفاض قيم قرينة اللدونة على عمق (2.5 ) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي | 110 |
| **79** | تصنيف عينات التربة على عمق (0.75) m بحسب USCS | 113 |
| **80** | تصنيف عينات التربة على عمق ( 2.5 ) m بحسب USCS | 116 |
| **81** | اجراء تجارب الانتفاخ النسبي وضغط الانتفاخ باستخدام جهاز الأدومتر | 117 |
| **82** | انخفاض قيم الانتفاخ النسبي على عمق (0.75) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي | 117 |
| **83** | اتخفاض قيم الانتفاخ النسبي على عمق( 2.5) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي | 119 |
| **84** | انخفاض قيم ضغط الانتفاخ على عمق (0.75) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي | 121 |
| **85** | انخفاض قيم ضغط الانتفاخ على عمق ( 2.5) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي | 122 |
| **86** | انخفاض قيم قرينة الانتفاخ على عمق (0.75) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي | 127 |
| **87** | انخفاض قيم قرينة الانتفاخ على عمق ( 2.5 ) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي | 128 |
| **88** | الجهاز المستخدم في قياس قيمة PH في التربة | 131 |
| **89** | ارتفاع قيم PH على عمق ( 0.75) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي | 132 |
| **90** | ارتفاع قيم PH على عمق (2.5) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي | 133 |
| **91** | اجراء تجربة الاستهلاك الأدنى من الكلس | 136 |

**American Society for Testing and Materials:**

**ASTM – D 2216 -71**
Standard Test Method for Laboratory Determination of Moisture Content of Soil

**ASTM – D 854 -92**

Standard Test Method for Determination of Specific Gravity of Soil

**ASTM – D 4318 -93**

Standard Test Method for Aterbirg Limits

**ASTM – D 698 -91**

Standard Test Method for Laboratory Compaction Characteristics of Soils

**ASTM – D 6276– 99a**

Standard Test Method for Using PH to Estimate the Soil-Lime Properties Requirement for Soil Stabilization

**ASTM – D 4972 – 01**

Standard Test Method for PH of Soil

**ASTM – D 4829– 95**

Standard Test Method for Expansion Index of Soils.

**ASTM – D 4546– 96**

Standard Test Method for One - Dimensional Swell or Settlement Potential of Cohesive Soils.

**ASTM – D 2487– 06**

Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System).

# الفصل الأول

## 1- مقدمة

### 1-1 المشكلة العلمية في البحث وأسباب اختياره :

تنتشر الترب الغضارية الانتفاخية على مساحات واسعة وبأماكن متعددة من سورية ، وتعد قابلية هذه التربة للتغير في حجمها عند تغير رطوبتها زيادة أو نقصاناً من أكثر التحديات جدية التي تواجه المهندسين عند التأسيس عليها أو استخدامها كمادة انشاء كما في السدود والمنحدرات، حيث تتسبب الخواص الانتفاخية لهذه التربة عند تغير رطوبتها بأضرار شديدة على المنشآت وخسائر اقتصادية كبيرة.

إن حلول التأسيس المتبعة على هذا النوع من الترب سواء استبدال تربة الموقع بترب ذات مواصفات أفضل أو اللجوء الى الأساسات العميقة على أعماق تتجاوز طبقات الترب الغضارية الانتفاخية ولا تتأثر بتغير الرطوبة ، عادة ما تكون هذه الحلول مكلفة اقتصادياً، فضلاً عن صعوبة تنفيذها ومحدودية فعاليتها في حال وجود طبقات تربة غضارية انتفاخية تمتد لأعماق كبيرة ، الأمر الذي فرض على المهندسين إيجاد حلول ناجعة ومجدية من الناحية الاقتصادية لمعالجة مشاكل التأسيس على هذا النوع من الترب.

ان ما سبق استدعى إيجاد بدائل لطرق التأسيس المتبعة والبحث عن فعالية وجدوى استخدام طرق أخرى لتخفيض الخواص الانتفاخية للترب الغضارية ، وهذا ما أدى إلى ظهور مفهوم تحسين خواص التربة بطرق متعددة ميكانيكية أو حرارية أو كيميائية ، وبالرغم من أنه تم دراسة واستخدام العديد من الخلائط الكيميائية لتحسين خواص التربة الغضارية الانتفاخية إلا أن الكلس والاسمنت بقيا المادتين الأكثر شيوعاً واستخداماً لهذا الغرض نتيجة توفرهما وكلفتها الاقتصادية المنخفضة مقارنة ببقية المواد الأخرى.

ان معظم الدراسات السابقة حول تحسين خواص التربة الغضارية الانتفاخية بإضافة الكلس قد تناولت هذا الموضوع من وجهة نظر الخلط المباشر للكلس مع التربة لتحسين خواص الطبقات السطحية من التربة المذكورة وذلك غالباً لزوم أعمال الطرق والمطارات، في حين بقيت الأبحاث التي تدرس مدى فعالية طرق تحسين خواص الغضارية ذات السماكات والأعماق الكبيرة ومنها تقنية أوتاد الكلس المكروية قليلة نسبيا وتركز معظمها على تجارب مخبرية أجريت على نماذج أوتاد كلسية بأبعاد مخبرية.

**أسباب و مبررات اختيار البحث :**

- الانتشار الواسع للترب الغضارية الإنتفاخية في سورية وخاصة في المناطق الجنوبية وقابليتها العالية لتغيير حجمها زيادة أو نقصاناً تبعاً لزيادة أو نقصان رطوبتها وما يترتب على ذلك من أضرار على الأبنية والطرق والسكك الحديدية والمطارات والسدود.
- الكلف العالية لحلول التأسيس على التربة الغضارية الإنتفاخية.
- الحاجة لمعرفة فعالية وجدوى استخدام تقنية أوتاد الكلس لتخفيض ضغط الانتفاخ والانتفاخ النسبي وطاقة الانتفاخ للتربة الغضارية من خلال تجارب حقلية ومخبرية.
- الانتشار الواسع لمقالع الحجر الكلسي محلياً في معظم المحافظات السورية وتكلفته الاقتصادية المنخفضة.
- يمكن أن يكون لهذاالبحث نتائج واعدة تؤدي إلى توفير تكاليف اقتصادية كبيرة عند استخدام أوتاد الكلس المكروية للتقليل من الآثار السلبية للترب الإنتفاخية في مجالات كثيرة ومتعددة تشمل أعمال التأسيس على الترب الغضارية الإنتفاخية لأغراض البناء واعمال السدود وتحت الطرق والمطارات وخطوط السكك الحديدية وأعمال تثبيت المنحدرات المكونة من تربة غضارية انتفاخية.

## 1-2 مجال وأهداف البحث :

**مجال البحث** : هو التربة الغضارية الانتفاخية في ماقع اشادة المنشآت و امكانية التأسيس عليها بعد تحسين خواصها باستخدام تقنية أوتاد الكلس المكروية.

**أهداف البحث :**

- دراسة مدى فعالية أوتاد الكلس المكروية لتخفيض ضغط الانتفاخ والانتفاخ النسبي وقرينة الانتفاخ للتربة الغضارية الانتفاخية المدروسة.
- معرفة مدى انتشار أثر الكلس على خواص التربة افقياً حول الوتد الكلسي في التربة الغضارية الانتفاخية المدروسة.

## 1-3 الفرضية العلمية للبحث :

- وجود أثر إيجابي وفعال لأوتاد الكلس الميكروية في تخفيض ضغط الانتفاخ والانتفاخ النسبي وقرينة الانتفاخ للتربة الغضارية الانتفاخية المدروسة.
- انتشار الأثر الإيجابي للكلس على تخفيض ضغط الانتفاخ والانتفاخ النسبي وقرينة الانتفاخ للتربة الغضارية الانتفاخية المدروسةإلى مسافة معينة في التربة حول الوتد الكلسي.

## 4-1 منهجية البحث:

تم إجراء البحث في منطقة جديدة الخاص من محافظة ريف دمشق لوجود ظاهرة عامة في المنطقة تتمثل بظهور تشققات في الأبنية وتخريب في بلاطات لأرضيات , كما أن التربة في المنطقة تتشقق بشكل واضح في فصل الصيف مما يدل على أنها تربة غضارية انتفاخية ويتوقع الحصول على نتائج واضحة عند إجراء التجارب الحقلية و المخبرية عليها .

**شكل رقم (1) تشققات في تربة موقع البحث الغضارية الإنتفاخية عند جفافها في فصل الصيف**

**شكل رقم (2) تكسر بلاط الأرضيات في المباني في موقع البحث بسبب التربة الغضارية الانتفاخية**

**شكل رقم (3) تشققات في جدران الأبنية من الخارج في موقع البحث**

**شكل رقم (4) تشققات في جدران الأبنية من الداخل في موقع البحث**

إن معظم الأبحاث التي تناولت موضوع تحسين الترب الغضارية الانتفاخية عن طريق معالجتها بالكلس , تطرقت للموضوع من وجهة نظر الخلط المباشر للتربة مع الكلس , و حتى الأبحاث القليلة التي درست موضع تحسين التربة بأوتاد الكلس اقتصرت في معظمها على تجارب مخبرية تجرى على نماذج لأوتاد كلسية بأبعاد مخبرية . وحيث أن هذا البحث هو استكمال للأبحاث السابقة فقد ارتأينا أن يتكون من جزء مخبري وآخر حقلي على أوتاد كلس مكروية بأبعاد حقيقية منفذة في الموقع , بما يزيد من درجة موثوقية النتائج المخبرية و يجعل للبحث قيمة مضافة في مجال دراسة تحسين خواص الترب الغضارية الانتفاخية باستخدام تقنية أوتاد الكلس . فيما يلي منهجية اجراء الجانب الحقلي والجانب المخبري للبحث :

## A-4-1 تنفيذ البحث في الموقع:

استخدم الكلس الحي المحلي (CaO) لاجراء هذا البحث , وقد أحضر بشكل كتل حجرية من مقالع محافظة حماة , ثم تم طحنه بمطحنة الكرات في معمل الاسمنت في عدرا , وتم تحديد مواصفاته في مخبر كلية العلوم بجامعة دمشق.

**شكل رقم (5) الكلس الحي (CaO ) المستخدم في البحث وهو بشكل كتل حجرية قبل طحنه**

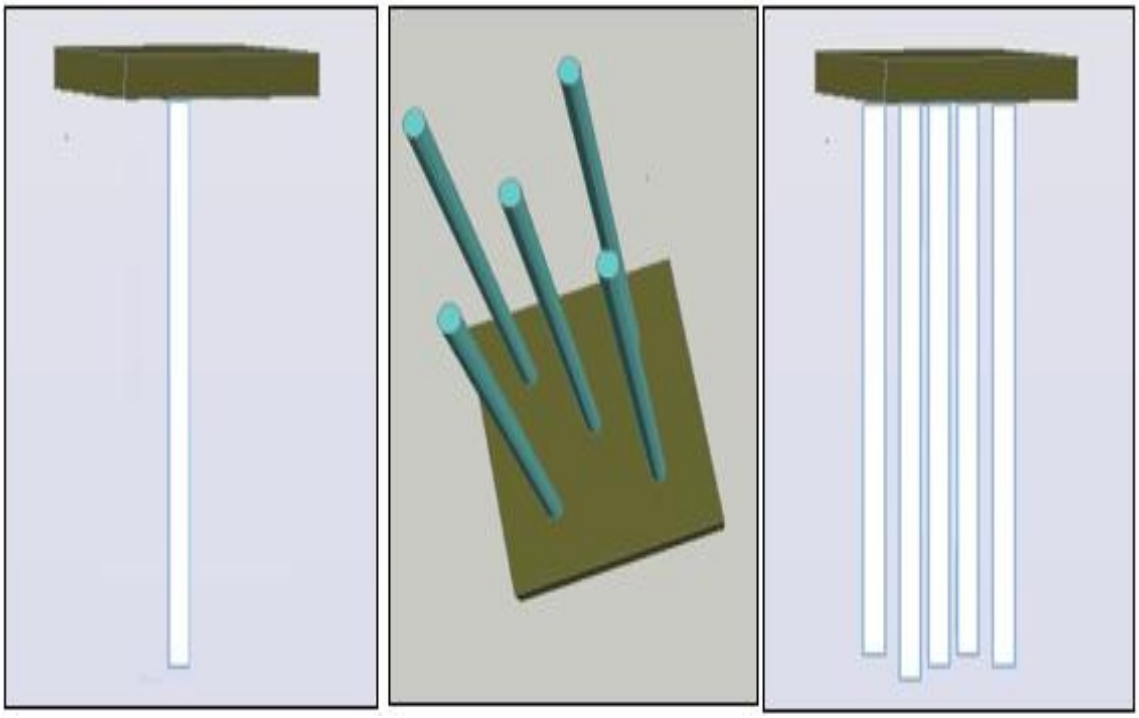
**شكل رقم (6) مطحنة الكرات في معمل الاسمنت في عدرا المستخدمة لطحن الكلس الحي.**

**شكل رقم (7) الكلس الحي (CaO ) المستخدم في البحث بعد طحنه بشكل بودرة.**

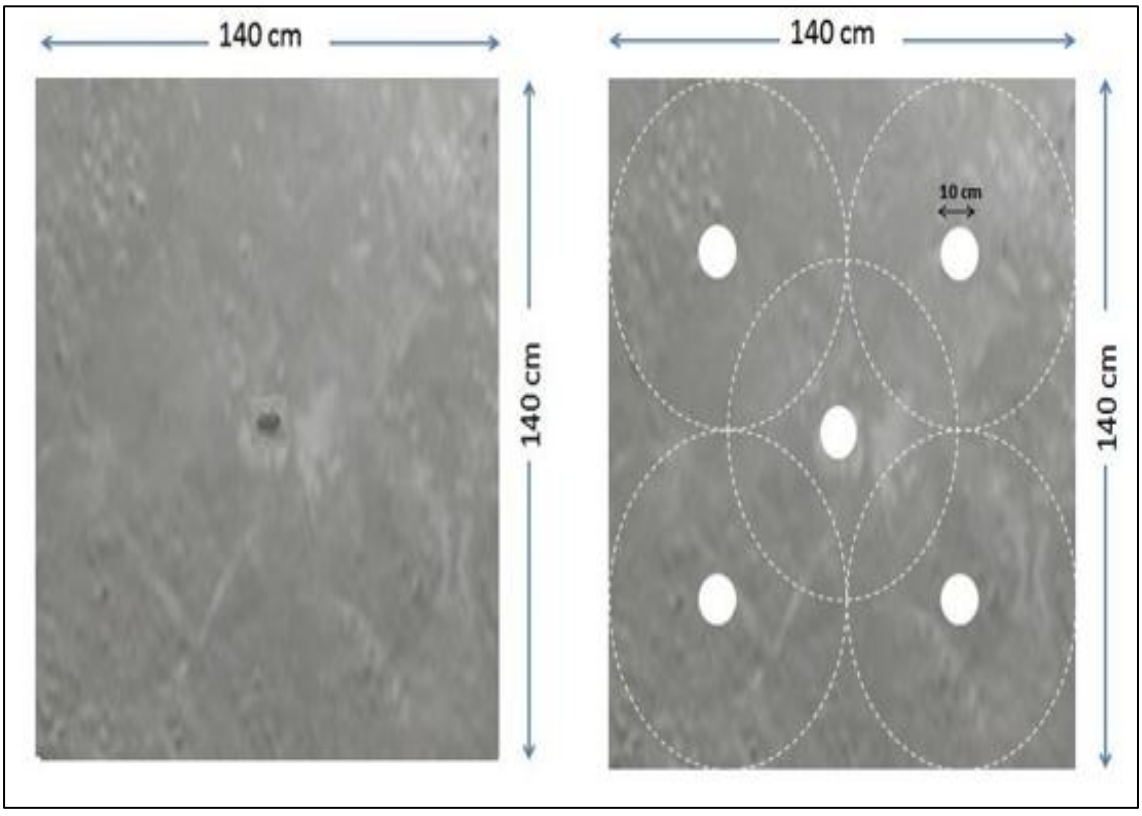
تم في بداية موسم الأمطار وقبل أي هطول مطري (التربة بحالة جافة تماماً) تنفيذ سبعة أوتاد كلسية بقطر (10) cm وعمق (6) m من سطح الأرض في موقع البحث باستخدام الكلس الحي المطحون على شكل بودرة .

نفذت بعد ذلك مباشرة ثلاثة بلاطات بيتونية مسلحة بسماكة ( 25 ) cm , اثنتان منهما بأبعاد (1.4*1.4) m² و الثالثة بأبعاد (0.7*0.7) m² , وبهدف المقارنة وبغية معرفة الأثر المشترك لمجموعة الأوتاد الكلسية فقد تم صب احدى البلاطتين (1.4*1.4) m² بحيث تستند على مجموعة مكونة من خمسة أوتاد كلسية , في حين تستند البلاطة الثانية على التربة مباشرة بدون أوتاد كلسية , أما البلاطة البيتونية الثالثة ذات الأبعاد (0.7*0.7) m² فتستند على وتد كلسي وحيد. أما بالنسبة للوتد الكلسي السابع فترك دون أن تستند عليه أي بلاطة بيتونية بهدف كشفه بعد انتهاء تنفيذ الجانب الحقلي من البحث لزوم أخذ العينات اللازمة لتنفيذ التجارب المخبرية وعلى أعماق مختلفة لبيان مدى انتشار اثر الكلس حول الوتد الكلسي دون الحاجة لتخريب البلاطات البيتونية و بهدف الحفاظ على هذه البلاطات البيتونية في أماكنها لزوم اجراء أبحاث لاحقة .

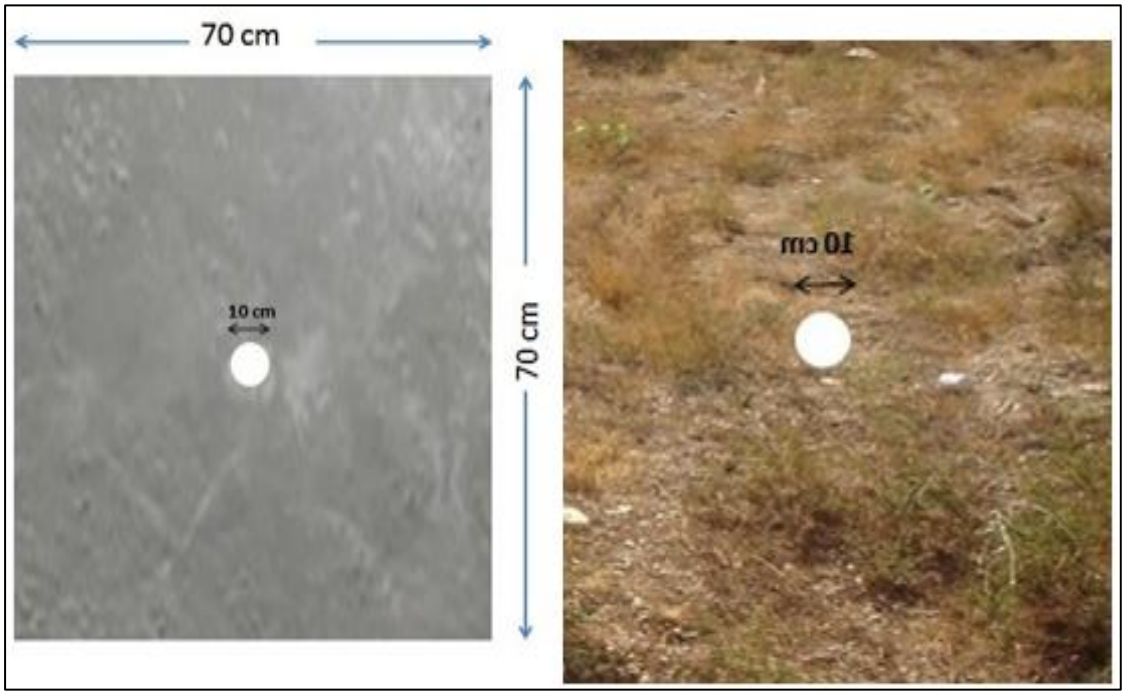
صممت أبعاد البلاطات البيتونية وفقاً للعلاقة الخطية التجريبية التي استنتجها الباحثون بجامعة أنقرة (Resat & Candan & Mehmet , Ankara , 2006 ) [1] والتي تربط بين قطر الوتد الكلسي (D) cm و نصف قطر المسافة الفعالة لانتشار ( هجرة ) الكلس حول الوتد الكلسي (R) cm وفق العلاقة التالية : ( R= 2.5*D + 2.07 ) .
وبتطبيق هذه العلاقة في هذا البحث حيث قطر الأوتاد الكلسية المنفذة (10) cm , فستكون مسافة الانتشار الفعال للكلس ( هجرة الكلس ) اعتباراً من سطح الوتد الكلسي حوالي ( 30 ) cm.



**شكل رقم (8) شكل توضيحي فراغي لكيفية استناد البلاطات البيتونية على الأوتاد الكلسية.**




**شكل رقم (9) شكل توضيحي مستوي لأبعاد وكيفية استناد البلاطات البيتونية على الأوتاد الكلسية.**




**شكل رقم (10) شكل توضيحي لكل من الوتد المنفرد والبلاطة المستندة على وتد وحيد.**

## B-4-1- التجارب الحقلية المنفذة:

بعد تنفيذ الأوتاد الكلسية والبلاطات البيتونية بسبعة أيام , تم اجراء القياس المرجعي الأول لمناسيب البلاطات البيتونية وخمسة نقاط مرجعية ثابتة في الموقع وذلك باستخدام جهاز نيفو دقيق من مخبر المساحة في كلية الهندسة المدنية. وقد تم مراعاة اجراء القياس المرجعي الأول قبل بداية الموسم المطري والتربة بحالة جافة تماماً.

تم رصد الهطولات المطرية يومياً ولمدة عام كامل تقريبا , وذلك من موقع المشروع ومن النشرات المطرية الصادرة عن وزارة الزراعة والإصلاح الزراعي ( مشروع الاستمطار) .

خلال هذه الفترة تم إجراء ستة قياسات (عدا القياس المرجعي الأول) لمناسيب البلاطات البيتونية والنقاط المرجعية تتناسب مع حصول هطولات مطرية آنية قبل اجراء القياس ومع تزايد مجموع أمطار الموسم , وذلك لمعرفة مقدار الانتفاخ والانكماش الفعلي للتربة تحت البلاطات البيتونية مع تزايد مجموع الهطولات المطرية خلال دورة مطرية كاملة .

بعد مرور (443) يوم على تنفيذ الأوتاد الكلسية و البلاطات البيتونية في الموقع , تم محاكاة حالة الهطول المطري الأعظمي المتوقع وغمرت منطقة البحث بالماء ( التربة و البلاطات البيتونية والأوتاد الكلسية ) بما يعادل الهطول المطري الأعظمي الحاصل خلال (29) سنة وفق بيانات الهيئة العامة للموارد المائية ومشروع الاستمطار في وزارة الزراعة , وبعد ثلاثة أيام من الغمر تم اجراء قياس لمناسيب البلاطات البيتونية و النقاط المرجعية الثابتة المنسوب و المتوزعة حول

منطقة البحث , حيث أثبتت القياسات الحقلية لمناسيب البلاطات البيتونية و النقاط المرجعية سواء التي تمت متوافقة مع تزايد مجموع الهطولات المطرية أو تلك التي تمت بعد محاكاة حالة الهطول المطري الأعظمي في منطقة البحث , أن تقنية أوتاد الكلس المكروية فعالة لتخفيض خواص انتفاخ التربة الغضارية الانتفاخية المدروسة وأن عمل الأوتاد الكلسية المكروية كمجموعة يساهم بزيادة هذه الفعالية بسبب تداخل مناطق تأثير الأوتاد الكلسية وتضاعف أثر الكلس.

**4-1 -C- التجارب المخبرية المنفذة:**

**المرحلة الأولى :**

لتحديد مواصفات تربة الموقع مع العمق تم إجراء عدد من التجارب المخبرية على العينات المستخرجة من السبر المنفرد ( الذي لا تستند عليه أي بلاطة بيتونية ) و المستخرجة من مسافة كل (1) m مع العمق أو عند تغير مظهر التربة وذلك من سطح الأرض الطبيعية و حتى عمق (6) m .

والتجارب هي ( تجربة الرطوبة , الوزن الحجمي , الوزن النوعي , حدود أتربرغ , ضغط الانتفاخ , الانتفاخ النسبي ) , كما تم حساب الوزن الحجمي الجاف والمسامية الابتدائية , وتم تحديد المقطع الجيولوجي لتربة الموقع وتصنيفها بحسب USCS اعتباراً من سطح الأرض و حتى أسفل الوتد , علماً أن منسوب المياه الجوفية لم يلاحظ حتى عمق (6)m , الأمر الذي يعني أن التربة في موقع البحث سوف تتأثر فقط بالهطولات المطرية.

**شكل رقم (11) حفر السبور في موقع البحث.**

**شكل رقم (12) تشميع وحفظ العينات المستخرجة من السبر المنفرد لزوم تحديد مواصفات التربة مع العمق.**

**شكل رقم (13) صور عينات سليمة من السبر المنفرد على أعماق مختلفة.**

**المرحلة الثانية ( الدراسة المخبرية ):**

بعد مرور (520) يوم على تنفيذ الأوتاد الكلسية و البلاطات البيتونية تم الكشف على الوتد الكلسي المنفرد , و أخذت عينات سليمة كل (10) cm أفقياً اعتباراً من السطح الخارجي للوتد الكلسي و لمسافة تصل حتى (120) cm أي (12) عينة , وذلك على عمقين مختلفين من سطح الأرض (0.75) m و (2.5)m بالإضافة إلى عينة غير متأثرة بالكلس على مسافة ( 3) m من محيط الوتد الكلسي و على العمقين المذكورين , أي (13) عينة من عمق (0.75 ) m و مثلها من عمق m (2.5) .

تم اختيار العمقين المذكورين لأن نتائج التجارب في المرحلة الأولى بينت أن عينات التربة الواقعة على عمق ( 0 - 1 ) m و (2– 3) m لها أكبر ضغط انتفاخ و أكبر انتفاخ نسبي , وبالتالي يتوقع الحصول على نتائج واضحة بخصوص مدى انتشار أثر الكلس حول الوتد الكلسي عند اجراء التجارب المخبرية اللازمة على العينات المأخوذة من هذين العمقين .

تم اجراء التجارب المخبرية على العينات المذكورة وذلك بغية تحقيق هدفين , الأول هو تحديد مدى فعالية أوتاد الكلس المكروية لتحسين خواص التربة الغضارية الانتفاخية المدروسة و بصورة خاصة ( تخفيض ضغط الانتفاخ و الانتفاخ النسبي و قرينة الانتفاخ و قرينة اللدونة ), و الهدف الثاني هو تحديد مدى انتشار أثر الكلس أفقياً على خواص التربة حول الوتد الكلسي.

و التجارب التي تم اجراؤها على كافة العينات المأخوذة من العمقين (0.75 ) m و m (2.5) هي ( تجربة الرطوبة , الوزن الحجمي , الوزن النوعي , حدود أتربرغ , ضغط الانتفاخ , الانتفاخ النسبي , قرينة الانتفاخ , تجربة قياس PH , الاستهلاك الأولي من الكلس ) وحسبت المسامية الابتدائية و الوزن الحجمي الجاف و تم تصنيف التربة بحسب USCS.

تبين أن لأوتاد الكلس المكروية أثر فعال على تخفيض ضغط الانتفاخ والانتفاخ النسبي وقرينة الانتفاخ وقرينة اللدونة و تحسين بقية الخواص الأخرى وأن هذا الأثر ينتشر حول الوتد الكلسي لمسافة حوالي خمسة أضعاف قطر الوتد الكلسي , إلا أن المسافة الفعالة لا تزيد عن ثلاثة أضعاف قطر الوتد الكلسي.

وأخيراً تم إجراء مقارنة اقتصادية بين طريقة تحسين خواص التربة الغضارية الانتفاخية باستخدام أوتاد الكلس المكروية و طريقة الخلط المباشر للتربة مع الكلس .

**شكل رقم (14) الكشف عن الوتد الكلسي المنفرد .**

**شكل رقم (15) الوتد الكلسي المنفرد بعد (520 ) يوم على تنفيذه بالتربة.**

# الفصل الثاني

## 2- الدراسة المرجعية

### 2-1 تحسين مواصفات التربة:

عندما تكون تربة الموقع سيئة فلا بد من استبدالها بتربة محسنة أو اتخاذ إجراءات معينة لتحسين خواصها وذلك وفق أحد الطرق التالية :

**استبدال التربة:** تستخدم غالباً عندما تكون تربة الموقع عبارة عن غضار طري أو غضار فيه مواد عضوية بنسبة مرتفعة , حيث يتم إزالة هذه التربة واستبدالها بمواد ذات نوعية جيدة لضمان ثبات التربة وتجنب الهبوط بقيم تزيد عن المسموح بها بحسب نوع المنشأة , ويفضل عادة استخدام الحجارة الصغيرة مع الرمل كمواد محسنة بديلة عن تربة الموقع سيئة المواصفات .

**تكثيف التربة:** تستخدم عندما تكون تربة الموقع عبارة عن تربة حبيبية رخوة أو غير متجانسة أو مكونة من الفضلات والمواد المستعملة أو قابلة للتميع , و تهدف عملية تكثيف التربة الى زيادة متانتها وتقليل هبوطها المتوقع ، وتتم باستخدام تقنيات الاهتزاز أو أوتاد الرص للرمل أو الرص مع الحقن أو الدق بأثقال كبيرة.

**تجفيف أو رص التربة:** تستخدم هذه الطريقة عندما تكون تربة الموقع عبارة عن تربة متماسكة ذات متانة و نفاذية منخفضة حيث أن المنشآت التي ستستند عليها ستكون عرضة لعدم الثبات و الاستقرار أو لهبوط كبير على المدى الطويل , و تزيد متانة هذه الأنواع من الترب وتتحسن درجة انضغاطيتها مع الزمن تحت تأثير الأحمال المطبقة، وتستخدم تقنية التحميل المسبق لهذا النوع من الترب لزيادة الإجهاد الفعال , ويمكن الوصول لنفس النتيجة عبر تخفيض ضغط الماء المسامي من خلال سحب الماء وتجفيف التربة.

**حقن التربة:** تتلخص هذه التقنية بحقن مواد قابلة للضخ في المسامات الطبيعية للتربة أو في مسامات صناعية يتم إحداثها من خلال ضغط الحقن المطبق (Displacement or Replacement Grouting).

إن الهدف الأساسي من عملية الحقن هو زيادة متانة التربة و منع رشح المياه عبرها, وتتأثر عملية حقن التربة بعدة عوامل أهمها لزوجة مادة الحقن ومدة عملية الحقن وحجم حبيبات ومسامات التربة وضغط الحقن المطبق ومواصفات التربة المحقونة .

**المعالجة الحرارية للتربة:** تقسم هذه الطريقة إلى مجموعتين أساسيتين الأولى تسخين التربة والثانية تجميدها . إن التسخين الصناعي للتربة يصل لدرجات حرارة تتراوح ( 300 – 1000 ) c° . وتعتبر معالجة التربة الملوثة أحد أهم تطبيقات تسخين التربة , حيث يساعد تسخينها إلى درجات حرارة عالية على خروج البخار من المركبات العضوية الموجودة فيها,

ويمكن تحسين ذلك وزيادة معدل خروج البخار من التربة بحقنها بتيار هواء مسخن داخل التربة عبر آبار حقن معدة لهذا الغرض .

يتم تسخين التربة عادة بتطبيق تيار كهربائي عبرها , وهذه التقنية فعالة من اجل الترب الملوثة بالمواد العضوية و غير العضوية و المركبات النشطة إشعاعيا .

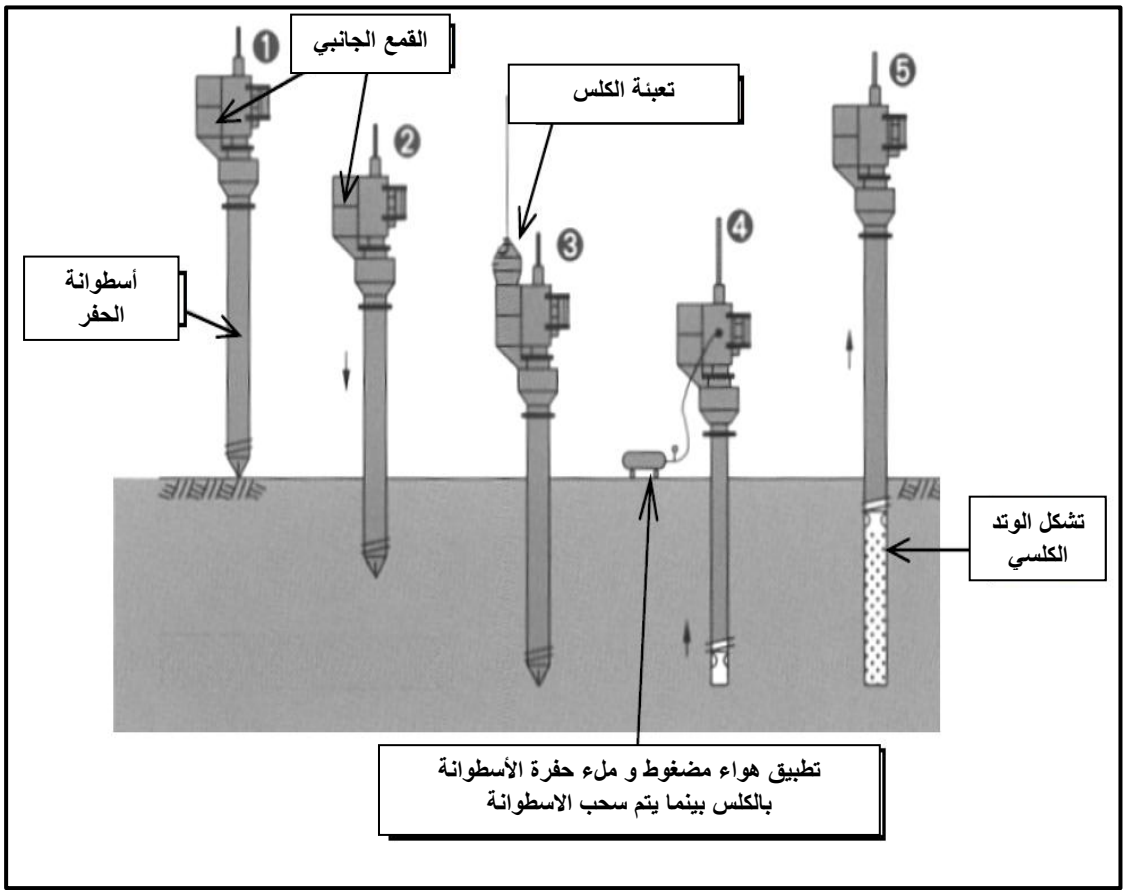
**تسليح التربة:** يقصد بها إنشاء تربة مسلحة في الموقع من خلال إدخال مواد معينة ضمن بنية وتركيب التربة , وان تقنيات تسليح التربة تهدف لزيادة قدرة التربة على تحمل قوى الشد و الضغط و عزوم الانعطاف وتراكيبها المختلفة الناشئة عن الاستخدامات المختلفة لها.

**الاضافات والخلائط الكيميائية:** إن الترب الغضارية تنتفخ وتصبح طرية عند زيادة رطوبتها وتتقلص وتصبح قاسية عندما تجف , وتستخدم الإضافات الكيميائية من خلال خلطها مع التربة لتخفيف ظاهرة انتفاخ و انكماش التربة بتغير رطوبتها , و لتحسين المتانة والنفاذية و مواصفات التشوه , وقد تستخدم منفصلة أو مجتمعة مع بعضها . من أشهر المركبات والمواد الكيميائية المستخدمة في هذا المجال هي الكلس والاسمنت وكلور الصوديوم وكلور الكالسيوم. يستخدم كلور الصوديوم وكلور الكالسيوم من أجل امتصاص الماء الموجود بالتربة ، بينما يستخدم الاسمنت لربط حبيبات التربة مع بعضها البعض و يمكن استخدام الترب المحسنة بالإسمنت كطبقة أساس للطرق, بينما يستخدم الكلس و كلور الكالسيوم لتخفيض لدونة الترب الغضارية عالية اللدونة و تخفيض التغيرات الحجمية في الترب الانتفاخية.

بالرغم من أن عدد كبير من الإضافات الكيميائية قد تم دراستها واستخدامها وتطويرها، إلا أن أكثر الإضافات الكيميائية المستخدمة حالياً هي الكلس والاسمنت بسبب توفرهما وكلفتها الاقتصادية المنخفضة .

تم دراسة والتعمق بآلية تثبيت التربة بالكلس في الستينات من القرن الماضي وقد ساعدت الحاجة لتقنية سريعة في الانشاء على تطوير تقنية معالجة التربة بالكلس ، أما طريقة تحسين مواصفات طبقات التربة العميقة عن طريق خلطها بالإضافات الكيميائية فقد تم تطويرها في اليابان في السبعينات من القرن الماضي، وفي نفس الفترة تم تطوير تقنية أوتاد( أعمدة ) الكلس في السويد.

ان تقنية الوتد الكلسي الكيميائي (Chemical Lime Pile) أو عمود الكلس ( Lime Column) تتكون من إنشاء وتد من الكلس الحي في التربة دون أن يتم خلط الكلس مع التربة , ويتم ذلك من خلال تنفيذ حفرة بشكل اسطواني تمتد الى العمق المطلوب في التربة , وبعد ذلك يتم عكس اتجاه دوران أسطوانة الحفر و بالتالي تبدأ الأسطوانة بالخروج من التربة وعلى التوازي يتم ملء الحفرة الناتجة بأكسيد الكالسيوم عن طريق تطبيق ضغط هواء لحقن الكلس في الحفرة , وقد استخدمت هذه الطريقة في اليابان لتثبيت ترب بأعماق تصل حتى ( 45 ) m .




**شكل رقم (16) خطوات تنفيذ الوتد الكلسي.**

تتم عملية التحسين الكيميائي للتربة بإضافة مواد رابطة أو كيميائية من خلال التبادل الأيوني الحاصل على سطح المنرالات الغضارية والتي تؤدي الى ترابط حبيبات التربة وامتلاء مساماتها بنواتج التفاعلات الكيميائية.

## الجمع بين الطرق السابقة:

يواجه المهندسون مشاكل التربة في الواقع , ويتوجب عليهم إيجاد حلول واقعية تكون وفي متناول اليد للمشاكل الطارئة , وفي الحالات الصعبة و المعقدة يمكن الجمع بين أكثر من طريقة من طرق تحسين التربة سابقة الذكر مع التصميم المناسب للأساسات.

## 2-2- دراسة مرجعية عن الكلس:

**2-2-1 مقدمة:** ينتج الكلس عن تكسير الأحجار الكلسية وتسخينها إلى درجات حرارة عالية , و يستخدم الكلس المطحون عادة لمعالجة التربة الغضارية حيث يتفاعل معها ويحدث فيها تغييرات بنيوية وكيميائية , وإن التغيرات التي تحصل بالتربة عند معالجتها بالكلس تتضمن تعديل

خواص التربة ويصطلح على تسمية هذه العملية ( Soil Modification ) , و تتضمن إحداث تغيرات في بنية التربة و لدونتها وحساسيتها للماء . أما مصطلح تثبيت التربة ( Soil Stabilization ) فيشير إلى متانة التربة المكتسبة على المدى الطويل .

استخدم الكلس منذ عقود عديدة كمادة مضافة تخلط مع التربة , وأجريت العديد من الأبحاث لشرح آلية عمل الكلس و تأثيره على خواص التربة , وقد تم تطوير العديد من الإجراءات المخبرية المعيارية لتحديد النسبة المثالية من الكلس الواجب إضافتها للتربة للحصول على النتائج المطلوبة. إن المكون الأساسي في الكلس المستخدم عادة في أعمال الانشاء هو مركب أكسيد الكلسيوم CaO ويدعى أيضا الكلس الحي أو الكلس السريع أو الكلس الدولوميتي (Dolomitic Lime , High Calcium quicklime ) , و يتضمن نسبة كبيرة من أوكسيد المغنيزيوم (MgO ) وهو متوفر بكثرة , ويتم تشكيل الكلس والحصول عليه بعملية تدعى الكلسنة (Calcining) وهي عبارة عن تعريض احجار الكلس المطحونة (CaCO3 ) لدرجات حرارة C˚ 982 لضمان نقاوة الكلس الناتج .

يتم عادة اجراء عدة تجارب على الأحجار الكلسية قبل اجراء عملية الكلسنة لضمان عدم وجود ملوثات أساسية وبكميات كبيرة في أحجار الكلس .
إن تعريض الأحجار الكلسية (كربونات الكالسيوم) لحرارة عالية ينتج أكسيد الكالسيوم وفق المعادلة التالية:

$$CaCO_3 \xrightarrow{\Delta=982^\circ} CaO + CO_2$$

| كربونات الكالسيوم (حجر كلسي) | أكسيد الكالسيوم (كلس حي) | ثاني أكسيد الكربون |
|---|---|---|

يستخدم الكلس إما على شكل أكسيد الكالسيوم CaO ناتج عن عملية الكلسنة أو على شكل ماءات الكالسيوم الناتجة عن إضافة كمية قليلة من الماء الى أكسيد الكالسيوم , وتنتج ماءات الكالسيوم وفق التفاعل التالي الذي يحدث بسرعة وينتج كمية كبيرة من الحرارة :

$$CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2$$

| أكسيد الكالسيوم (كلس حي) | ماء | ماءات الكالسيوم (كلس مطفأ) |
|---|---|---|

من الجدول رقم (1) أدناه يظهر أن الوزن الذري لماءات الكالسيوم Ca(OH)2 يساوي 74.09 بينما الوزن الذري لأكسيد الكالسيوم CaO يساوي 56.08, مما سبق يستنتج أن نسبة ماءات الكالسيوم الى أكسيد الكالسيوم اللازمة لإنتاج نفس الكمية من شوارد الكالسيوم تعادل 1.321 وهي نفس النسبة المستخدمة بأعمال التصميم و الإنشاء .

| | |
|---|---|
| Hydrogen (H) | 1.00794 |
| Oxygen (O) | 15.9994 |
| Calcium (Ca) | 40.078 |
| Calcium Oxide (CaO) | 56.077 |
| Calcium Hydroxide ($Ca(OH)_2$) | 74.093 |

**جدول رقم (1) الوزن الذري لعناصر ومركبات الكلس**

إن كلاً من مركبات أكسيد الكالسيوم وماءات الكالسيوم يتوجب حمايتها وعزلها عن الهواء الخارجي حتى بدء استخدامها وخلطها مع التربة لأنها تتفاعل مع الرطوبة ومع أكسيد الكربون الموجودين في الهواء لتشكل كربونات الكالسيوم بعملية تسمى (الكربنة) وهي تفاعل بطيء ويتحول نتيجته الكلس إلى مادة خاملة غير فعالة وهي عكس عملية الكلسنة.

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O$$

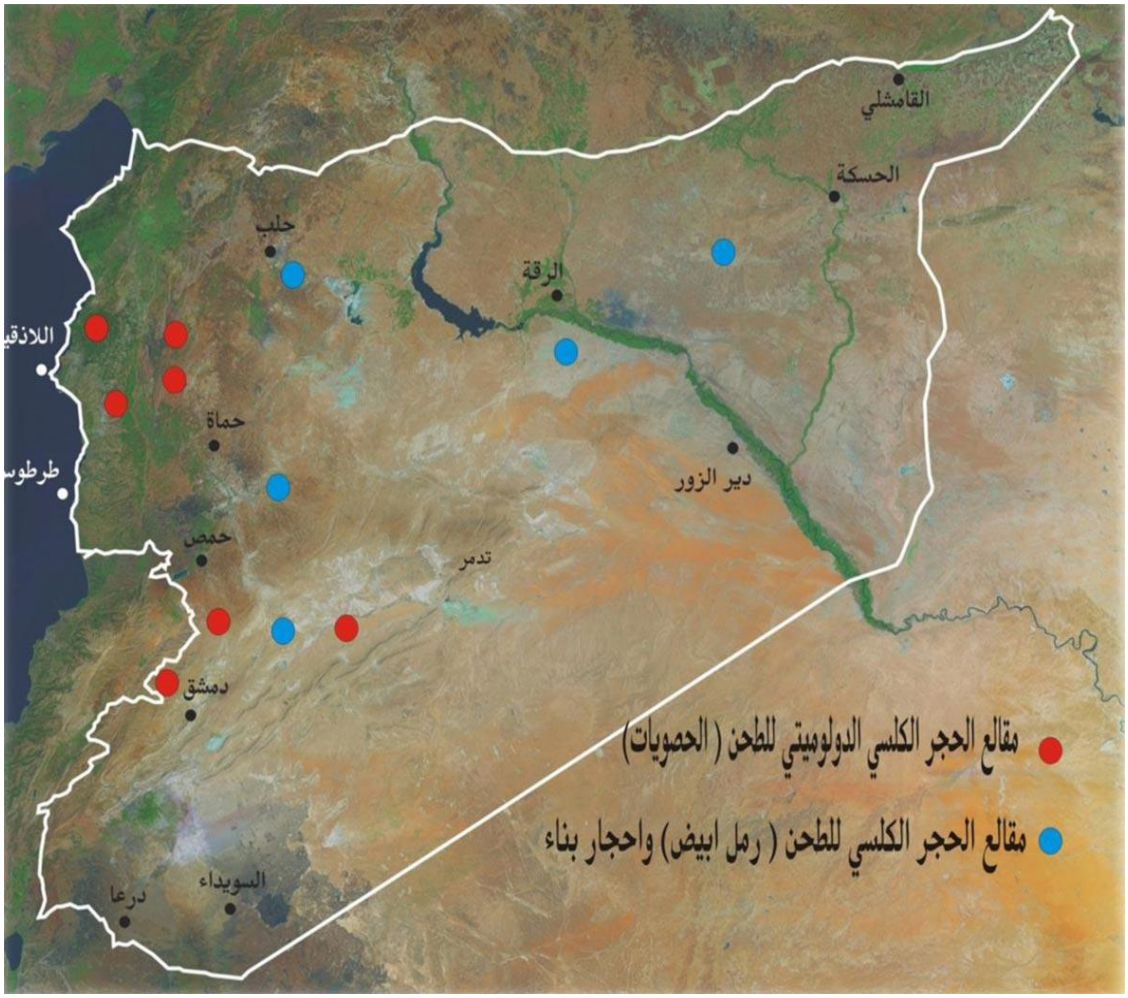
| ماء | كربونات الكالسيوم (حجر كلسي) | ثاني أكسيد الكربون | ماءات الكالسيوم (كلس مطفأ) |
|---|---|---|---|

## 2-2-2 تواجد الكلس في سوريا:

بحسب بيانات المؤسسة العامة للجيولوجيا التابعة لوزارة النفط في الجمهورية العربية السورية , فان مقالع الأحجار الكلسية والكلسية الدولوميتية تتوزع على مختلف محافظات ومناطق القطر , حيث أن التشكيلات الصخرية الصالحة للاستثمار والعائدة للأعمار الجيولوجية المختلفة تتكشف في معظم محافظات ومناطق القطر ، علماً بأن عامل الكلفة الاقتصادية لنقل المواد من المقلع المنتج إلى مكان الاستهلاك هو العامل الرئيسي في عمليات الاستثمار المقلعي .

ان الصخور الكربوناتية (كلس – دولوميت) الموجودة في سوريا هي عبارة صخور رسوبية وتشمل الصخور الكلسية المؤلفة بأغلبها من كربونات الكالسيوم والصخور الدولوميتية.

يبين الشكل رقم ( 17) أدناه أماكن تواجد الصخور الكلسية في سوريا .

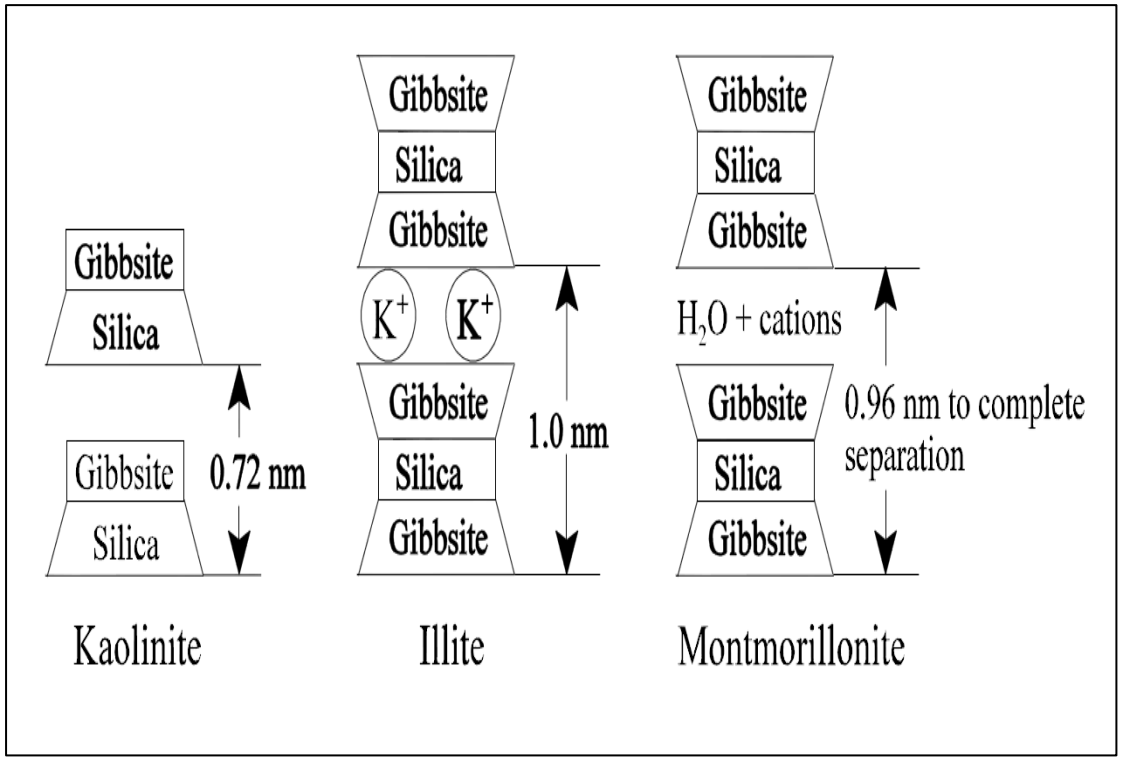



**شكل رقم ( 17 ) أماكن تواجد الصخور الكلسية في سوريا – المؤسسة العامة للجيولوجيا**

**2-2-3 تفاعلات الكلس مع التربة الغضارية:** بمجرد خلط الكلس مع التربة الغضارية تحدث تغيرات فورية في بنية التربة الغضارية، وان معظم الترب الغضارية تكتسب متانة على المدى الطويل عند تفاعلها مع الكلس.

إن التغيرات الفورية في بنية التربة تدعى عادة تعديل مواصفات التربة (Modification)، بينما تدعى المتانة المكتسبة على المدى الطويل بتثبيت التربة (Stabilization) , و يعود الدور الأساسي في تعديل مواصفات التربة (Soil Modification ) الى التركيب المنرالي لها.

تتكون بنية التربة الغضار من صفائح طويلة للسليكا رباعية السطوح , و الألمنيوم ثمانية السطوح وتدعى أيضاً (الجبس) , وان هذه البنية المذكورة مبينة بشكل بياني في الشكل رقم (18).



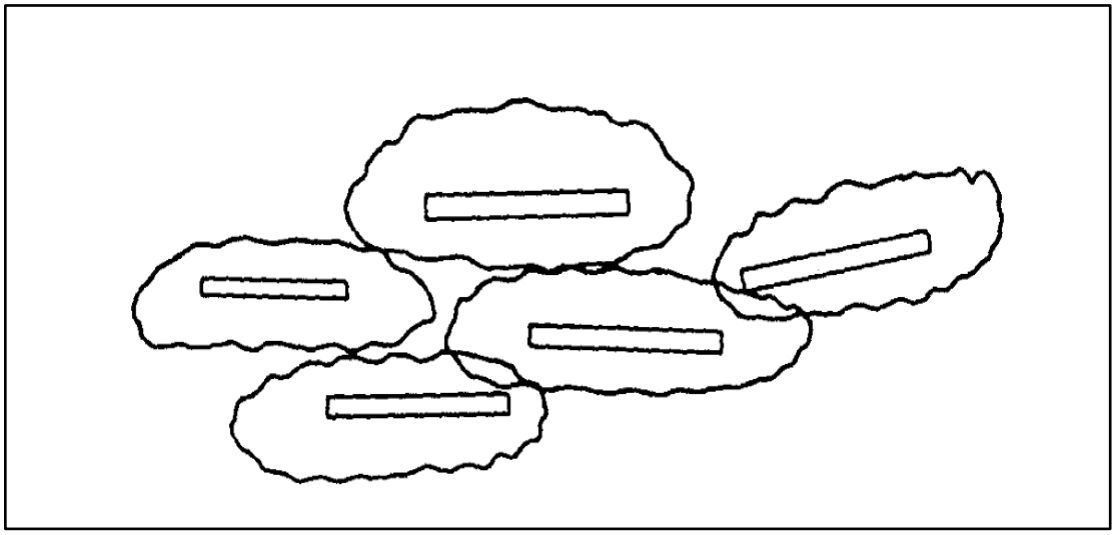

**شكل رقم (18) بنية أهم المنرالات الغضارية الشائعة**

يتكون الكاؤولينيت من صفائح متعاقبة من السيليكا و الألومينا على التوالي مرتبطتين ببعضهما برابطة هيدروجين , بينما يتكون الاليت من صفيحة سيلكا تقع بين صفيحتي ألومينا و ترتبط طبقات الاليت مع بعضها بأيونات البوتاسيوم ، أما المونتموريللونيت فهو عبارة عن شكل من **أشكال** منرال السمكتايت , ويتكون من صفيحة سيليكا بين صفيحتي الومينا و ترتبط طبقات المونتموريللونيت مع بعضها بالكاتيونات المتوفرة حيث لا وجود لأيونات البوتاسيوم .

ان كل منرال من المنرالات الغضارية يمتلك شحنة سالبة صافية على سطحه تجعل الكاتيونات والجزيئات القطبية ( الماء) تنجذب الى سطوح المنرالات الغضارية , ونتيجة تراكم الكاتيونات و الجزيئات القطبية تتشكل طبقة من الماء حول ذرات الغضار تسمى طبقة الماء المنتشر وقد تصل سماكة هذه الطبقة عدة أضعاف سماكة ذرات الغضار نفسها .

إن عملية تعديل مواصفات التربة الغضارية (Soil Modification) تتضمن تخفيض لدونة التربة وحساسيتها (شراهتها) للماء, ويقوم الكلس بذلك بالدرجة الأولى من خلال عملية التبادل الكاتيوني (Cation Exchange) وما ينتج عنه من تلبد (Flocculation) و تجمع وتكتل لذرات الغضار

(Agglomeration) . في الحالة الطبيعية فإن ذرات الغضار تمتلك طبقة ماء منتشر حولها و تساعد هذه الطبقة على توجيه ذرات الغضار لتصطف بشكل موازي لبعضها البعض كما هو موضح بالشكل رقم ( 19 ).



**شكل رقم (19) ترتيب متوازي لذرات الغضار مع طبقات مائية سميكة حولها.**

عندما يخلط الكلس مع التربة بوجود الماء فإن كاتيونات الكالسيوم في المحلول تحل محل الكاتيونات على سطح الذرات الغضارية , و تقوم برفع قيمة PH للمزيج ( تربة , كلس, ماء ) .

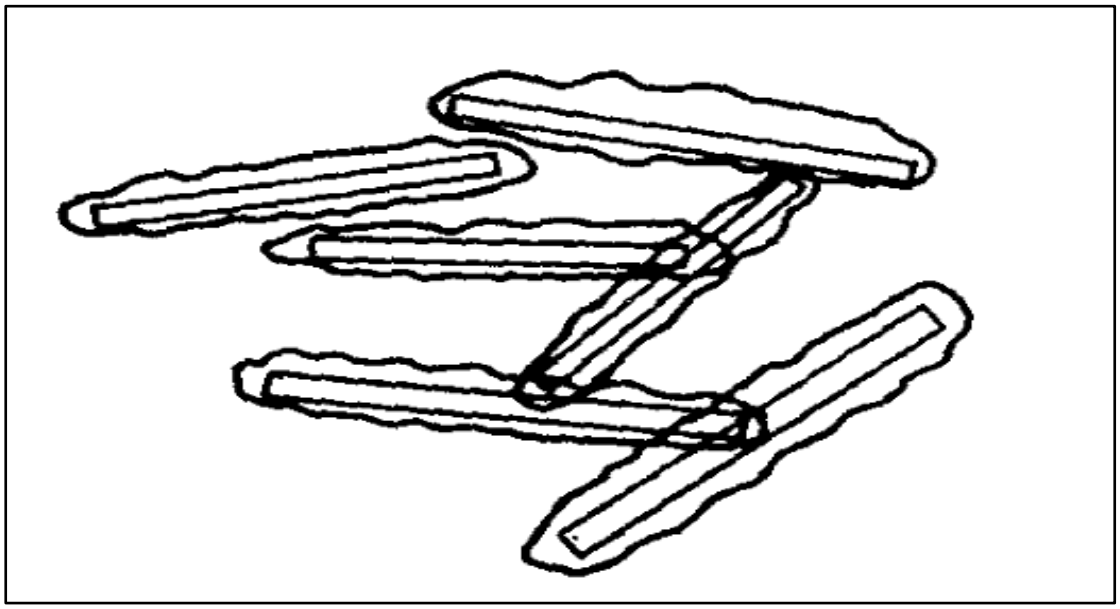
إن الكاتيونات تحل محل بعضها البعض وفق التسلسل التالي :

$$Li^{+} < Na^{+} < H^{+} < K^{+} < NH_4^{+} << Mg^{++} < Ca^{++} << Al^{+++}$$

حيث كل كاتيون قادر أن يحل محل الكاتيونات التي على يساره, ووفقاً للتسلسل أعلاه فإن الكالسيوم قادر أن يحل محل الكاتيونات الموجودة في معظم الترب الغضارية .

إن ايونات الكالسيوم الناتجة من إضافة الكلس تحل محل العديد من الكاتيونات الموجودة على سطح الذرات الغضارية وهو ما يساعد في تخفيض وتثبيت طبقة الماء المنتشر حول الذرات الغضارية ( Diffuse Water Layer ) .

إن رفع قيمة ال PH للمزيج يزيد أيضاً طاقة التبادل الكاتيوني ويساعد على استبدال المزيد من الكاتيونات حيث يحل الكالسيوم محلها , و ان تخفيض طبقة الماء المنتشر يسمح للذرات بأن تعيد اصطفافها على شكل ( وجه – حافة ) كما هو موضح بالشكل رقم (20) .



**شكل رقم (20) ترتيب بشكل ( وجه/حافة ) لذرات الغضار مع طبقات مائية رقيقة حولها .**

إن ترتيب ذرات التربة بشكل ( وجه/ حافة , Edge/Face ) يزيد زاوية احتكاك التربة ومتانتها على القص ويحسن قابليتها للتشغيل من خلال تخفيض لدونتها و جعلها أكثر هشاشة ." Hausman 1990 "

ان مصطلح تثبيت التربة يشير الى متانة التربة المكتسبة على المدى الطويل و التي تقاس من خلال اختبار الضغط غير المحصور أو غيره من اختبارات المتانة كتجربة CBR .

إضافة للمتانة المكتسبة على المدى الطويل عند خلط التربة مع الكلس , فإنه يحدث تحسن فوري و مباشر في المتانة بسبب التغيرات في نسيج التربة و بنيتها حيث إن عملية تثبيت التربة تتضمن تشكيل مركبات إسمنتية في بنية الغضار مع الزمن .

يقوم الكلس بتشكيل مركبات مع الألومينا واكاسيد السليكا المنحلة من بنية الغضار عند القيم المرتفعة من PH وتتفاعل المكونات لتشكل سيليكات و ألومينات الكالسيوم المائية إضافة إلى مركبات إسمنتية تشكل روابط بين ذرات التربة الغضارية , و تعتمد نتائج هذا التفاعل على وفرة الكلس الحر و المنرالات الغضارية المتوفرة و الشروط البيئية المحيطة .

تستمر متانة التربة المعالجة بالكلس بالتزايد لعدة أشهر أو حتى عدة سنوات في حال توفر شروط مناسبة "Little 1995 " وتدعى الترب التي تكتسب متانة كافية على الضغط الغير محصور عند خلطها بالكلس بالترب المتفاعلة , بينما الترب التي لا تكتسب هذه المتانة عند خلطها بالكلس تدعى ترب غير المتفاعلة .

أجريت العديد من الدراسات لتحديد التغيرات التي تحدث في مواصفات التربة عند خلطها مع الكلس وتبين أن التأثير العام لإضافة وخلط الكلس مع الترب اللدنة هو تخفيض لدونة هذه التربة, حيث يسبب الكلس تخفيض جوهري في لدونة التربة الغضارية "Little 1995 " , و يخفض الكلس أيضا كمية المواد الناعمة بالتربة من خلال عمليات التلبد و التكتل لذرات التربة الغضارية "Little 1995 " وهو ما يزيد في النسبة المئوية للحبيبات الموافقة لقياس حبيبات الرمل و السيلت عند اجراء التحليل الحبي للتربة (Basma and Tuncer 1991) .

وقد اثبتت الأبحاث أن للكلس تأثير هام في تخفيض ضغط وطاقة الانتفاخ للترب الغضارية , ويزيد هذا التأثير فاعلية مع زيادة زمن المعالجة . وتبين أيضاً أن كمية المواد الناعمة ونوع المنرالات الغضارية وكمية الكلس وزمن المعالجة تؤثر على فعالية الكلس في تثبيت التربة وتحدد مقدار المتانة المكتسبة على المدى الطويل.

قام عدد من الباحثين ( Epps , Dunlap , Gallaway , Currin ) [22] بمراجعة العوامل المؤثرة بتثبيت التربة وتوصلوا الى نتيجة مفادها أنه لتكون التربة الغضارية قابلة للتثبيت بالكلس ينبغي ان يكون محتواها من المواد الغضارية لا يقل عن (7%) و قرينة لدونتها لا تقل عن (10) , وأن هناك عدة عوامل تحول دون تثبيت فعال للتربة الغضارية بالكلس أهمها القيمة المنخفضة ل PH في التربة , و المحتوى العالي للتربة من المواد العضوية و الكبريت .

## 2-2-4 آلية تحسين التربة بالكلس :

بعد إضافة الكلس إلى التربة الغضارية يحدث العديد من التفاعلات الكيميائية هي التبادل الأيوني ( Cation Exchange ) ، التندف أو التخثر ( Flocculation ) ، التكتل ( Agglomeration ) ، كربنة الكلس ( lime carbonation ) وأخيراً يحدث تفاعلات بوزولانية Pozzolanic Reaction.

تقسم تقنيات تثبيت التربة بالكلس إلى مجموعتين رئيسيتين الأولى تحسين التربة العميقة ويستخدم لها تقنية أوتاد ( أعمدة ) الكلس و المجموعة الثانية هي التحسين السطحي للترب الغضارية وتتم بالخلط المباشر للتربة و الكلس . إن تقنية أعمدة الكلس عبارة عن حفرة بالأرض تملأ بالكلس ,ويتم إنشاء أعمدة الكلس باستخدام أسطوانة دوارة لها رأس مثقب تدخل بالتربة الى العمق المطلوب ثم يعكس اتجاه دورانها ويتم سحب المثقب ببطء و على التوازي يتم ضخ الكلس السريع ( الحي ) بشكل بودرة عن طريق ضغط هواء في التربة.

ليحصل تثبيت فعال للتربة , يتوجب على أيونات الكلس والهيدروكسيل أن تهاجر عبر الغضار لأن أيونات الهيدروكسيل تخلق شروط قلوية مرتفعة في التربة الغضارية تؤدي بدورها إلى انحلال بطيء لسلكيات الألمنيوم والتي تترسب فيما بعد كنواتج تفاعل اسمنتية , تساهم بدورها بعملية

التندف (التخثر ) Flocculation للتربة من خلال ربط حبيبات التربة القريبة من بعضها مما يؤدي إلى تقوية التربة الغضارية . و يجدر الإشارة إلى أن التفاعلات البوزولانية ( Pozzolanic Reaction) مرتبطة بالوقت و تؤدي الى زيادة متانة التربة تدريجياً خلال فترة زمنية طويلة.

- **تعديل خواص التربة** : إن تعديل خواص التربة عند خلطها بالكلس يحدث بسبب حلول كاتيونات الكالسيوم المنتجة من ماءات الكالسيوم محل الكاتيونات الموجودة عادة على سطح المنرالات الغضارية , و يساعد على ذلك الوسط القلوي ذو قيمة PH العالية في مزيج ( الماء و الكلس ) , وان تعديل خواص التربة الغضارية بواسطة الكلس يحقق الفوائد التالية ( تخفيض اللدونة , تخفيض قابلية التربة للاحتفاظ بالماء , تخفيض قابلية التربة للانتفاخ , تحسين ثبات التربة , تحسين قابلية التربة للتشغيل.)
- **تثبيت التربة** : يقصد بتثبيت التربة من خلال معالجتها بالكلس هي المتانة المكتسبة بالتربة على المدى الطويل الناتجة عن التفاعلات البوزولانية التي تنتج سيليكات و الومينات الكالسيوم المائية و ذلك عندما يتفاعل الكالسيوم المتحرر من الكلس مع الالومينات و السيليكات الموجودة بالتربة الغضارية .

إن التفاعل البوزولاني الكامل يمكن أن يستمر لمدة طويلة قد تصل إلى عقود من الزمن و تستمر مادام الكلس موجودا و قيمة PH مرتفعة.

إن تثبيت التربة بالكلس يتم من خلال تبادل الشوارد الموجبة ثم عملية التندف , ثم التكتل إضافة إلى تفاعل الكلس مع الكربون وحدوث تفاعل بوزولانية . إن تفاعلات التبادل الأيوني وعمليات التندف والتكتل تحدث بسرعة وتؤدي لحدوث تغييرات فورية في مواصفات التربة مثل المقاومة على الضغط و اللدونة وقابلية التشغيل, بينما يحدث التفاعل البوزولاني مع الزمن وليس بشكل فوري وتتضمن حدوث تفاعل بين الكلس وعناصر السيليكات والألمنيوم الموجودة في التربة وتؤدي إلى إنتاج أنواع مختلفة من المركبات والمواد الرابطة الأمر الذي يؤدي إلى زيادة متانة التربة على الضغط .

يمكن تلخيص وتوضيح ما يحدث في التربة عندما يضاف لها الكلس من خلال التفاعلات الكيماوية الأربعة التالية :

(1) Cation exchange

$$Ca^{++} + Clay \rightarrow Ca^{++}Clay + (Na^{+}, K^{+}) \quad (1)$$

(2) Flocculation/Agglomaration

(3) Carbonation

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O \quad (2)$$

(4) Pozzolanic reactions

$$Ca^{++} + 2(OH)^{-} + SiO_2 \rightarrow CSH \quad (3)$$

$$Ca^{++} + 2(OH)^{-} + Al_2O_3 \rightarrow CAH \quad (4)$$

يحدث التبادل الأيوني بين الأيونات المعدنية المرتبطة بسطوح حبيبات الغضار و المحاطة بطبقة مائية مضاعفة وبين شوارد الكالسيوم , الأمر الذي يؤدي الى تعديل كثافة الشحنات الكهربائية حول حبيبات الغضار و التي تقود إلى تجمع وتكتل الحبيبات الغضارية , و هذا الإجراء هو المسؤول بشكل أساسي عن تعديل الخواص الهندسية للتربة الغضارية عند معالجتها بالكلس .

إن التفاعلات البوزولانية هي تفاعلات تحدث مع الزمن وهي المسؤولة بشكل أساسي عن تحسين خواص التربة ، وإن التغيرات الفيزيائية الكيميائية الطويلة الأمد تكون نتيجة التفاعلات البوزلانية , و يسهل الكلس حدوث التفاعلات البوزولانية لأنه يساهم بتشكيل بيئة كيميائية عالية القلوية في مسامات التربة, الأمر الذي يزيد من انحلال السيليكون و الألمنيوم من الغضار , وهذه المركبات المنحلة تتفاعل مع أيونات الكالسيوم الموجودة في الماء المسامي و تشكل سيليكات الكالسيوم المائية Calcium Silicate Hydrate (CSH) و ألومينات الكالسيوم المائية Calcium Aluminate Hydrate (CAH) حيث تتبلور هذه المركبات مع الزمن و تحدث تغيير في لدونة الغضار وزيادة مقاومة التربة على القص وتخفيض في نفوذيتها , أما تفاعل الكلس مع الكربون فهو غير مرغوب فيه لأنه ينتج عوامل ربط ضعيفة .

ينتج عن معالجة التربة بأوتاد الكلس عملية رص للتربة وإكسابها متانة إضافية من خلال التمدد الجانبي لأعمدة الكلس كنتيجة لامتصاصها الماء من التربة المحيطة .

**إن تنفيذ تقنية أوتاد الكلس يحدث التأثيرات التالية على التربة المجاورة :**

- حدوث ارتصاص بالتربة :

حيث أن أكسيد الكالسيوم يمتص الماء من التربة المحيطة فيتشكل ماءات الكالسيوم وينتفخ حيث يزيد حجمه حوالي مرتين , ويكون معدل امتصاصه للماء حوالي 1.32 وذلك حسب التفاعل الكيماوي التالي:

$$CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 + 15.6Kcal/mol$$

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Molecular weight** | **56** | **18** | **74** | |
| **Specific gravity** | **3.3** | **1** | **2.2** | |
| **Weight ratio** | **1** | **0.32** | **1.32** | **معدل الامتصاص حوالي 1.3** |
| **Apparent volume** | **1** | **1.06** | **2** | **الانتفاخ حوالي مرتين** |

- **التبادل الأيوني :**

إن السطوح الخارجية لحبيبات الغضار تكون ذات شحنات سالبة في حين ذرات الكالسيوم ذات شحنات موجبة $Ca^{++}$ و بالتالي فان سطوح الحبيبات الغضارية تجذب لها ايونات الكالسيوم الموجودة في ماءات الكالسيوم مما يؤدي لارتباط ذرات الغضار مع بعضها بعضاً وتزيد متانتها على القص .

- **التفاعلات البوزولانية :**

إن ايونات الكالسيوم تتابع التفاعل مع $SiO_2$ ومع $AL_2O_3$ لفترات طويلة وينتج عنها مركبات تزيد من متانة التربة , فضلاً عن أن الكلس نفسه في أوتاد الكلس يتقسى مع الوقت و يعمل كعامل كتسليح للتربة ويزيد من متانتها.

## 2-2-5- طرق تحسين التربة بالكلس ( Lime Stabilization) :

تقسم تقنية تحسين التربة بالكلس إلى قسمين رئيسيين الأول تحسين الطبقات السطحية للتربة Shallow Soil Improvement و يستخدم فيه تقنية خلط التربة بالكلس Lime Mixture Technique .

والقسم الثاني تحسين الطبقات العميقة للتربة Deep Soil Improvement و يستخدم فيه تقنية أوتاد ( أعمدة ) الكلس Lime Column Technique أو Lime Pile Technique.

تنفذ تقنية الوتد الكلسي بإحدى طريقتين , الأولى عن طريق ضخ الكلس و خلطه مع التربة DMM : Deep Column Mixing Method و هذه الطريقة تتطلب تقنيات متقدمة وهناك شركات عالمية متخصصة بهذه التكنولوجيا , وقد يصل قطر الوتد الكلسي (30–50) cm و قد يصل عمقها حتى (30) m , و أما الطريقة الثانية فهي عبارة حفرة مفرغة تملأ بالكلس و يصطلح على تسميتها (Drill hole lime piles) أو (Lime Columns) أو (Chemical lime piles) .

أثبتت الدراسات السابقة بأن استخدام تقنية أوتاد الكلس يؤدي إلى تخفيض الإنتفاخ النسبي وضغط الإنتفاخ في الترب الغضارية الإنتفاخية , وتخفيض قرينة اللدونة في الترب ذات اللدونة العالية , و زيادة مقاومة التربة الغضارية على الضغط الحر غير المحصور .

## 2-2-6- نوع الكلس المستخدم و التجارب التي تمت عليه :

هناك خمسة أنواع أساسية من الكلس موضحة بالجدول رقم (2 ) , إلا أن أكثر الأنواع استخداماً لتحسين التربة الغضارية هو الكلس الحي CaO و ماءات الكالسيوم $Ca(OH)_2$ وفي بحثنا استخدمنا الكلس الحي المطحون CaO المحلي المصدر.

| | |
|---|---|
| High-calcium quicklime | CaO |
| Dolomitic quicklime | CaO + MgO |
| Hydrated high-calcium lime | $Ca(OH)_2$ |
| Normal hydrated dolomitic lime | $Ca(OH)_2$+MgO |
| Pressure –hydrated dolomitic lime | $Ca(OH)_2$+$Mg(OH)_2$ |

**جدول رقم (2) أهم أنواع الكلس**

تم احضار الكلس من مقالع الكلس في محافظة حماة على شكل أحجار كلسية و تم طحنه باستخدام مطحنة الكرات في معمل اسمنت عدرا , و تم تعبئته بأكياس محكمة الإغلاق لعزله عن الرطوبة و نقل إلى موقع البحث . يوضح الشكل أدناه عملية تحضير و طحن الكلس

**شكل رقم (21) طحن الكلس وتحضيره في معمل الاسمنت بعدرا.**

**شكل رقم (22) الكلس الحي المطحون .**

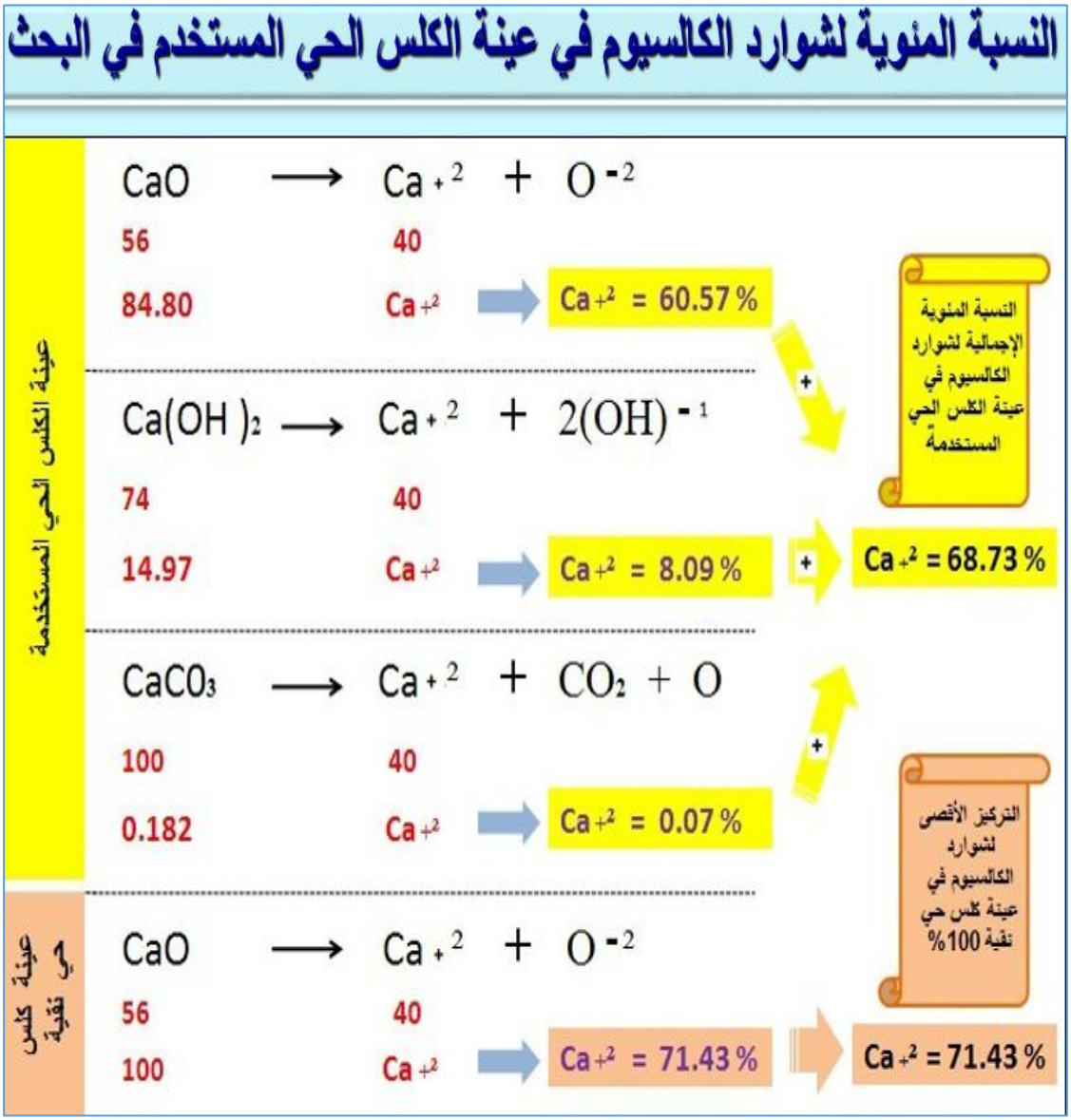
## تجربة التحليل الكيميائي لعينة الكلس المستخدمة :

تم اجراء تحليل كيميائي لعينة الكلس المستخدم في البحث في قسم الكيمياء في كلية العلوم في جامعة دمشق والنتائج موضحة بالجدول رقم ( 3) أدناه .

| نتائج التحليل الكيميائي لعينة أكسيد الكالسيوم المستخدم في البحث .<br>قسم الكيمياء - كلية العلوم – جامعة دمشق | | |
|---|---|---|
| المركب | الصيغة الكيميائية | النسبة المئوية |
| أكسيد الكالسيوم | $CaO$ | % 84.80 |
| هيدروكسيد الكالسيوم | $Ca(OH)_2$ | % 14.97 |
| كربونات الكالسيوم | $CaCO_3$ | % 0.182 |

**جدول رقم (3) نتائج التحليل الكيميائي لعينة الكلس في مخبر الكيمياء في كلية العلوم بدمشق**

باستخدام نتائج التحليل الكيميائي في المعادلات الكيميائية لمركبات الكلس , يتبين أن نسبة شوارد الكالسيوم في عينة الكلس الحي المستخدمة في البحث 68.73 % في حين أن نسبة شوارد الكالسيوم في عينة كلس حي نقية 100% تساوي 71.43 % , مما يعني أن عينة أكسيد الكالسيوم المستخدمة في البحث هي عينة شبه نقية .




## تجربة الاستهلاك الأولي للكلس:

أجريت هذه التجربة في مخبر التربة بقسم الهندسة الجيوتكنيكية بجامعة دمشق و النتائج موضحة في القسم الأخير من البحث.

## 2-3 دراسة مرجعية عن الترب الغضارية:

### 2-3-1 مقدمة :

تتواجد الترب الغضارية الانتفاخية في أجزاء عديدة من العالم و تمثل مشكلة واسعة الانتشار نتيجة حساسيتها تجاه تغير الرطوبة , حيث تبدي تغير كبير بالحجم مع زيادة رطوبتها وهو ما يؤدي الى تطبيق ضغط شاقولي على المنشآت المستندة عليها أو المطمورة ضمنها , في حين تتقلص و ينقص حجمها مع نقصان رطوبتها .

تعتبر ظاهرة الانتفاخ واحدة من أكثر التحديات جدية التي يواجهها مهندسو الجيوتكنيك في الواقع بسبب الخطر المحتمل الناتج عن الحركات الشاقولية الغير متوقعة للمنشآت المستندة على هذه الأنواع من الترب .

يتحكم بسلوك انتفاخ التربة الانتفاخية عوامل عديدة أهمها تغير الرطوبة وكمية ونوع الحبيبات الغضارية في التربة , نوع التربة طبيعية أو ردمية , الكثافة الجافة للتربة , مقدار الضغط المطبق , كمية المواد غير الانتفاخية كالبحص و الرمل.

تسبب الترب الغضارية الانتفاخية أضرار شديدة على المنشآت الهندسية، وقد قدر الباحثان (Jones and Holtz - 1973 ) كلفة الأضرار السنوية الناتجة عن التربة الانتفاخية في الولايات المتحدة بحوالي / 3.2 / مليار $ , وهذا يفوق مرتين الأضرار التي تسببت بها الفيضانات والأعاصير والعواصف الموسمية والهزات الأرضية مجتمعة . تشير التقديرات الحديثة أن تكاليف تلك الأضرار على المنشآت المختلفة ( أبنية , طرق , مطارات , أنابيب وخطوط ,.. ) قد تصل إلى حوالي / 9 / مليار $ .

**شكل رقم (23) الأضرار التي تسببها الترب الغضارية الانتفاخيةعلى الأبنية ( منطقة الصنمين بدرعا )**

**شكل رقم (24) الأضرار التي تسببها الترب الغضارية الانتفاخيةعلى الأبنية ( منطقة الصنمين بدرعا)**

في التطبيق العملي فان الطريقة الأكثر شيوعاً واستخداماً للتعامل مع التربة الغضارية الانتفاخية تكون باستبدال هذه الأنواع من الترب في الموقع بتربة محسنة غير انتفاخية ، وتعتمد جدوى هذه الطريقة على جيولوجية ومعطيات الحالة المدروسة ، فمن أجل حالات تحتاج إلى استبدال كميات كبيرة من التربة فإن ذلك يكون عادة مكلف وغير مجدي اقتصادياً.

إن المجموعات الأكثر أهمية من المنرالات الغضارية هي المونتموريللونيت ,الإليت , الكاؤولنيت و هي عبارة عن سيليكات الالمنيوم المميهة ذات البنية البلورية . إن المونتموريللونيت هو المنرال الذي يمثل معظم مشاكل التربة الانتفاخية وهو ينتج عادة من عوامل الحت الجوية للصخور.

إن امتصاص التربة الغضارية للماء يؤدي الى انتفاخها ويعتمد مقدار الانتفاخ الحاصل على نوع وكمية المنرالات الغضارية الموجودة فيها وعلى التبادل الأيوني ومحتوى التربة من المواد الناقلة للكهرباء والبنية الداخلية للتربة .

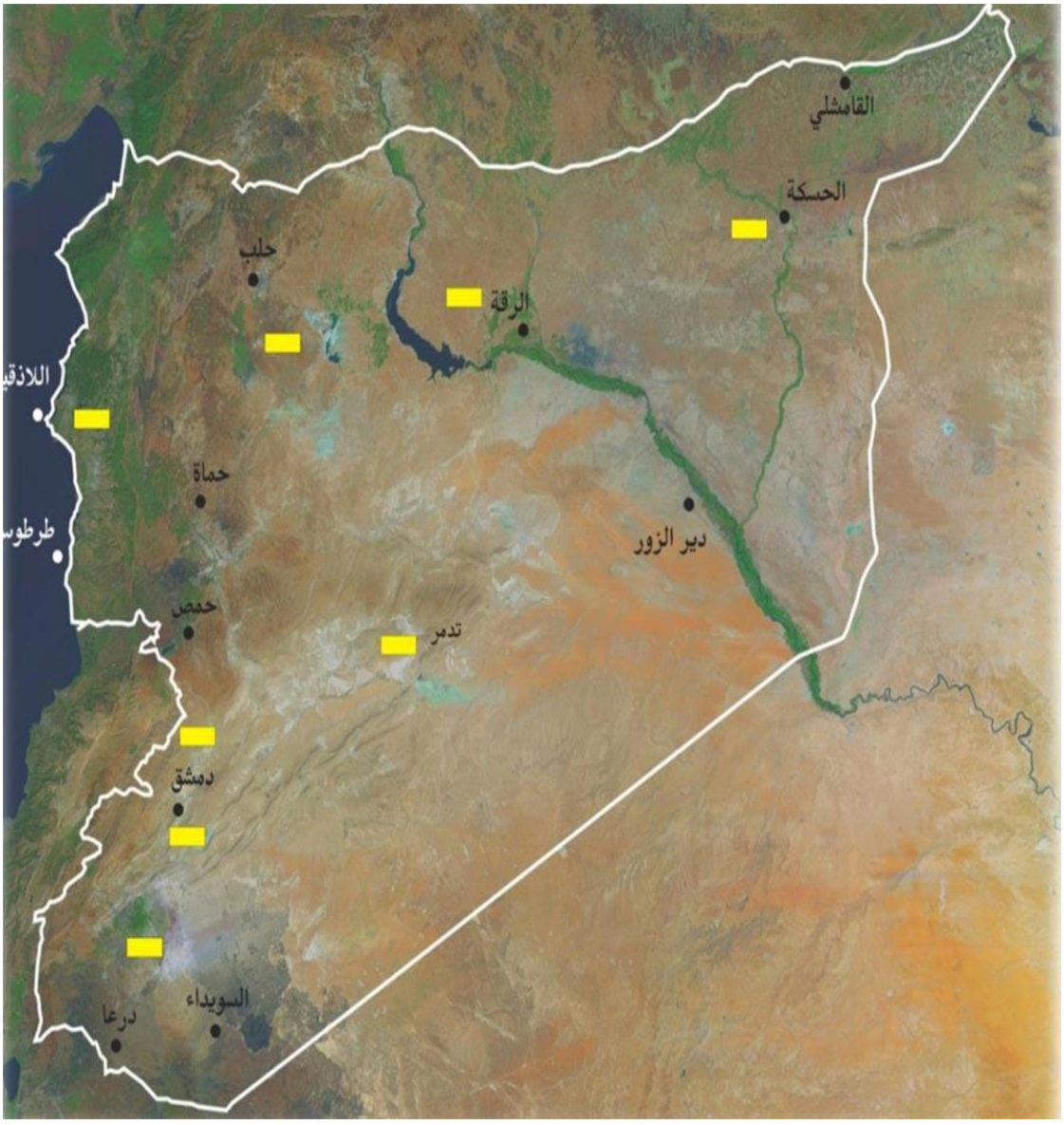
## 2-3-2 وجود الترب الغضارية في سوريا :

بحسب بيانات المؤسسة العامة للجيولوجيا التابعة لوزارة النفط في الجمهورية العربية السورية , فان الترب الغضارية تنتشر في مناطق عديدة في أراضي سوريا ضمن مستويات جيولوجية مختلفة

وتتوزع أنواعها جيولوجياً وجغرافيا في السلسلة التدمرية الجنوبية ، الزبداني ، الزبيدة ، المحطة الرابعة في شمال حوض الدو ، منطقة وادي الزكارة ( تدمر ) .

تعتبر التوضعات الغضارية في القطر خامات رسوبية ومتبقية , ذات أهمية اقتصادية وصناعية , نظراً لكونها تستخدم لأغراض صناعية مختلفة , كما في صناعة السيراميك والبورسلان والأدوات الصحية , وصناعة الآجر والقرميد , وكذلك في صناعة سوائل الحفر , و صناعة الإسمنت ... تتألف الصخور الغضارية من مجموعة فلزات غضارية ( كاؤلينيت ، مونتوريللونيت ، إيليت ) مشوبة بالكلس أو الدولوميت أو الرمل الكوارتزي أو الفلدسبار والجص أحياناً.

يوضح الشكل رقم (25) أدناه أماكن تواجد الترب الغضارية في سوريا




**شكل رقم ( 25 ) أماكن تواجد الترب الغضارية في سوريا – المؤسسة العامة للجيولوجيا**

## 2-3-3 بارامترات الانتفاخ :

### 2-3-3-1 طاقة الانتفاخ Swelling Potential :

يوجد تعاريف متنوعة لطاقة الانتفاخ , ومن التعاريف الكثيرة الاستخدام التعريف الذي قدمه (Seed et al - 1962) و التعريف الذي قدمه (Chen 1975) , في عام 1962 عرف Seed طاقة الانتفاخ على أنها النسبة المئوية لانتفاخ عينات من التربة محصورة جانبيا ومغمورة بالماء تحت ضغط قدره واحد (PSI) وذلك بعد أن يتم رص التربة إلى الكثافة العظمى الموافقة للرطوبة المثالية وفقا لمواصفة نظامAASHO لاختبار تجربة الرص , إن هذا التعريف يتطلب الانتباه إلى شروط الموقع مثل ضغط التحميل المطبق والرطوبة الأولية وشروط حصر العينة وكثافتها.

في عام 1984 قدم Snethen تعريفاً لطاقة الانتفاخ يختلف عن معظم التعاريف السابقة و يراعي معظم الشروط الحقلية في الموقع , وينص هذا التعريف على أن طاقة الانتفاخ هي التغير الشاقولي في حجم التربة من اختبار الادومتر (أي وفق شروط الحصر الجانبي للعينة) و يعبر عن طاقة الانتفاخ كنسبة مئوية من الارتفاع الأساسي لعينة التربة السليمة غير المخربة من وضع رطوبتها و كثافتها الطبيعية إلى حالة الإشباع تحت حمل مطبق يعادل الضغط المطبق على التربة في الموقع .

من المهم أن يتم تصنيف التربة الانتفاخية وفقاً لطاقة انتفاخها , والأسلوب الأكثر استخداماً في هذا المجال أن يتم تصنيف التربة إلى( منخفضة جداً , منخفضة, متوسطة , عالية , عالية جداً).

**فيما يلي أهم الطرق المستخدمة لتصنيف الترب الانتفاخية من حيث طاقة الانتفاخ**

**A- طريقة القرائن للمواصفات** (Index Properties) :

يتم استخدام قرائن المواصفات لتصنيف التربة الغضارية من حيث قابلية انتفاخها ويوضح الجدول رقم ( 4 ) أدناه قائمة بمواصفات التربة مقابل طاقة الانتفاخ .

**TABLE 9.1** Typical Soil Properties versus Expansion Potential

| Expansion potential | Very low | Low | Medium or moderate | High | Very high or critical |
|---|---|---|---|---|---|
| Clay content (<2 μm) | 0–10% | 10–15% | 15–25% | 25–35% | 35–100% |
| Plasticity index (see note) | 0–10 | 10–15 | 15–25 | 25–35 | >35 |
| Expansion index test | 0–20 | 21–50 | 51–90 | 91–130 | >130 |
| HUD criteria (% swell at $\sigma_v$ = 0 psf) | — | 0–10 | 10–20 | 20–30 | >30 |
| HUD criteria (% swell at $\sigma_v$ = 60 psf) | — | 0–4 | 4–8 | 8–12 | >12 |
| HUD criteria (% swell at $\sigma_v$ = 144 psf) | — | 0–2 | 2–6 | 6–10 | >10 |
| HUD criteria (% swell at $\sigma_v$ = 650 psf) | — | 0–0.5 | 0.5–1.5 | 1.5–3.5 | >3.5 |

**جدول رقم (4 ) مواصفات التربة مقابل طاقة الانتفاخ**

إن التوجهات الأكثر استخداماً لتحديد طاقة انتفاخ التربة تعتمد على محتوى التربة من الغضار و على قرينة اللدونة.

**A-1 محتوى التربة من الغضار :**

يعرف محتوى التربة من الغضار على أنه النسبة المئوية من حبيبات التربة الأنعم من 0.002 mm أي بمعنى آخر هي نسبة حبيبات الغضار في التربة ويتم تحديدها من التحليل الحبي للتربة , ثم يستخدم الجدول رقم (4) أعلاه لتحديد طاقة انتفاخ التربة بناء على محتواها من الغضار.

**A-2 قرينة اللدونة :**

تعرف قرينة اللدونة على أنها الفرق بين حد السيولة وحد اللدونة , ووفقاً ل ASTM فإن كلاً من حد السيولة و حد اللدونة يتم إجراؤهما على التربة المارة من المهزة رقم (40) . الا انه عند استخدام الجدول رقم (4 ) لتصنيف طاقة انتفاخ التربة فان قرينة اللدونة الواردة بالجدول هي قرينة اللدونة لكامل عينة التربة و ليس فقط للجزء من العينة المار من المهزة رقم ( 40) .

يمكن الاعتماد على قرينة اللدونة لتصنيف طاقة انتفاخ التربة وهي أكثر موثوقية لهذا الغرض من محتوى التربة من الغضار.

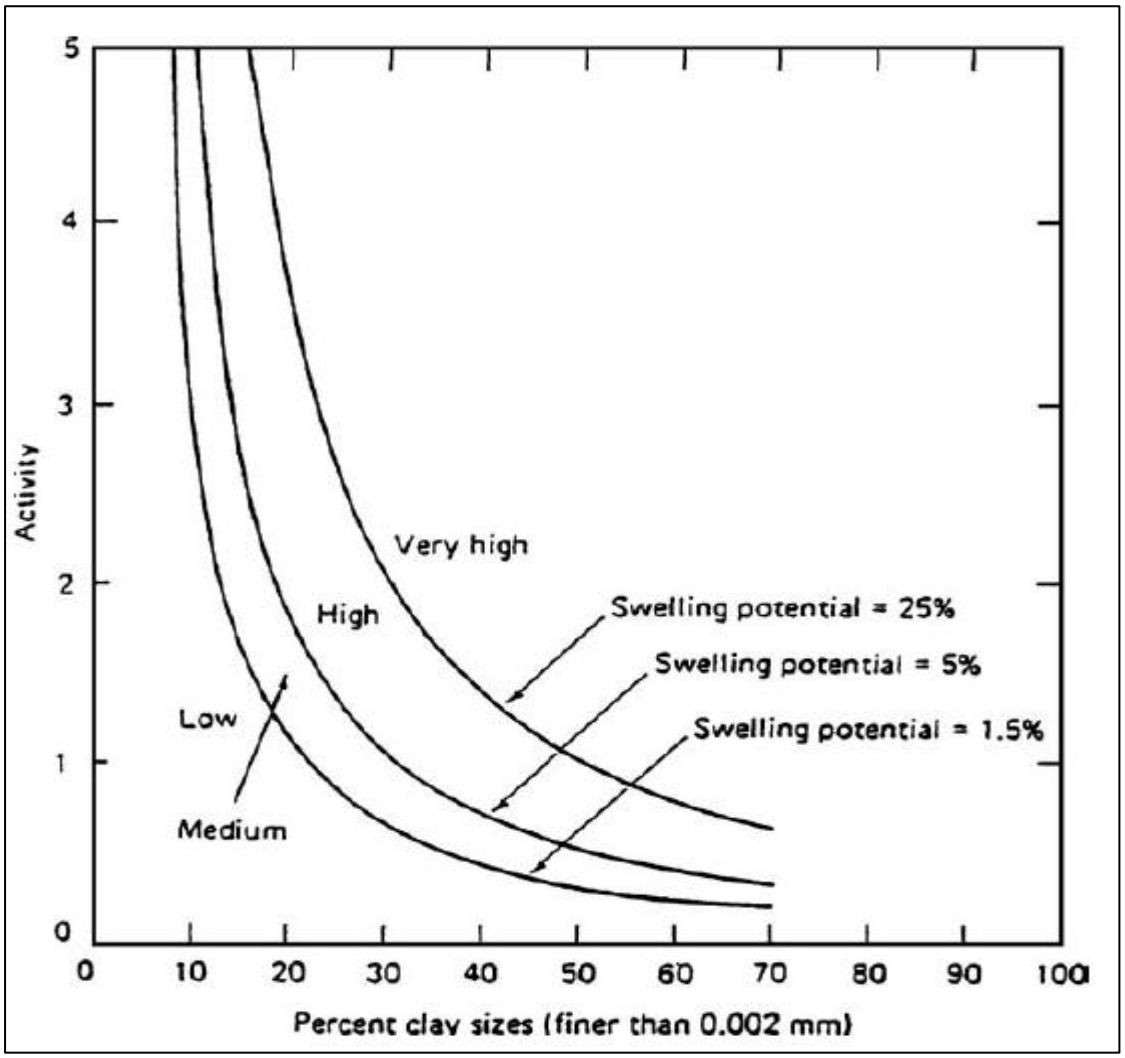
## B- طريقة مخططات تصنيف التربة( Expansive Soil Classification ) :

يمكن تقدير طاقة انتفاخ التربة من مخططات تصنيف التربة الغضارية و أهم هذه المخططات هي

### B–1 مخطط ( Seed et al 1962):

لقد طور هذا الباحث مخططاً لتصنيف طاقة انتفاخ التربة الانتفاخية بالاعتماد على فاعلية التربة (Activity ) و قياس حبيبات الغضار ( Clay Size Particles ) كما هو واضح من الشكل رقم ( 26 ) . حيث يمثل المحور الشاقولي الفعالية أو النشاط ( Activity ) بينما يمثل المحور الأفقي نسبة حبيبات الغضار ( Clay Size Particles ) الأصغر من 0.002mm.

وتعطى الفعالية أو النشاط لحبيبات التربة الغضارية وفق المعادلة $A = \frac{PI}{ClayFraction}$

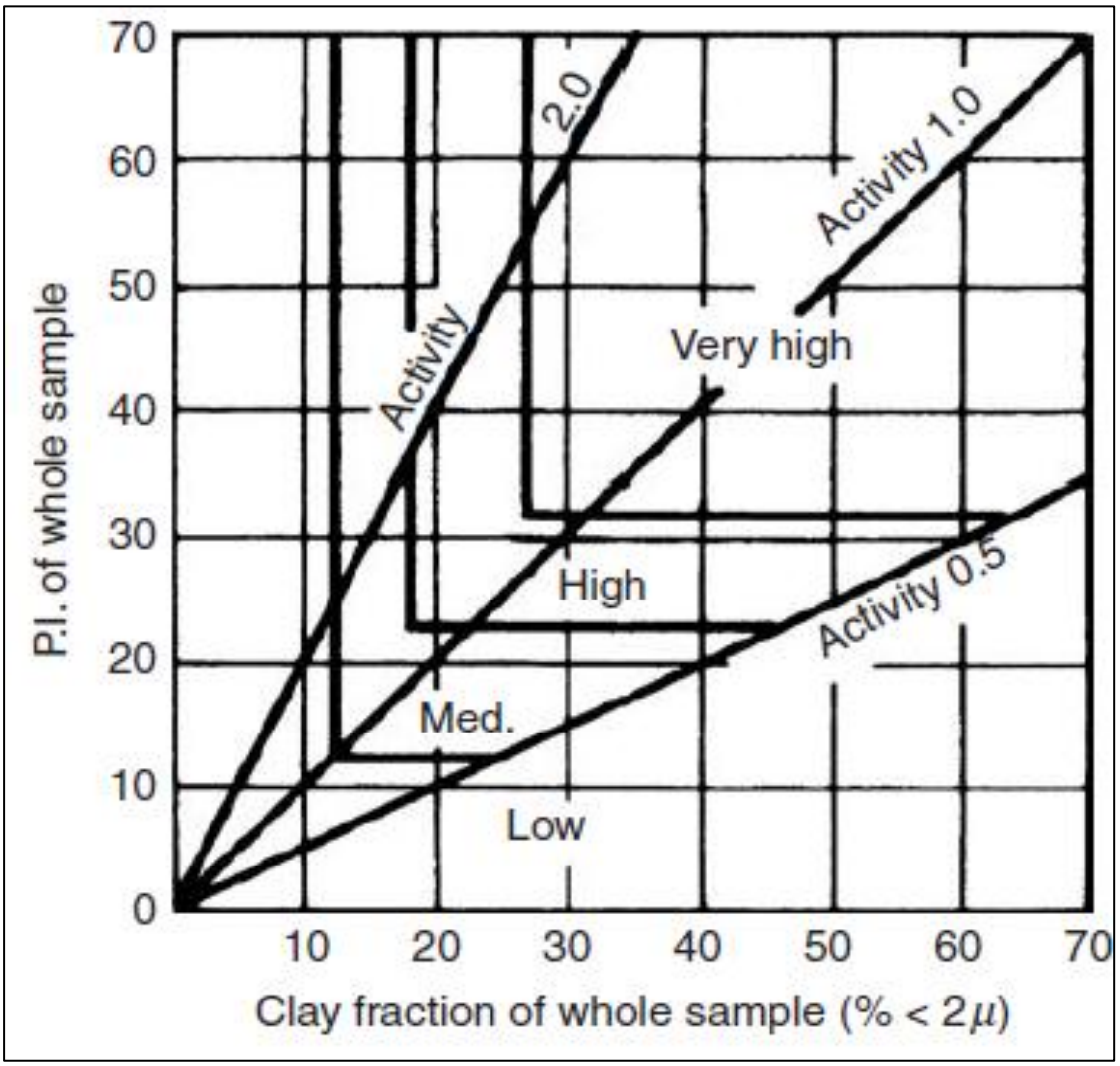



**شكل رقم ( 26 ) مخطط تصنيف التربة وفق طاقة الانتفاخ**

### 2-B مخطط (Vander Merwe ) 1964:

ويمثل هذا المخطط شكلاً آخر من مخططات تصنيف التربة الغضارية ويتطلب استخدامه توفر عاملين من العوامل الثلاثة التالية ( قرينة اللدونة , النسبة المئوية للغضار في كامل العينة , الفاعلية أو النشاط للحبيبات الغضارية .)

يمثل الشكل رقم ( 27 ) الموضح أدناه مخطط 1964Vander Merwe حيث يمثل المحور الأفقي نسبة الغضار من كامل عينة التربة , بينما يمثل المحور الشاقولي قرينة اللدونة للتربة.




**شكل رقم (27 ) مخطط (Vander Merwe - 1964 ) لتصنيف التربة وفق طاقة الانتفاخ**

### 2-3-3-2 ضغط الانتفاخ (Swelling Pressure) :

يعرف ضغط الانتفاخ على أنه الضغط المطلوب للحفاظ على الحجم الأولي لعينة التربة عند تعريضها إلى زيادة في الرطوبة أي بمعنى آخر هو الحمل الذي تصبح عنده نسبة المسامية مساوية إلى نسبة المسامية الأولية .

## العوامل التي تؤثر على انتفاخ التربة:

إن آلية انتفاخ التربة الغضارية معقدة و تتأثر بعدة عوامل , حيث أن الانتفاخ هو التغير في المسافة بين الحبيبات وينتج عن تغيرات في نظام المياه في التربة مما يخل بتوازن الإجهادات الداخلية فيها, وتصنف العوامل المؤثرة على طاقة انتفاخ التربة في المجموعتين التاليتين :

أ- خواص التربة التي تؤثر على سلوك الانتفاخ (التركيب المنرالي للتربة , الخصائص الكيميائية للتربة , امتصاص التربة للماء , لدونة التربة , بنية و نسيج التربة , كثافة التربة , طريقة و مقدار الرص المسبق الذي تعرضت له التربة )

**ب**- العوامل البيئية و حالة الإجهادات التي تؤثر على سلوك انتفاخ التربة ( رطوبة التربة , تغيرات الطقس و تغيرات الرطوبة , نفاذية التربة , درجات الحرارة , حالة الإجهادات في التربة , شروط الموقع والأحمال المطبقة , الوضع الجيولوجي وتوضع طبقات التربة ) .

ان العوامل السابقة إضافة الى نوع التربة نفسها تمثل أهم العوامل التي تؤثر على سلوك انتفاخ التربة.

- تأثير نوع منرالات الغضار:

إن التركيب المنرالي ونسبة الغضار يشكلان عوامل أساسية تحكم الخواص الانتفاخية للترب الغضارية الانتفاخية, و تحديد التركيب المنرالي للتربة يحتاج الى جهاز اختبار معقد نسبياً و إجراءات اختبار دقيقة و مفصلة و التي عادة لا تكون متاحة للأهداف و الإجراءات العملية .

إن المنرالات الغضارية من أنواع مختلفة تظهر طاقات انتفاخ مختلفة بسبب التنوع في الحقل الكهربائي المترافق مع كل منرال , وإن طاقة الانتفاخ الكلي للتربة تعتمد على ( كمية ونوع المنرالات الغضارية في التربة , ترتيب مناطق السطوح النوعية للذرات الغضارية , الطبيعة الكيميائية للتربة و الماء) , تصنف المنرالات الغضارية بحسب خواصها الانتفاخية إلى ثلاث مجموعات رئيسية وهي :

**1**- مجموعة الكاؤولينيت ( kaolinite Group ) وتكون عادة غير انتفاخية .

**2**- مجموعة (Mica-Like Group) وتتضمن الإليت Illites و الفيرميكيوليت ( Vermiculites ) ويمكن أن تكون انتفاخية و لكنها لا تسبب عادة مشاكل كبيرة.

**3**- مجموعة السمكتيت (Smectite Group) وتتضمن المونتموريللونيت Montmorillonites وهي منرالات انتفاخية بشكل كبير وتمثل أخطر المنرالات الغضارية وأكثرها تسبباً بالأضرار على المنشآت.

بحسب (Lamb and Whitman 1969 ) فإن طاقة انتفاخ المنرالات الغضارية تختلف باختلاف نوع المنرال , و تتناقص وفق الترتيب التالي (مونتموريللونيت , ايلليت , اتابيولغيت , الكاؤولينيت ) ( Montmorillonite , Illite , Attapulgite , Kaolinite ) , و تعتمد بشكل كبير على التبادل الأيوني .

- تأثير محتوى التربة من الغضار (نسبة الغضار):

قام الباحثان EL-Sobhy and Rabba عام 1981 بدراسة تأثير محتوى التربة من الغضار على سلوك الانتفاخ و ضغط الانتفاخ, حيث تم مزج نسب مختلفة من الغضار مع كل من الرمل والسيلت , وقد بينت النتائج التجريبية أن قيمة ضغط الانتفاخ تزيد مع زيادة نسبة الغضار.

- تأثير الرطوبة الأولية:

قام الباحثان EL-Sobhy and Rabba عام 1981 بدراسة تأثير الرطوبة الأولية على طاقة الانتفاخ و ضغط الانتفاخ , حيث تم تحضير عينات مشكلة لها نفس الكثافة الجافة و برطوبات أولية مختلفة , و قد تبين أن هناك علاقة عكسية بين الانتفاخ النسبي و ضغط الانتفاخ مع الرطوبة الأولية لعينة التربة.

- تأثير الكثافة الجافة للتربة:

قام الباحثان EL-Sobhy and Rabba عام 1981 بإجراء تجربة أدومتر لدراسة تأثير الكثافة الجافة الأولية على سلوك الانتفاخ و ضغط الانتفاخ للتربة , وتبين أنه كلما زادت الكثافة الجافة الأولية للتربة يزيد ضغط الانتفاخ و الانتفاخ النسبي .

## 2-3-4 تحديد وتصنيف الترب الانتفاخية:

إن تحديد وتصنيف التربة الانتفاخية وفقاً لسلوك انتفاخها المتوقع يعتبر أمراً أساسياً لتصميم المنشآت في المواقع التي يشتبه بتواجد هذا النوع من الترب فيها , وهو ما يمثل الأولوية الأولى بالنسبة لمهندس الجيوتكنيك .

### 2-3-4-1 تحديد الترب الانتفاخية :

ويتم تحديد الترب الانتفاخية بطرق مباشرة وغير مباشرة وفق التالي:

أ- الطرق المباشرة :

بحسب (Chen1975) فان الطرق المباشرة لتحديد الترب الانتفاخية تتضمن التحديد الكمي للمنرالات الداخلة في تركيب التربة عبر تجارب مخبرية , وتتطلب هذه الطرق تجهيزات خاصة

لا تكون عادة مناسبة لإجراء تحديد سريع وعملي للتربة. فيما يلي أهم التجارب المخبرية التي تستخدم لتحديد الترب الانتفاخية :

- تجربة الأدومتر أو الانتفاخ الحر Improved Swell Oedometer or Free Swell
- تجربة الانتفاخ بحالة الحجم الثابت Constant Volume Swell Test
- تجربة الانتفاخ مع تطبيق أحمال Overburden Swell Test
- تجربة امتصاص التربة للماء Soil Suction Test
- تجربة مقياس ( PVC ) .

**ب**- الطرق غير المباشرة :

وتعتمد على الخبرة و على مؤشرات بسيطة تستعمل لتحديد الترب الانتفاخية باستخدام علاقات تجريبية و أهم هذه المؤشرات هي ( حدود اتربرغ , محتوى التربة من المواد الغضارية , الرطوبة الأولية , كثافة التربة , حد الانكماش ) , ويمكن اجراء هذه التجارب بأجهزة بسيطة بما يمكن من تحديد سريع وموثوق للترب الانتفاخية .

**2-3-4-2 تصنيف الترب الانتفاخية :** وتستخدم لذلك عدة طرق فيما يلي أهمها :

- طريقة مكتب استصلاح الأراضي في الولايات المتحدة الأمريكية :

United States Bureau of Reclamation **(USBR)** وتعتمد على ( النسبة الوزنية للمواد الغروية الأصغر من (2) µm من وزن التربة الإجمالي , قرينة اللدونة , حد الانكماش , قيم الانتفاخ النسبي ) وهذه الطريقة موضحة بالجدول رقم (5) أدناه .

| Data from index tests* | | | Probable expansion, percent total vol.change | Degree of expansion |
|---|---|---|---|---|
| Colloid content, percent minüs 0.001 mm | Plasticity Index | Shrinkage limit | | |
| >28 | >35 | <11 | >30 | Very high |
| 20-13 | 25-41 | 7-12 | 20-30 | High |
| 13-23 | 15-28 | 10-16 | 10-30 | Medium |
| >15 | <18 | >15 | <10 | Low |

**جدول رقم ( 5 ) طريقة تصنيف التربة حسب ( USBR)**

- طريقة محطة التجارب الطرق المائية الهندسية الأمريكية.

(**USAEWES**)United States Army Engineer Waterways Experiment Station

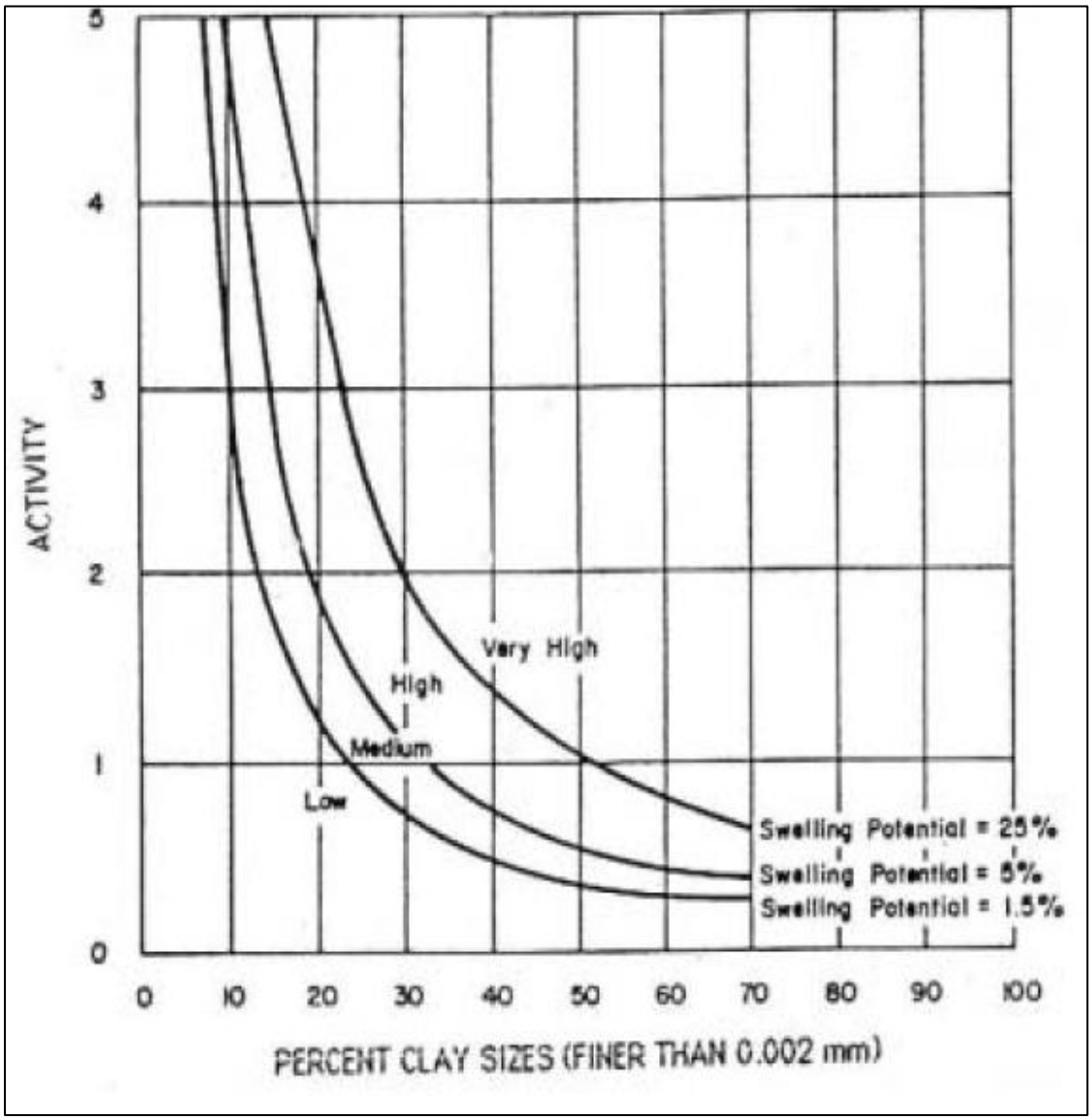
وتعتمد على ( حد السيولة , قرينة اللدونة , امتصاص التربة للماء في الموقع , قيم الانتفاخ النسبي ) و هذه الطريقة موضحة بالجدول رقم (6 ) أدناه .

| LL (%) | $I_p$ (%) | $\gamma_{initial}$ (Tons/sq.ft) | Potential swell (% swell) | Potential swell classification |
|---|---|---|---|---|
| < 50 | < 25 | < 1.5 | < 0.5 | LOW |
| 50-60 | 25-35 | 1.5-4.0 | 0.5-1.5 | MARGINAL |
| > 60 | > 35 | > 4.0 | > 1.5 | HIGH |

**جدول رقم ( 6 ) طريقة تصنيف التربة حسب (USAEWES )**

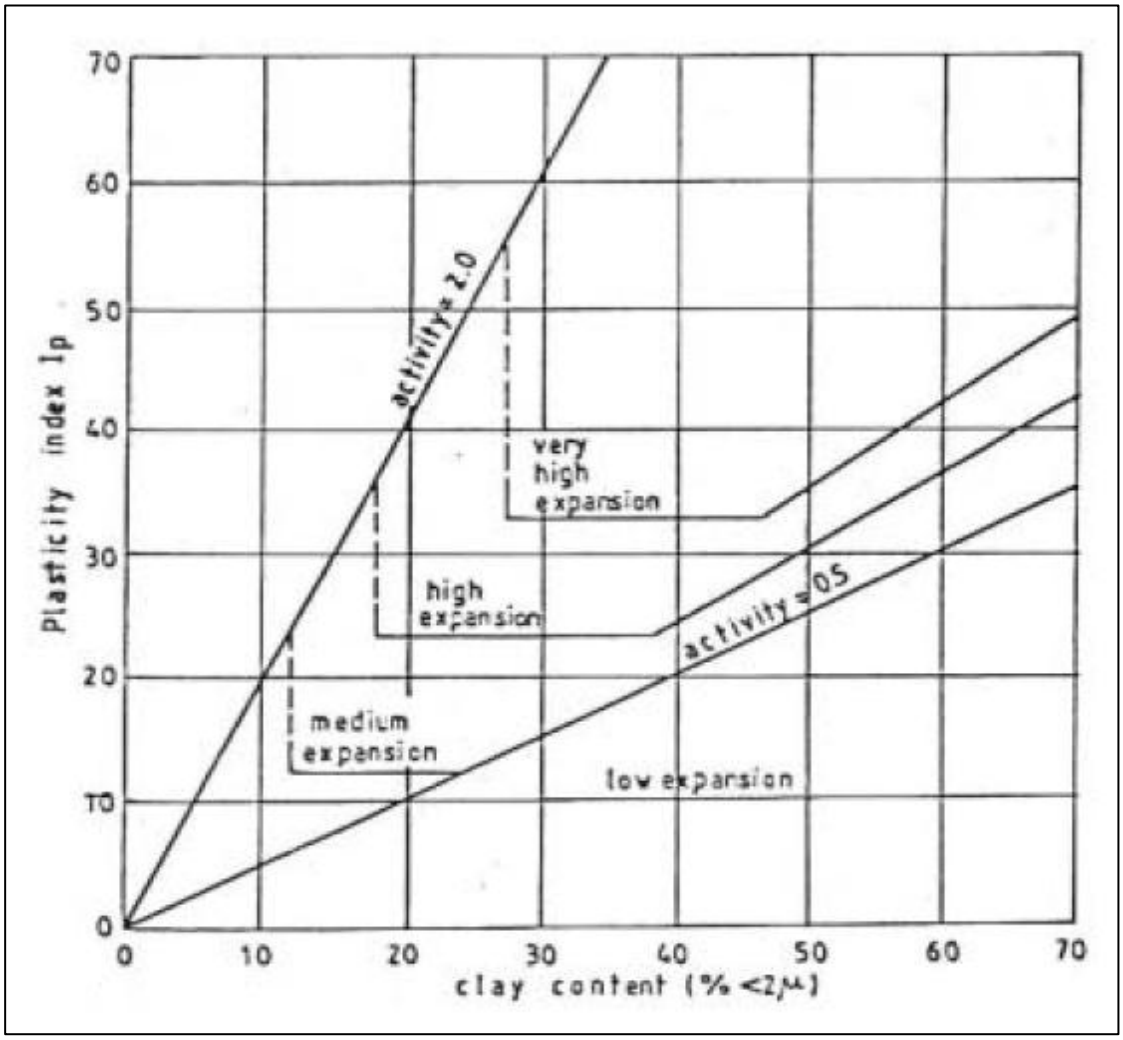
- طريقة تصنيف التربة بالاعتماد على النشاط ( الفاعلية ) Activity :

إن هذه الطريقة في تصنيف التربة و المقترحة من قبل SeedLundgen , Woodward في عام 1956 تعتمد على تربة محضرة أعيد تشكيلها مخبرياً ويجري اختبارها وفق نظام AASHO لاختبار الرص تحت حمل مطبق قدره (1 ) Psi . وتعرف الفاعلية أو النشاط للتربة المحضرة مخبرياً وفق المعادلة التالية $Activity = IP/C$ % , حيث أن ( C ) تمثل النسبة المئوية للغضار في العينة و التي يكون قياس حباتها أقل من ( 2 ) µm , و يوضح الشكل رقم (28) أدناه طريق تصنيف التربة وفق نظام (USAEWES) .




**شكل رقم ( 28) مخطط طاقة انتفاخ التربة وفقاً ( Seed , Woodward , Lundgren 1956 )**

كما اقترح (Popescu) عام 1986 طريقة أخرى لتقدير طاقة انتفاخ التربة الغضارية بالاعتماد على نسبة الغضار في العينة و على قرينة اللدونة وذلك وفق الشكل رقم ( 29 ) المبين أدناه.




**شكل رقم ( 29) تحديد و تقدير مقدار طاقة انتفاخ التربة بحسب ( Popescu , 1956)**

## 2-3-4-3 تحديد بارامترات انتفاخ التربة الغضارية:

تدعى كلا من طاقة الانتفاخ وضغط الانتفاخ ببارامترات الانتفاخ ويمكن قياسها عبر تجارب مخبرية متنوعة أو بواسطة علاقات تجريبية تستخدم قيم تقديرية لهذه البارومترات .

### قياس بارامترات الانتفاخ باستخدام تجارب الأدومتر.

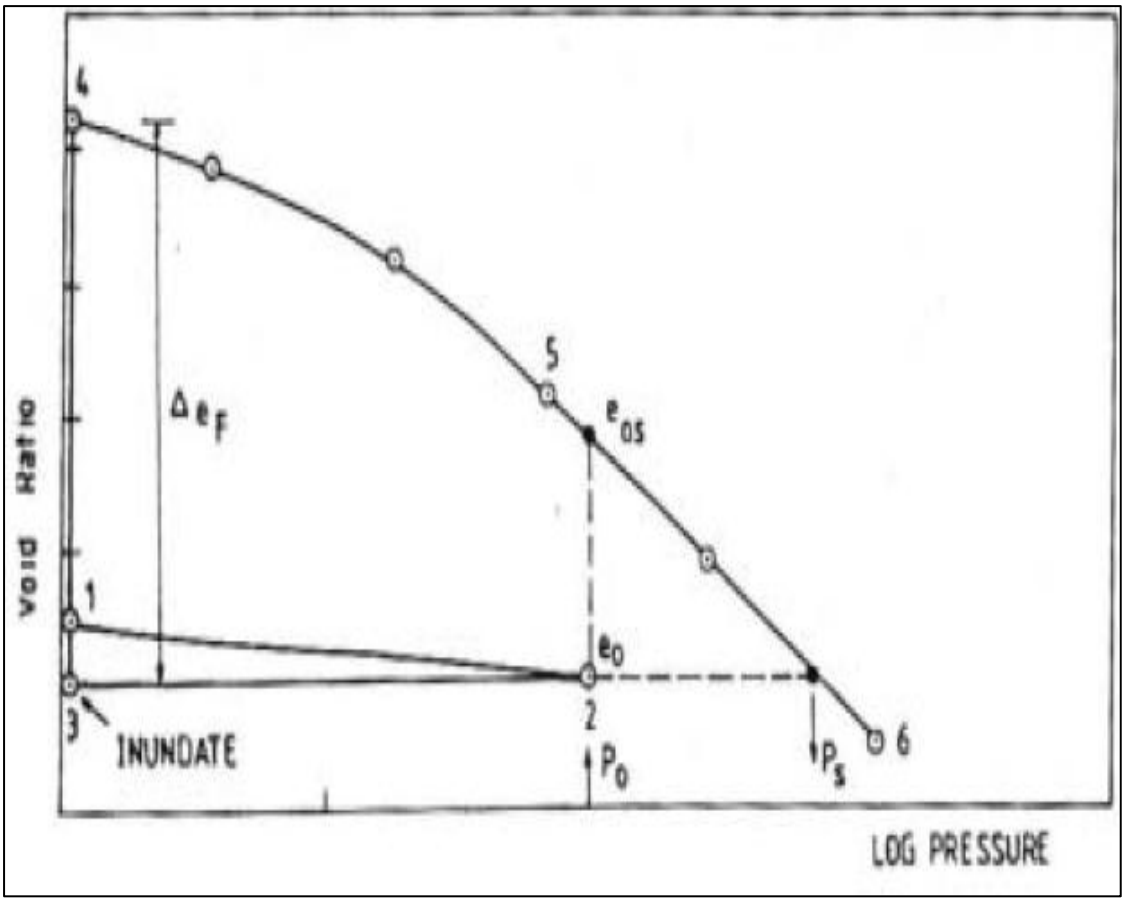
يمكن اجراء عدد من تجارب الأدومتر في المخبر للحصول على سلوك انتفاخ التربة وقياس بارمتراته ، وتستخدم عادة في هذه الاختبارات عينة سليمة غير مخربة للحصول على قيم موثوقة كون العينات السليمة تعكس حالة التربة الحقيقية و شروط الموقع , إلا أن بعض شروط الموقع التي لا يمكن محاكاتها في المخبر بشكل جيد ونذكر منها على سبيل المثال ( الحصر الجانبي للتربة , وجود الماء في التربة , شروط تصريف الماء من الموقع ) .

**أهم التجارب المستخدمة لقياس بارمترات الانتفاخ :**

- **تجربة الأدومتر المطورة وتسمى أيضا تجربة الانتفاخ الحر:**

( ISO Test ) Improved Swell Oedometer or Free Swell Test

يتم تطبيق حمل ( ضغط ) على عينات التربة وهي جافة لمدة ساعة لكي تتوازن العينة , تغمر بعد ذلك عينة التربة بالماء و يسمح لها أن تنتفخ بحرية تحت ضغط قدره ( 7) kpa حتى يكتمل الانتفاخ الأساسي . بعد ذلك يتم تحميل العينة حتى تعود العينة الى حجمها الأولي ونحصل على المسامية الأولية. إن ضغط الانتفاخ يساوي الضغط اللازم تطبيقه لتعود العينة إلى ارتفاعها الأولي ( الحجم الأولي قبل الانتفاخ ) , ثم تزال الحمولة تدريجياً عن العينة لنحصل على مواصفات الانضغاط . الشكل رقم ( 30) أدناه يوضح هذه التجربة وفقاً ل ( Erol 1987 ) .

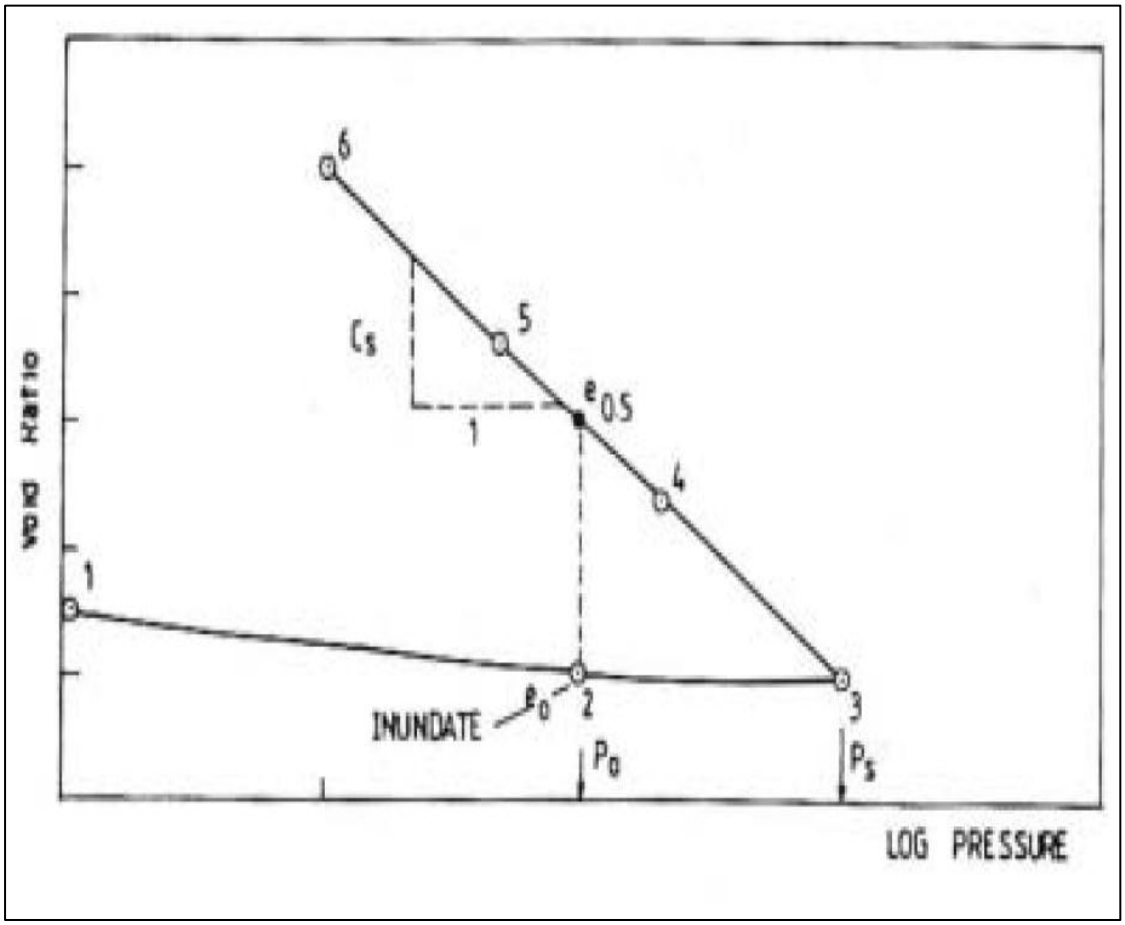



**شكل رقم ( 30 ) منحني تجربة الانتفاخ الحر ( , EROL 1987 ) ISO Test**

- **تجربة الانتفاخ مع ثبات الحجم** Constant Volume Swell Test **( CVS Test )**

في هذه التجربة, توضع عينة التربة في حلقة الأدومتر وتغمر بالماء , هذا يؤدي إلى تشوه التربة و انتفاخها شاقولياً , ولكن هذا الانتفاخ يتم منعه بتطبيق ضغط شاقولي متزايد تدريجياً , بهدف الوصول إلى حمل يحقق التوازن بحيث يمنع انتفاخ عينة التربة و لا يؤدي لانضغاطها و يحافظ

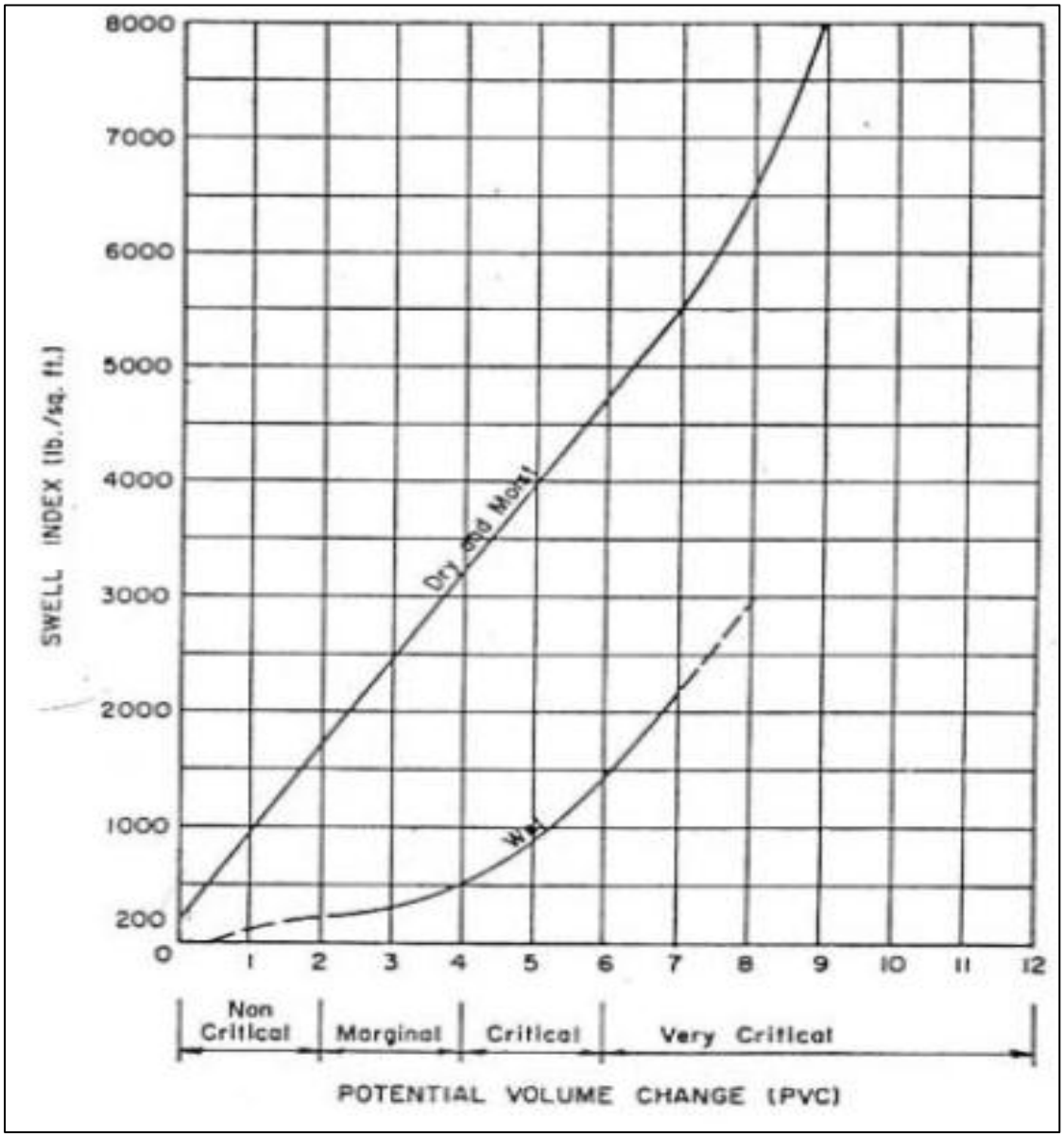
على العينة بحجمها الأولي . تستمر هذه التجربة حتى الوصول إلى حالة لا يسجل فيها أي انتفاخ ، الضغط الذي يحقق حالة التوازن عند اكتمال إشباع العينات يمثل قياس مباشر لضغط الانتفاخ . بعد هذه المرحلة يتم رفع الحمولة ( الضغط المطبق ) بشكل تدريجي للحصول على مواصفات إعادة وضع العينة إلى وضعها الطبيعي . الشكل رقم (31 ) أدناه يوضح طريقة CVS




**شكل رقم ( 31 ) منحني تجربة الانتفاخ الحر وفقاً ل (EROL 1987 )**

- **طريقة قياس طاقة الانتفاخ** Potential Volume Change **(PVC)** .

تم تطوير هذه الطريقة لقياس طاقة الانتفاخ من قبل ( T.W Lamb ) عام 1960 في الولايات المتحدة الأمريكية , حيث تستخدم عينات تربة معاد تشكيلها مخبرياً و يتم رصها في حلقة الأدومتر الثابتة تحت ضغط قدره ( 55.000 ft–ibs. Per cu.ft ) , ثم يطبق عليها ضغط أولي بقيمة (2) PSI و تغمر العينة بالماء , يقيد الانتفاخ الشاقولي للعينة بواسطة حلقة ثابتة , وتؤخذ قراءة الحلقة كل ساعتين , تحول القراءة المأخوذة من الحلقة الثابتة إلى ضغط يسمى قرينة الانتفاخ , ويستخدم الشكل رقم ( 32 ) لتحويلها إلى قيمة تغير حجم عينة التربة.

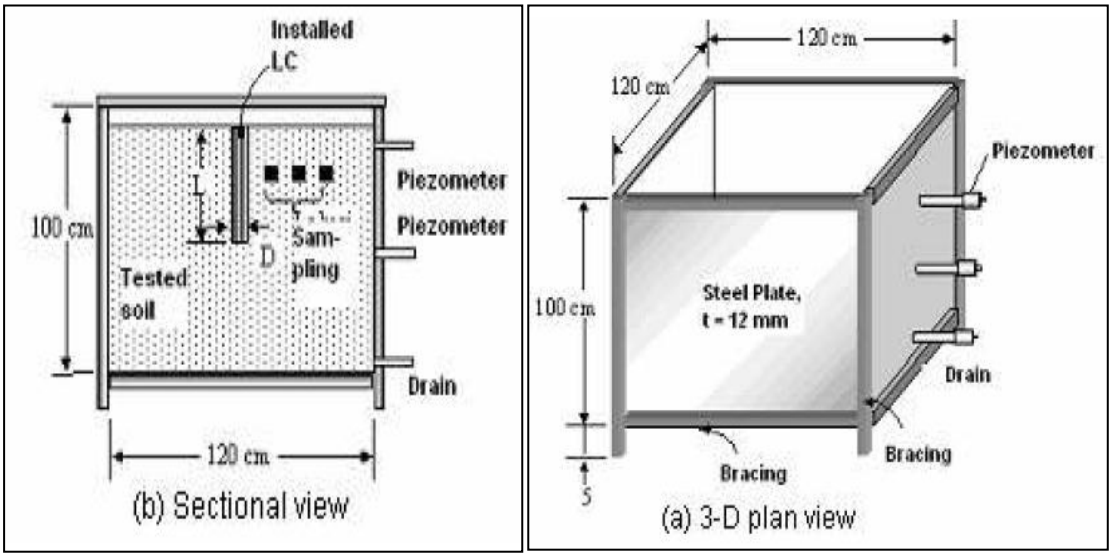



**شكل رقم (32) قرينة الانتفاخ مقابل تغير حجم التربة .**
**FHA Soil PVC Meter Publication,**
**Federal Housing Administration Publication no .701, 1960**

## 2- 4 الدراسات السابقة:

- MUNTOHAR.A.S and LIAO.H.J, Taiwan " Strength Distribution of Soft Clay Surround Lime – Column " .

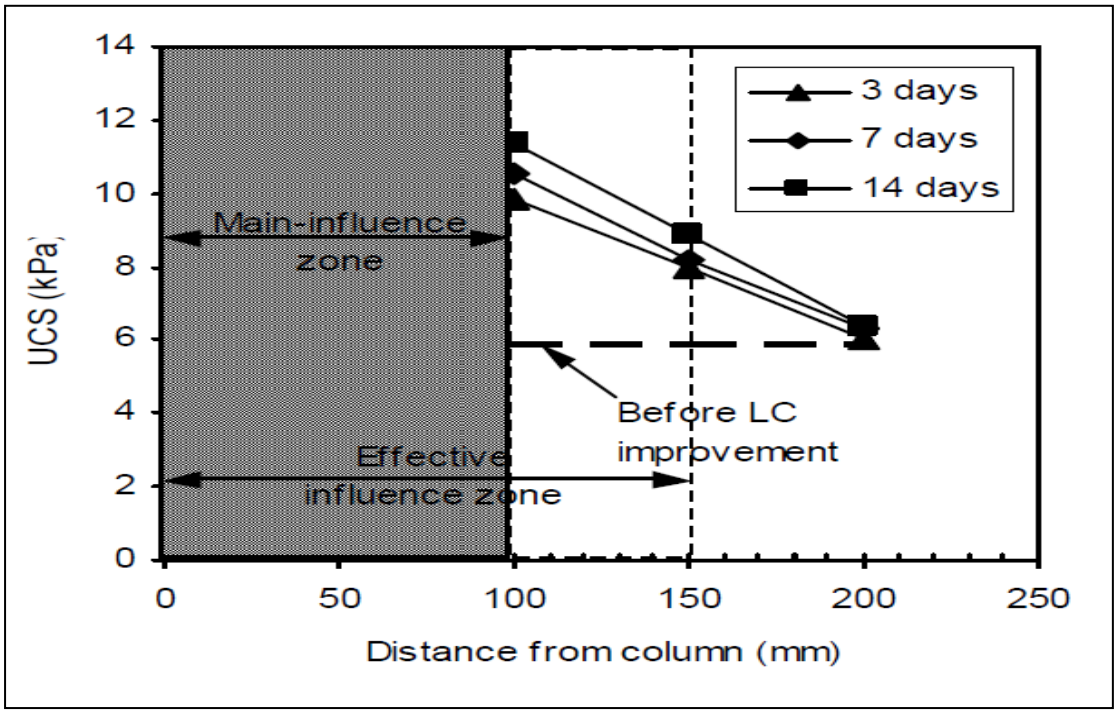
قام الباحث بتنفيذ البحث على نموذج مخبري لوتد كلسي بقطر (5) cm و عمق ( 20 ) cm منفذ في صندوق بطول (120) cm و عرض ( 120) cm و عمق ( 100) cm , و يهدف البحث بشكل أساسي إلى معرفة أثر أوتاد الكلس على متانة التربة على الضغط الغير محصور ومعرفة مدى انتشار هذا الأثر في التربة المحيطة حول الوتد الكلسي.




**شكل رقم ( 33 ) مخطط تنفيذ الوتد الكلسي في المخبر**

توصل الباحث إلى أن تقنية أوتاد الكلس تزيد من متانة التربة على الضغط غير المحصور, وتزيد هذه المتانة مع الزمن , وأكبر زيادة تكون بالقرب من الوتد الكلسي و تتناقص تدريجياً بالابتعاد عنه كما هو واضح من الشكل رقم ( 34) .

كما تبين أيضاً أن الكلس يمكن أن يهاجر بالتربة أفقياً حتى مسافة ( 4.D ) وشاقولياً حتى مسافة ( 8.D ) , لكن مسافة التأثير الأساسية الفعالة لانتشار ( هجرة ) الكلس هي (2.D ) أفقياً حول الوتد الكلسي و ( 4.D) شاقولياً تحت أسفل الوتد الكلسي حيث (D ) هو قطر الوتد الكلسي .




**شكل رقم ( 34 ) المتانة على الضغط غير المحصور حول الوتد الكلسي**

- Mehmet Tonoz and Candan Gokceoglu and Resat Ulusay . Ankara " Expansive *Soils* – Recent Advances in Characterization and Treatment " . London , UK (2006) [1].

أجرى الباحث تجاربه على نموذج مخبري لأعمدة كلسية بقطر (2–4.8) cm و عمق (25–28) cm منفذة في كتل ترابية غير مخربة كما هو مبين بالشكل رقم (35). يهدف البحث بشكل أساسي إلى معرفة أثر أوتاد الكلس على متانة التربة على الضغط الغير محصور وعلى خواص انتفاخ التربة , إضافة إلى معرفة مدى انتشار اثر الكلس حول الوتد الكلسي و تحته .

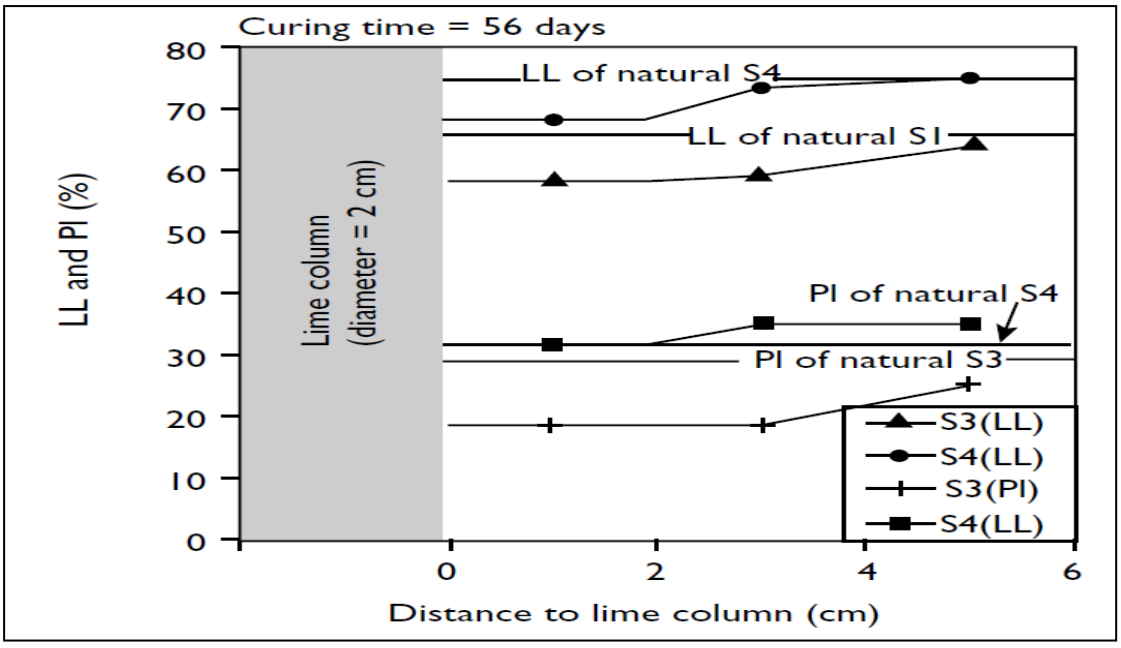
**شكل رقم ( 35 ) تنفيذ الأوتاد الكلسية المخبرية في عينة التربة غير المخربة**

توصل الباحث إلى أن تقنية أوتاد الكلس تحسن من مواصفات التربة حيث ينقص كل من حد السيولة و قرينة اللدونة وضغط الانتفاخ بالاقتراب من الوتد الكلسي كما هو واضح على الأشكال رقم ( 1–35) , ( 2–35 ) ويكون الانخفاض أعظم ما يمكن عند سطح الوتد الكلسي و ضمن مسافة 2.D ثم يتناقص أثر الكلس تدريجياً بالابتعاد عن الوتد الكلسي و يصل الانخفاض بضغط الانتفاخ عند محيط الوتد الكلسي إلى (40–75) %

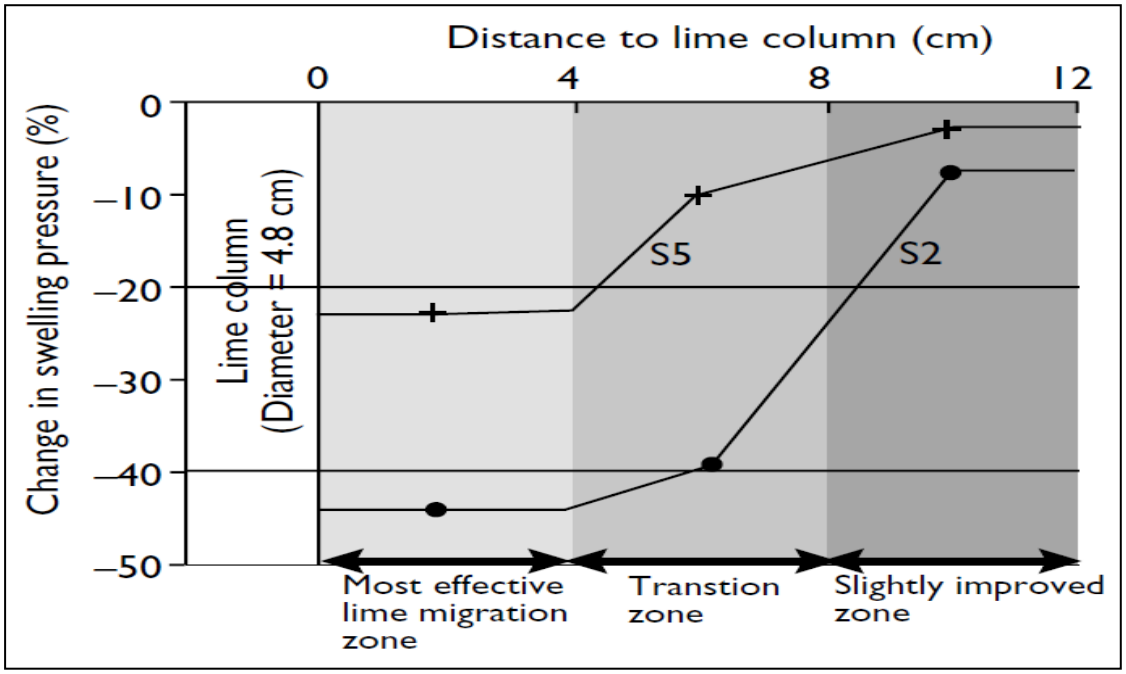
باجراء تجربة التركيب الحبي للعينات المعالجة وغير المعالجة بالكلس تبين للباحث حصول نقصان في كمية حبيبات الغضار بعد المعالجة بالكلس , ويزيد هذا النقصان بكمية حبيبات الغضار مع الاقتراب من الزتد الكلسي و مع زيادة طول مدة المعالجة بالكلس و تتضاءل هذه

الظاهرة تدريجيا بالابتعاد عن الوتد الكلسي . يعود تفسير نقصان كمية حبيبات الغضار بعد المعالجة بأعمدة الكلس إلى أن هذه الحبيبات نتيجة المعالجة بأعمدة الكلس تخضع لعملية تجمع و تكتل لتشكيل الركام بقياس حبيبات أكبر من قياس حبيبات الغضار, و يسلك الركام سلوك مشابه لسلوك حبيبات السيلت . يكون الانخفاض الأعظمي بنسبة حبيبات الغضار ضمن نطاق التأثير لفعال للكلس أي على بعد حوالي (1*D ) من سطح الوتد الكسي ويصل إلى 40 % .

[ 1] , Part ( 6) , Page (328) ,Paragraph ( 2) Gradiation and Consistency "

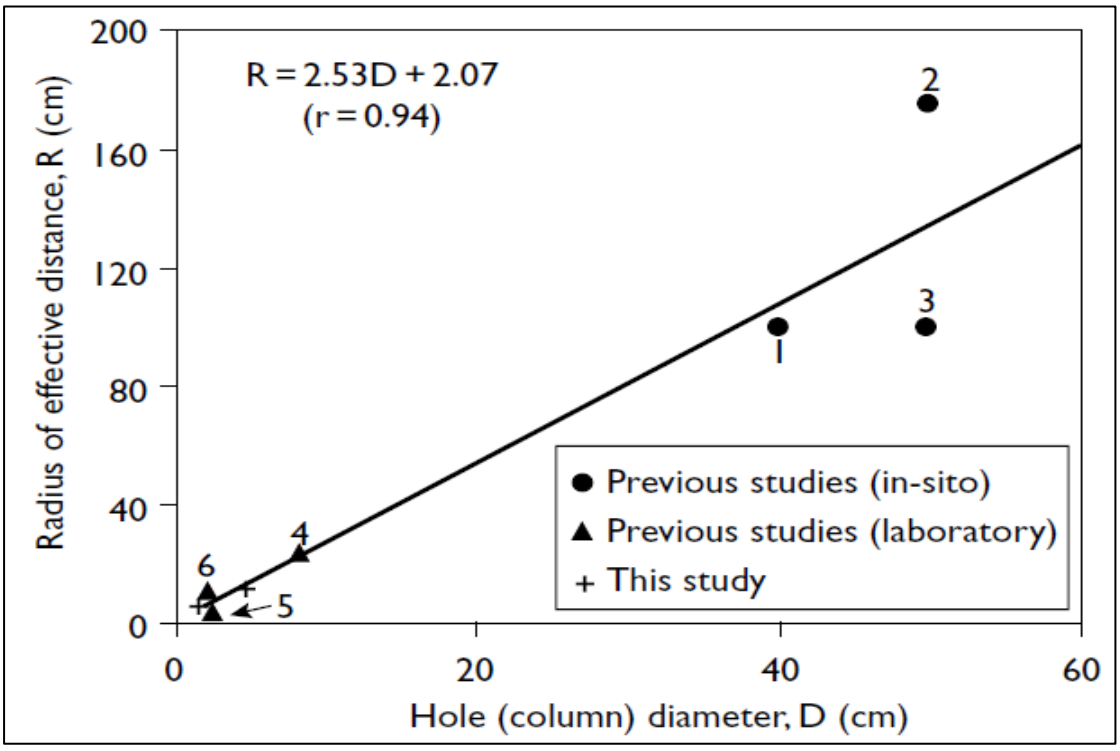



**شكل رقم ( 36) انخفاض حد السيولة و قرينة اللدونة مع الاقتراب من الوتد الكلسي**




**شكل رقم ( 37 ) انخفاض قيم ضغط الانتفاخ مع الاقتراب من الوتد الكلسي**

كذلك أوجد الباحثان علاقة تجريبية تربط بين مسافة انتشار شوارد الكالسيوم في التربة المحيطة بالوتد الكلسي (R) و بين قطر الوتد الكلسي نفسه (D) وفق العلاقة التالية $R = 2.53\,D + 2.07$ والتي يمثلها الشكل رقم (38) المبين أدناه.

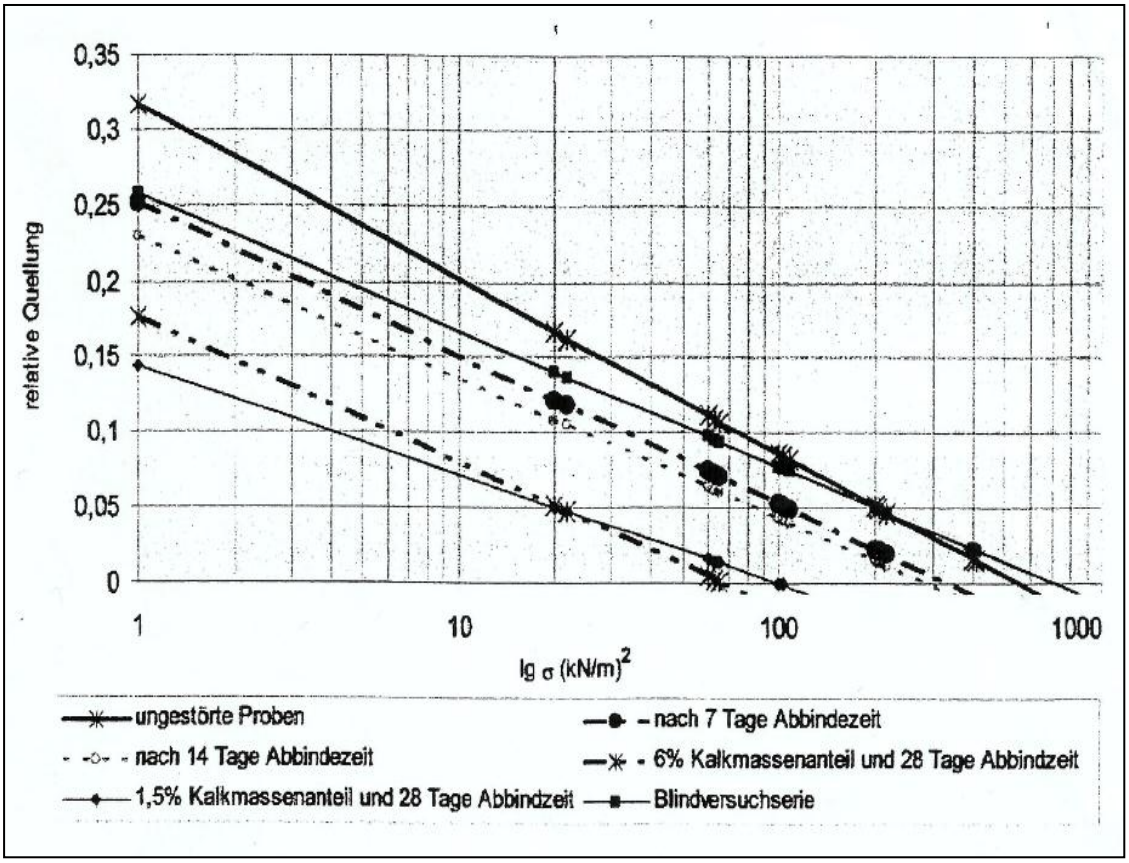



**شكل رقم ( 38 ) العلاقة بين مسافة انتشار أثر الكلس حول الوتد الكلسي و بين قطر الوتد الكلسي.**

- Sarhan . A , (2009) , Syria , " Kalk – Mikropfahle zur Reduzierung des Quell – drucks bei Grundungen in Stark Quellfahigen Boden " Bodenverbesserung , Geotechnik Fachzeitschrift (32 (2009) Nr.4 ) [8]

أجرى الباحث تجاربه على وتد كلسي مكروي منفذ في كتلة التربة داخل حلقة الأدومتر , ويهدف البحث بشكل أساسي إلى معرفة أثر الكلس على الانتفاخ النسبي و ضغط الانتفاخ لتربة غضارية انتفاخية , وقد توصل الباحث إلى أن أكبر نسبة انخفاض في الانتفاخ النسبي للتربة الغضارية الانتفاخية نتيجة المعالجة بالكلس بلغت 53% بعد فترة معالجة استمرت 28 يوم , بينما أكبر نسبة انخفاض بضغط الانتفاخ بلغت حوالي 80% عند نسبة وزنية من الكلس 6 % وفترة معالجة استمرت 28 يوم , كما هو موضح على الشكل رقم ( 39 ) .

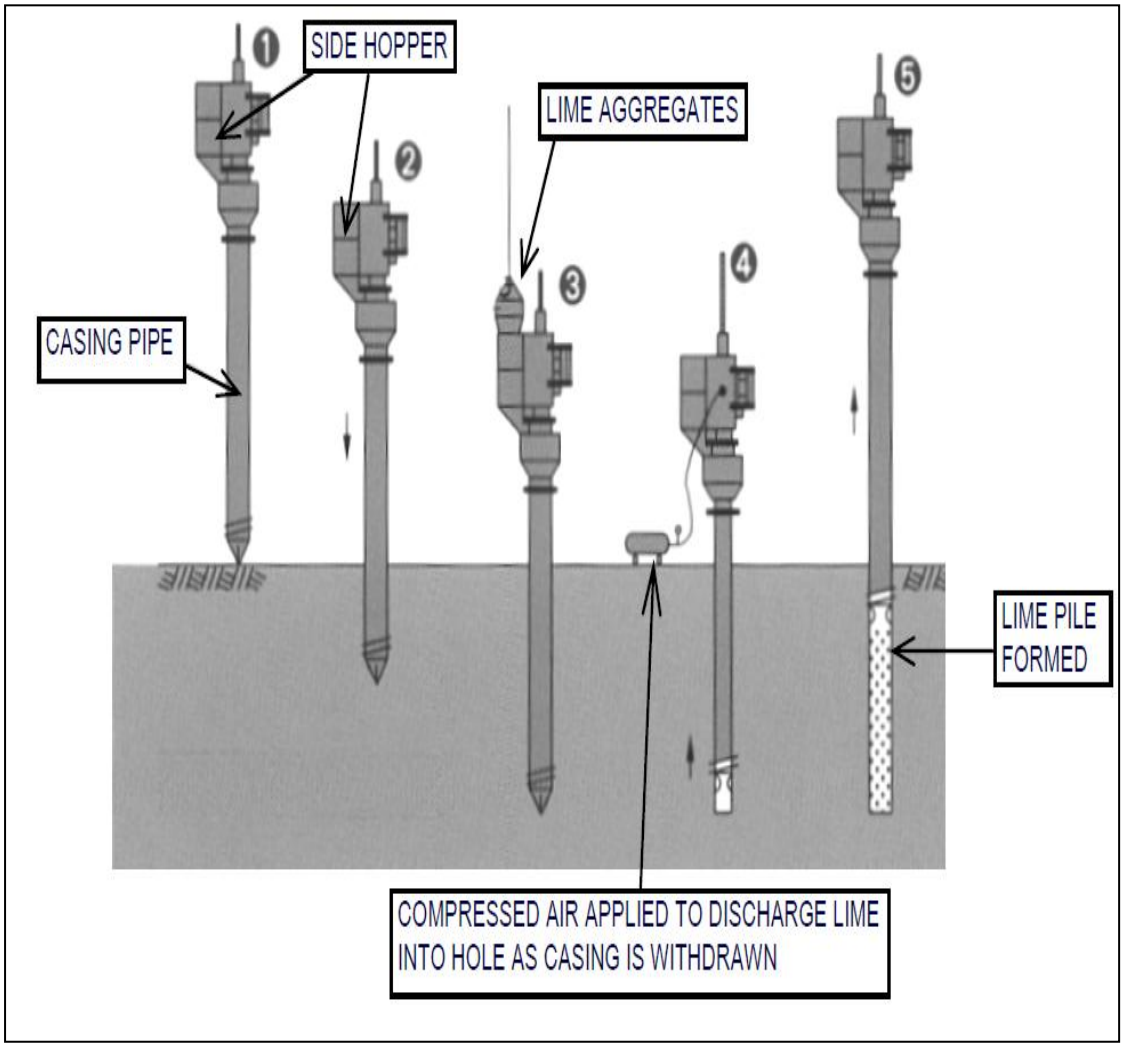
شكل رقم (39 ) الوتد الكلسي داخل حلقة الأدومتر



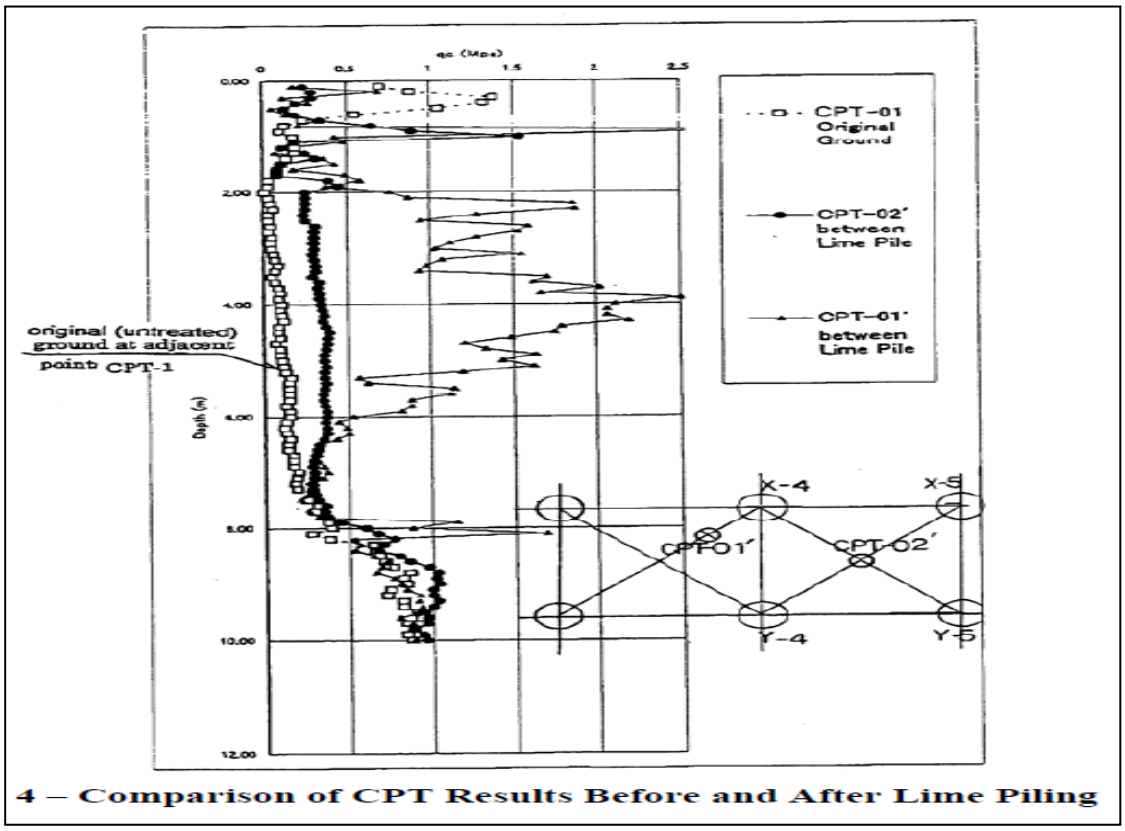

شكل رقم (40) انخفاض الانتفاخ النسبي مع البعد عن الوتد الكلسي .

- Wong . P . K ، Malaysia (2001) , " Ground Improvement Case Studies Chemical Lime Piles and Dynamic Replacement " .

أجرى الباحث تجاربه على أوتاد كلسية بقطر ( 40 ) cm و عمق ( 8 ) m و تباعد فيما بينها (1.7) m , و قد توصل الباحث إلى أن أوتاد الكلس في التربة تؤدي إلى تحسن واضح بمقاومة التربة على القص ( تجربة القص باستخدام البروانة ) و تحسن بمقاومة المخروط (CPT) كما هو مبين من الأشكال أدناه .

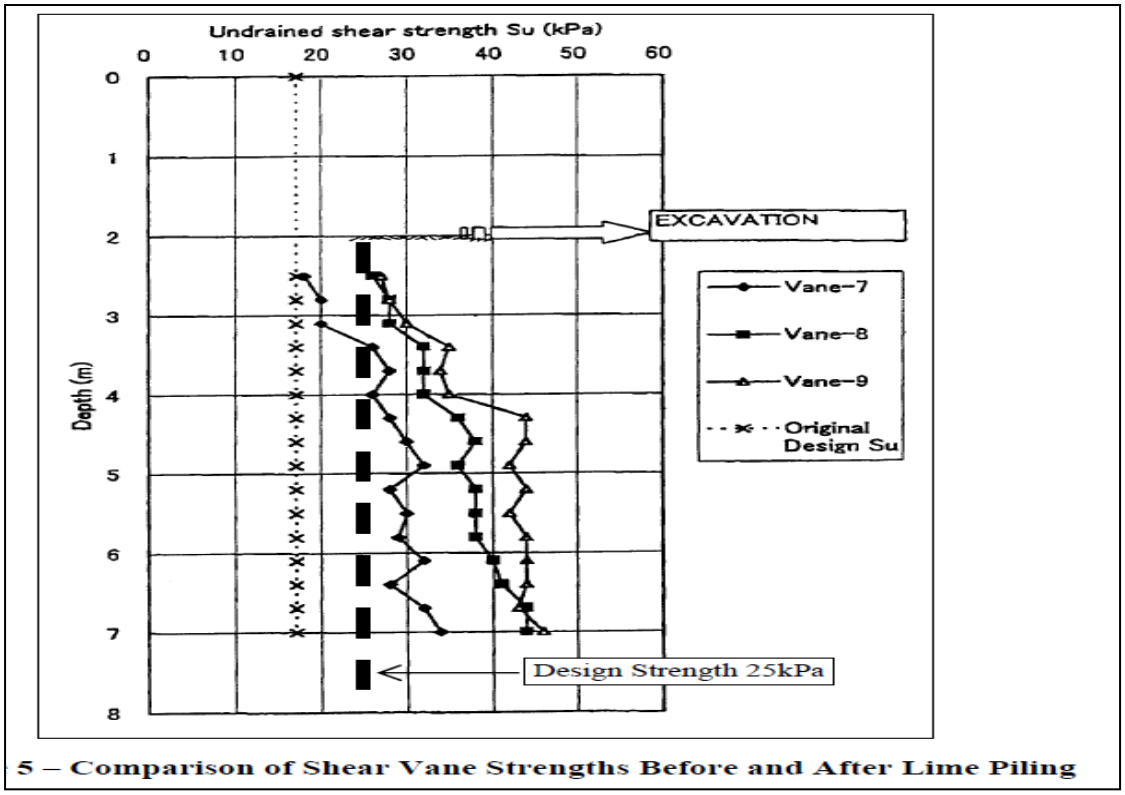



**شكل رقم (41 ) مراحل تنفيذ أوتاد الكلس .**




4 – Comparison of CPT Results Before and After Lime Piling

**شكل رقم ( 42 ) مقارنة بين نتائج تجربة اختراق المخروط قبل المعالجة بالكلس و بعدها**




5 – Comparison of Shear Vane Strengths Before and After Lime Piling

**شكل رقم ( 43 ) مقارنة بين نتائج تجربة البراونة قبل المعالجة بالكلس و بعدها**

# الفصل الثالث

## 3- الدراسة الحقلية:

## 3-1 تنفيذ الأوتاد الكلسية :

للوقوف بشكل عملي ودقيق على فعالية تقنية أوتاد الكلس المكروية في تخفيض الخواص الانتفاخية للتربة الغضارية الانتفاخية في موقع البحث , فقد تم تنفيذ سبعة أوتاد كلسية بقطر (10) سم وعمق (6) متر من سطح الأرض في موقع البحث .

**شكل رقم (44 ) تنفيذ الأوتاد الكلسية و ملؤها بالكلس المطحون**

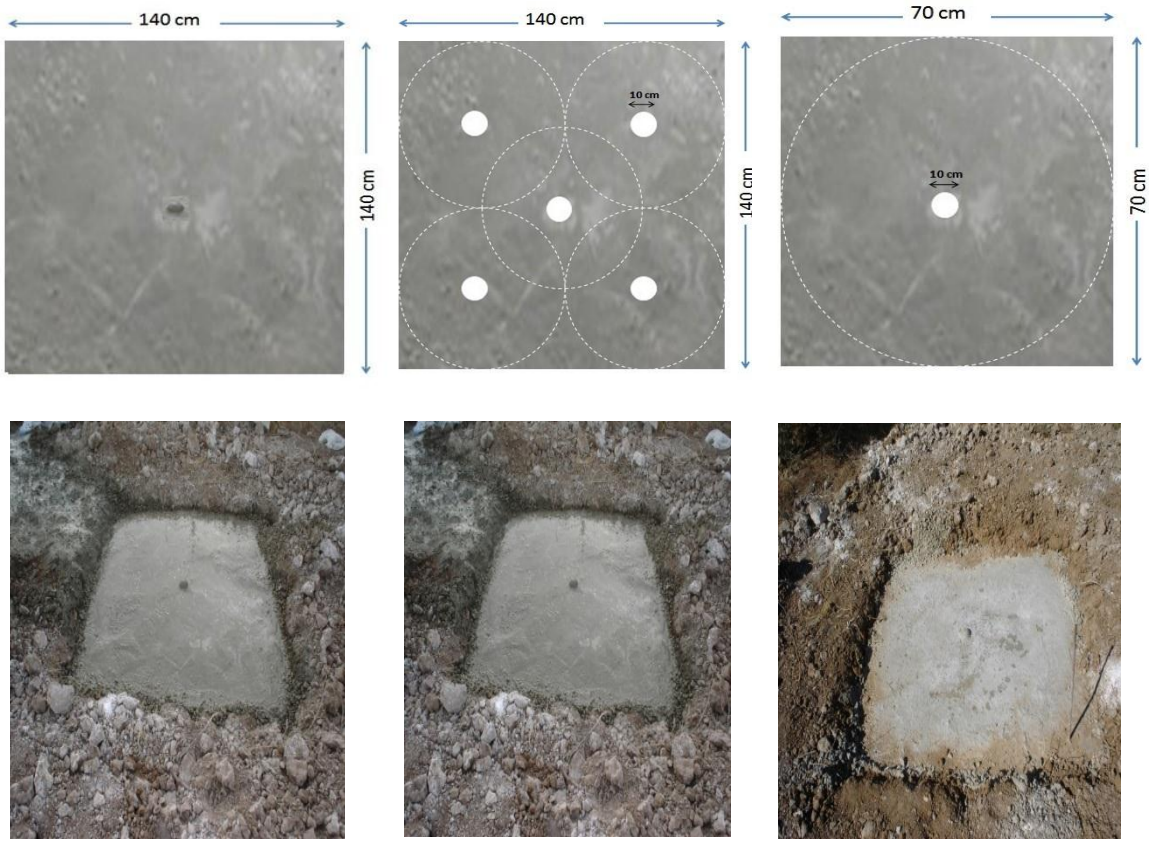
## 3-2 تنفيذ البلاطات البيتونية :

تم تنفيذ ثلاث بلاطات بيتونية ,الأولى أبعادها (140*140) cm² وتستند على خمسة أوتاد كلسية , و الثانية مطابقة للأولى من حيث الأبعاد و لكنها تستند على التربة مباشرة بدون أوتاد , أما الثالثة فأبعادها (70*70) cm² وتستند على وتد كلسي و حيد , وقد نفذت كافة البلاطات البيتونية على عمق ( 0.3 ) m و بسماكة موحدة (0.25 ) m , و بالتالي يكون الضغط المنقول للتربة :

$$P = 1.4*1.4*0.25*2.5/1.4*1.4 = 0.625\ t/m^2 = 0.063\ Kg/cm^2 = 6.25\ Kpa$$

**شكل رقم (45 ) الحفرية اللازمة لتنفيذ البلاطة فوق الأوتاد الكلسية**

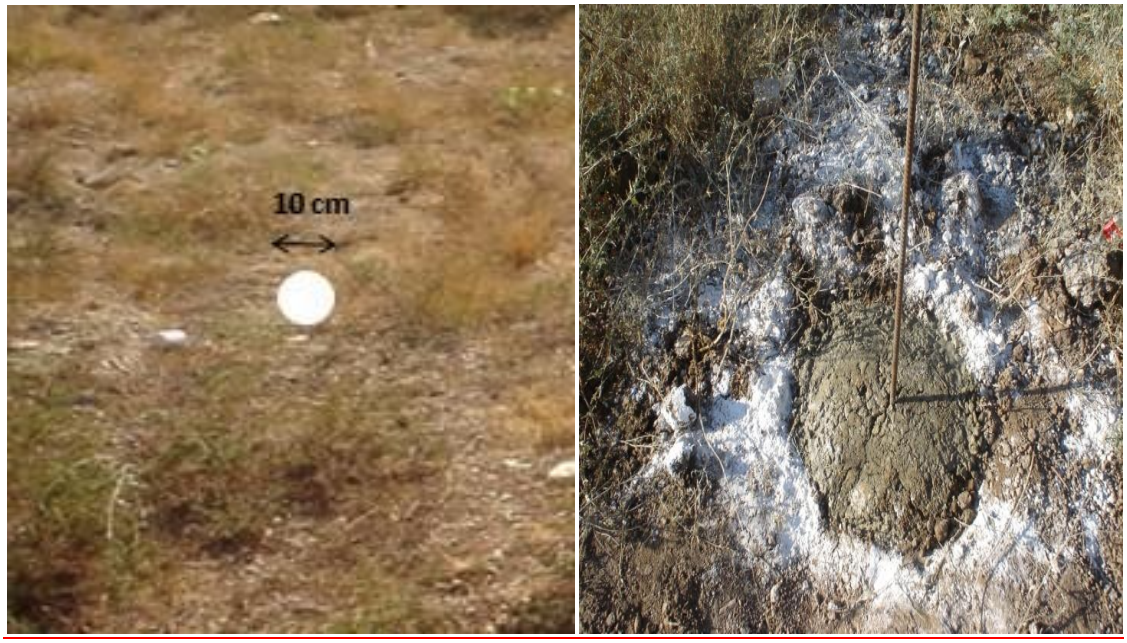
شكل رقم (46 ) تسليح البلاطة البيتونية




شكل رقم (47 ) الشكل النهائي للبلاطات البيتونية

## 3-3- تنفيذ وتد كلسي منفرد بدون بلاطة بيتونية :

تم تنفيذ وتد كلسي منفرد بدون بلاطة بيتونية للكشف عنه في نهاية البحث , و أخذ العينات من محيطه و اختبارها مخبرياً لمعرفة مدى انتشار اثر الكلس حول الوتد الكلسي دون الحاجة لتخريب البلاطات البيتونية لزوم استخدامها في أبحاث لاحقة .




**شكل رقم (48 ) وتد كلسي منفرد بدون بلاطة بيتونية .**

## 3-4 تحديد مواصفات االتربة على كامل عمق السبور:

تم أخذ العينات من السبر المنفرد و ذلك كل واحد متر مع العمق أو عند تغير مظهر طبقة التربة من سطح الأرض وحتى عمق (6 ) m , و تم تغليفها بالشمع و ووضعت بأكياس نايلون محكمة الإغلاق للحفاظ على رطوبتها , وأجريت عليها التجارب المطلوبة في مخبر ميكانيك التربة لتحديد مواصفات تربة موقع البحث مع العمق و رسم توصيف المقطع الجيولوجي لطبقات التربة في موقع البحث .

**شكل رقم (49 ) العينات المأخوذة من السبر المنفرد**

## 3-5 – رسم وتوصيف المقطع الجيولوجي لطبقات تربة الموقع .

استخدمت العينات المستخرجة من السبر المنفرد لتوصيف طبقات المقطع الجيولوجي لتربة موقع البحث وفق الشكل المبين أدناه .

| العمق ( m ) | الرمز | وصف التربة | ملاحظات |
|---|---|---|---|
| 0.5 m | | تربة غضارية ذات لون بني داكن | ▪ تظهر أحياناً في بعض الطبقات بلورات ناتجة عن وجود الكوارتز و الانهدريت<br>▪ تظهر أحياناً بعض العروق الكلسية بنسبة بسيطة .<br>▪ لم يلاحظ منسوب المياه الجوفية حتى عمق ( 6 ) m |
| 1.0 m | | | |
| 1.5 m | | تربة غضارية ذات لون أحمر فاتح | |
| 2.0 m | | تربة غضارية ذات لون بني داكن | |
| 2.5 m | | تربة غضارية ذات لون أحمر فاتح | |
| 3.0 m | | | |
| 3.5 m | | تربة غضارية ذات لون بني داكن | |
| 4.0 m | | | |
| 4.5 m | | تربة غضارية ذات لون أحمر فاتح | |
| 5.0 m | | | |
| 5.5 m | | تربة غضارية ذات لون بني داكن | |
| 6.0 m | | تربة ذات لون رمادي فاتح | |

**شكل رقم ( 50 ) المقطع الجيولوجي لطبقات التربة في موقع البحث**

## 3-6 نتائج التجارب المخبرية لتحديد مواصفات تربة موقع البحث

لتحديد مواصفات التربة مع العمق , تم إجراء التجارب المخبرية التالية على العينات المستخرجة من السبر المنفرد الذي لا تستند عليه أية بلاطة بيتونية , والتجارب هي ( تجربة الرطوبة , الوزن الحجمي , الوزن النوعي , حدود أتربرغ , ضغط الانتفاخ و الانتفاخ النسبي ) , و تم حساب الوزن الحجمي الجاف والمسامية الابتدائية . يبين الجدول أدناه نتائج التجارب المذكورة .

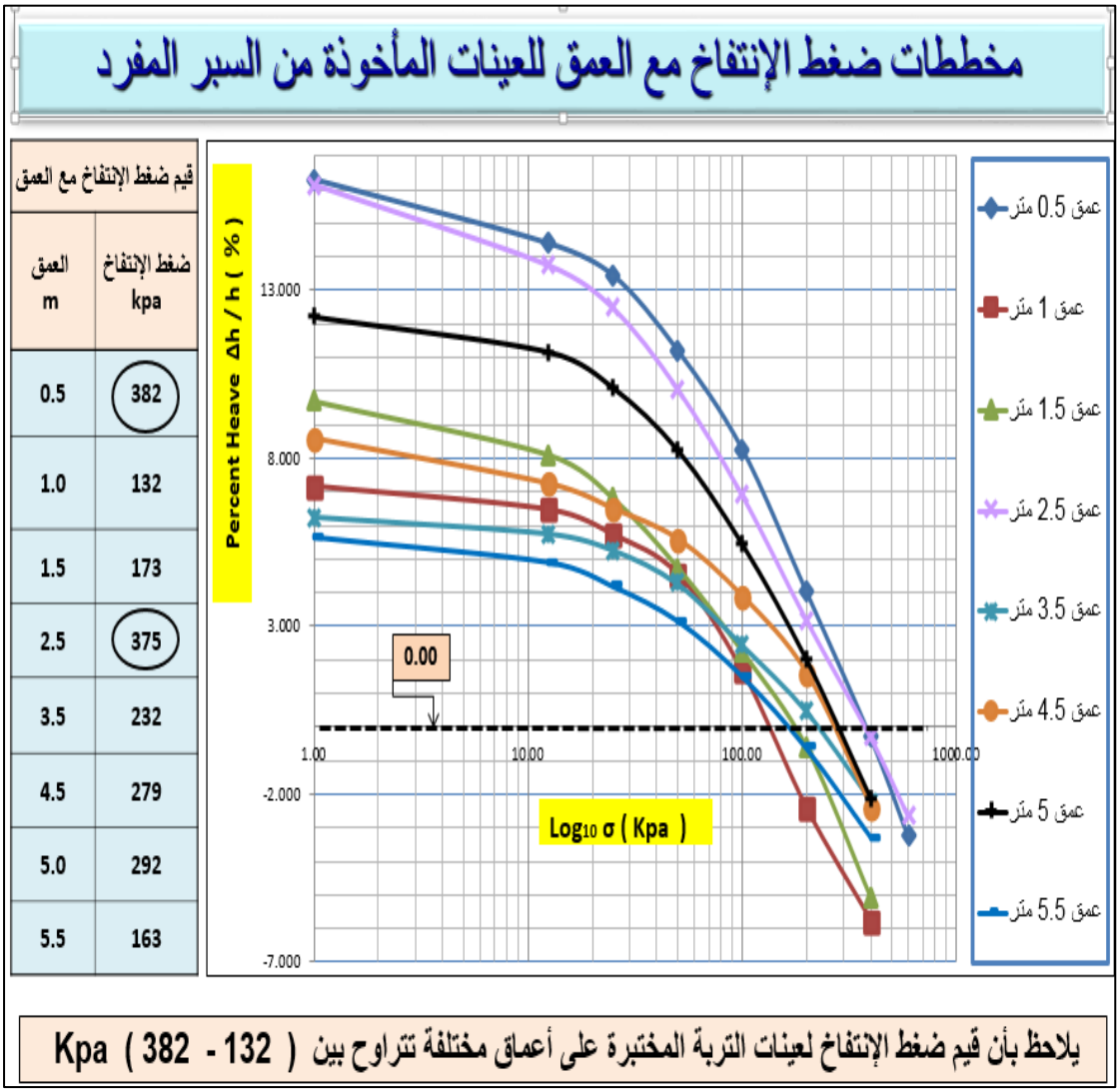
| مواصفات تربة موقع البحث مع العمق قبل المعالجة بأوتاد الكلس | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| قرينة اللدونة | حد اللدونة | حد السيولة | الانتفاخ النسبي | ضغط الانتفاخ | المسامية الابتدائية | الوزن الحجمي الجاف | الوزن النوعي | الوزن الحجمي | الرطوبة | العمق |
| PI % | PL % | LL % | PS % | SP kpa | $e_0$ | γd g/cm³ | γs g/cm³ | γ g/cm³ | W % | Depth m |
| 37.90 | 21.76 | 59.66 | 16.30 | 382 | 0.72 | 1.58 | 2.71 | 1.9 | 0.20 | 0.50 |
| 34.92 | 20.79 | 55.71 | 7.20 | 132 | 0.72 | 1.59 | 2.74 | 1.91 | 0.21 | 1.00 |
| 35.06 | 22.49 | 57.55 | 9.70 | 173 | 0.81 | 1.55 | 2.81 | 1.93 | 0.24 | 1.50 |
| 30.22 | 24.72 | 54.94 | 16.15 | 375 | 0.81 | 1.53 | 2.77 | 1.94 | 0.26 | 2.50 |
| 43.05 | 24.91 | 67.96 | 6.25 | 232 | 0.89 | 1.48 | 2.80 | 1.92 | 0.31 | 3.50 |
| 49.10 | 33.83 | 82.93 | 8.60 | 279 | 0.95 | 1.45 | 2.83 | 1.93 | 0.35 | 4.50 |
| 57.50 | 30.89 | 88.39 | 12.23 | 292 | 0.90 | 1.41 | 2.80 | 1.88 | 0.36 | 5.00 |
| 23.92 | 14.79 | 38.71 | 5.65 | 163 | 0.70 | 1.60 | 2.72 | 1.94 | 0.33 | 5.50 |

**جدول رقم ( 7 ) مواصفات تربة موقع البحث حتى عمق 5.5 متر .**

- أجريت تجارب ضغط الانتفاخ و الانتفاخ النسبي باستخدام أجهزة الأدومتر الموجودة في مخبر ميكانيك التربة ، في كلية الهندسة المدنية ، بجامعة دمشق وفق طريقة ( ASTM D 4546 - 96 Method A ) .

**شكل رقم (51 ) تجارب ضغط الانتفاخ و الانتفاخ النسبي**

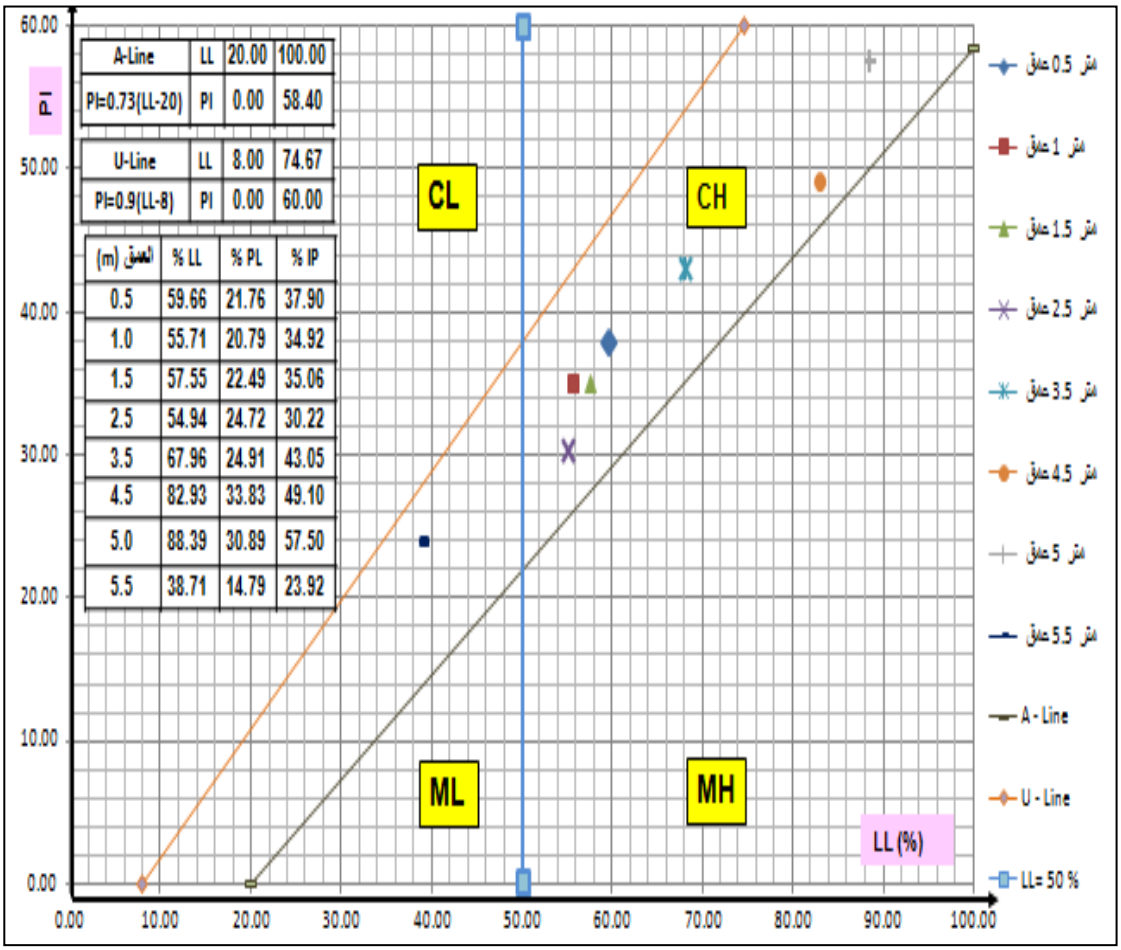
- يوضح الشكل أدناه مخططات ضغط الانتفاخ مع العمق :




**شكل رقم ( 52 ) مخططات ضغط الانتفاخ و الانتفاخ النسبي**

## 3-7 تصنيف تربة موقع البحث مع العمق:

تم تصنيف التربة بحسب USCS ( ASTM D - 2487 - 06 ) , و يوضح مخطط اللدونة في الشكل رقم ( 53) أدناه أن التربة من سطح الأرض و حتى عمق (5.5) m تصنف على أنها غضار عالي اللدونة ( CH) , بينما تصنف التربة الواقعة على عمق ( 5.5 - 6 ) m على أنها غضار متوسط إلى منخفض اللدونة ( CL ).




**شكل رقم (53) تصنيف التربة بحسب USCS ( ASTM D - 2487 - 06 )**

## 3-8 تحديد مقدار انتفاخ وانكماش التربة تحت البلاطات البيتونية:

تم مراقبة حركة ومناسيب البلاطات البيتونية مع تزايد نسبة الهطول المطري باستخدام جهاز نيفو دقيق من مخبر المساحة في كلية الهندسة المدنية وفق الخطوات و المراحل التالية :

- مراقبة الهطولات المطرية ( النشرة المطرية الصادرة عن وزارة الزراعة – مشروع الاستمطار ) بشكل يومي اعتباراً من 1- 10-2011 وحتى 31-1-2013 وبناء قاعدة بيانات الهطولات المطرية.

- اجراء ستة قياسات حقلية للمناسيب إضافة إلى القياس المرجعي الأول وعلى فترات مختلفة خلال عام كامل ( دورة مطرية كاملة ) , وأخيراً تم اجراء قياس للمناسيب و محاكاة لحالة الهطول المطري الأعظمي المتوقع في المنطقة .

يجدر التنويه أن تنفيذ الأوتاد الكلسية و البلاطات البيتونية و اجراء القياس المرجعي الأول للمناسيب تم قبل بداية الموسم المطري حيث التربة جافة تماماً و الهطول المطري و مجموع أمطار الموسم حتى ذلك التاريخ كانت ( 0 ) مم/سنة .

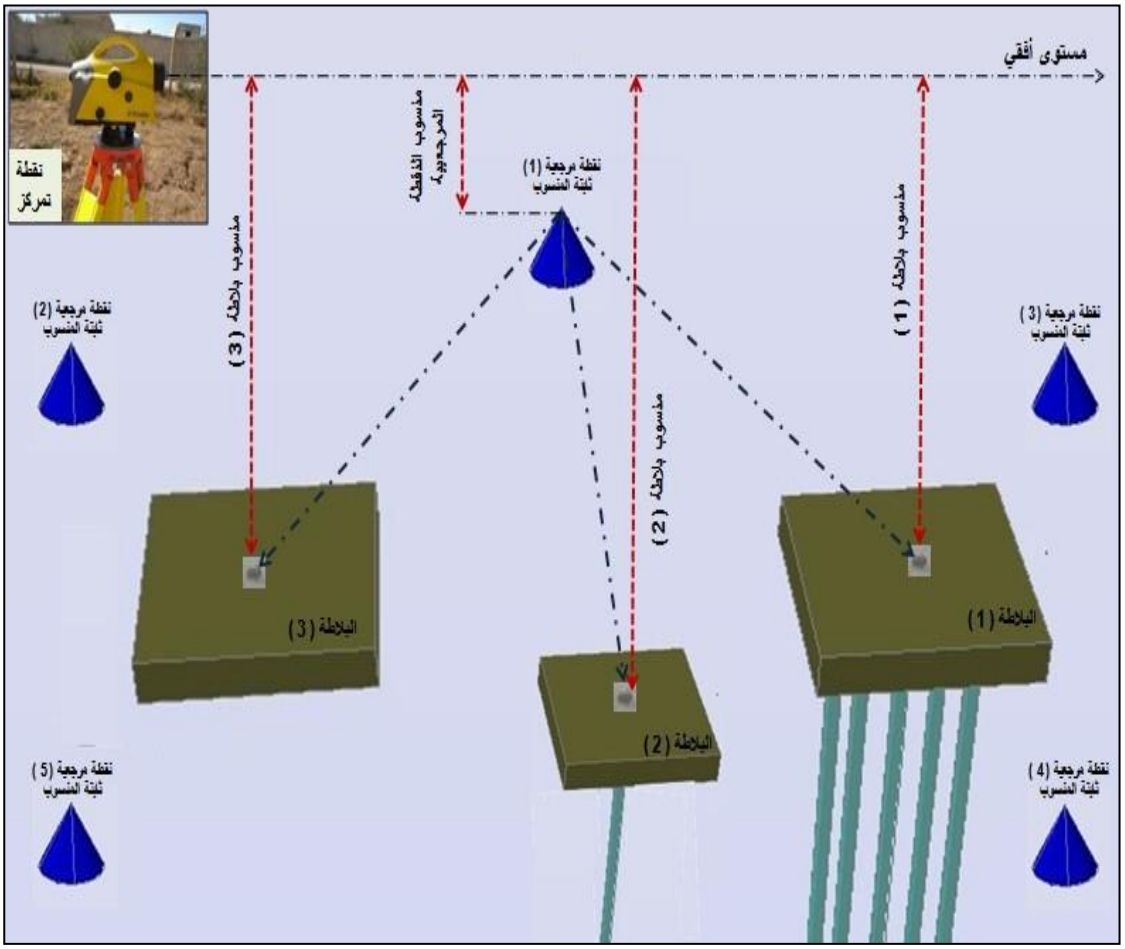
▪ يوضح الجدول رقم ( 8 ) أدناه قياسات المناسيب و تواريخها ووضع الهطول المطري في حينها, مع التنويه أنه أصطلح على أن الإشارة الموجبة تعني انتفاخ التربة في حين تعني الإشارة السالبة انكماش التربة :

| تاريخ إجراء القياس | الوقت المنقضي اعتباراً من تنفيذ المشروع بالحقل ( يوم ) | كمية الهطول المطري قبل وقت القياس مباشرة ( mm ) | مجموع أمطار الموسم حتى تاريخه ( mm ) | وسطي ارتفاعات البلاطة cm² ( 140*140 ) بدون أوتاد ( mm ) | وسطي ارتفاعات البلاطة cm² ( 140*140 ) على خمسة أوتاد ( mm ) | وسطي ارتفاعات البلاطة cm² ( 70* 70 ) على وتد وحيد ( mm ) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1/11/2011 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 22/11/2011 | 21 | 8.80 | 12.9 | 4 | -1 | -1 |
| 29/1/2012 | 89 | 13.40 | 33.3 | 9 | 0 | 0 |
| 20/2/2012 | 111 | 4.40 | 54.9 | 11 | 2 | |
| 3/4/2012 | 154 | 1.60 | 77.1 | 13 | 3 | 4 |
| 13/8/2012 | 286 | 0 | 77.1 | 1 | 0 | 0 |
| 14/10/2012 | 348 | 0 | 77.1 | 0 | 0 | 0 |

جدول رقم (8 ) نتائج مراقبة المناسيب وحركة البلاطات البيتونية مع الهطولات المطرية

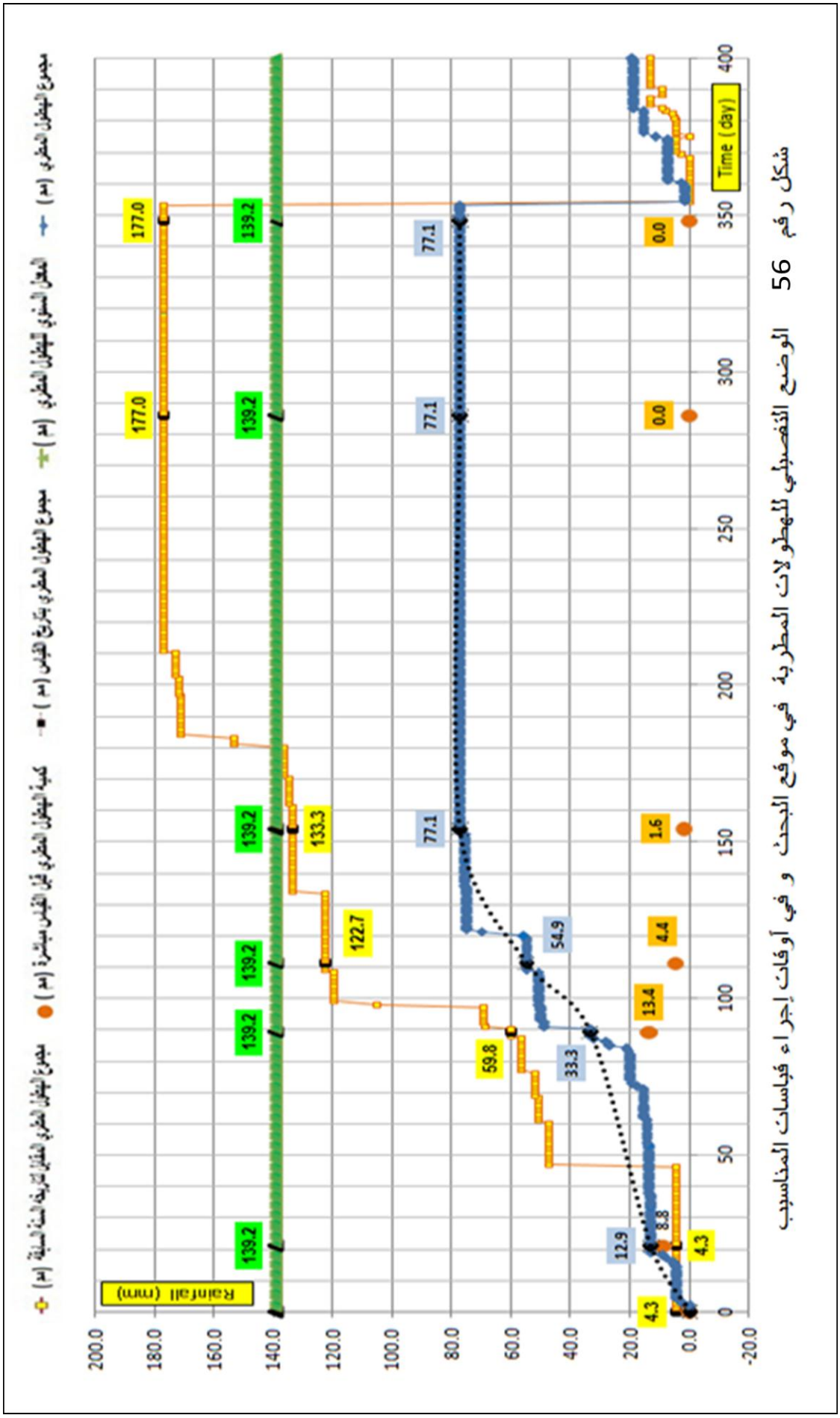
▪ يوضح الشكلين رقم ( 54 , 55 ) طريقة مراقبة المناسيب و حركة البلاطات البيتونية مقارنة بالقياس المرجعي الأول المأخوذ بعد تنفيذ البلاطات البيتونية حيث كان مجموع الهطولات المطرية صفر, و قد اعتمدت خمسة نقاط مرجعية ثابتة المنسوب وموزعة حول موقع اجراء البحث و تستخدم لمقارنة مناسيبها الثابتة مع مناسيب البلاطات البيتونية بالتزامن مع زيادة مجموع أمطار الموسم للوقوف على مقدار حركة البلاطات البيتونية الناتجة عن انتفاخ و انكماش التربة .

وقد تم مراعاة اجراء قياس المناسيب مباشرة بعد حصول هطول مطري للحصول على تغير ملحوظ بالمناسيب نظراً لأن انتفاخ و انكماش التربة الذي ينعكس بشكل تغير في المناسيب يعود سببه الى الهطول المطري كونه لم يلحظ منسوب المياه الجوفية حتى عمق (6) m .




**شكل رقم (54 ) طريقة مراقبة المناسيب وقياس حركة البلاطات البيتونية**

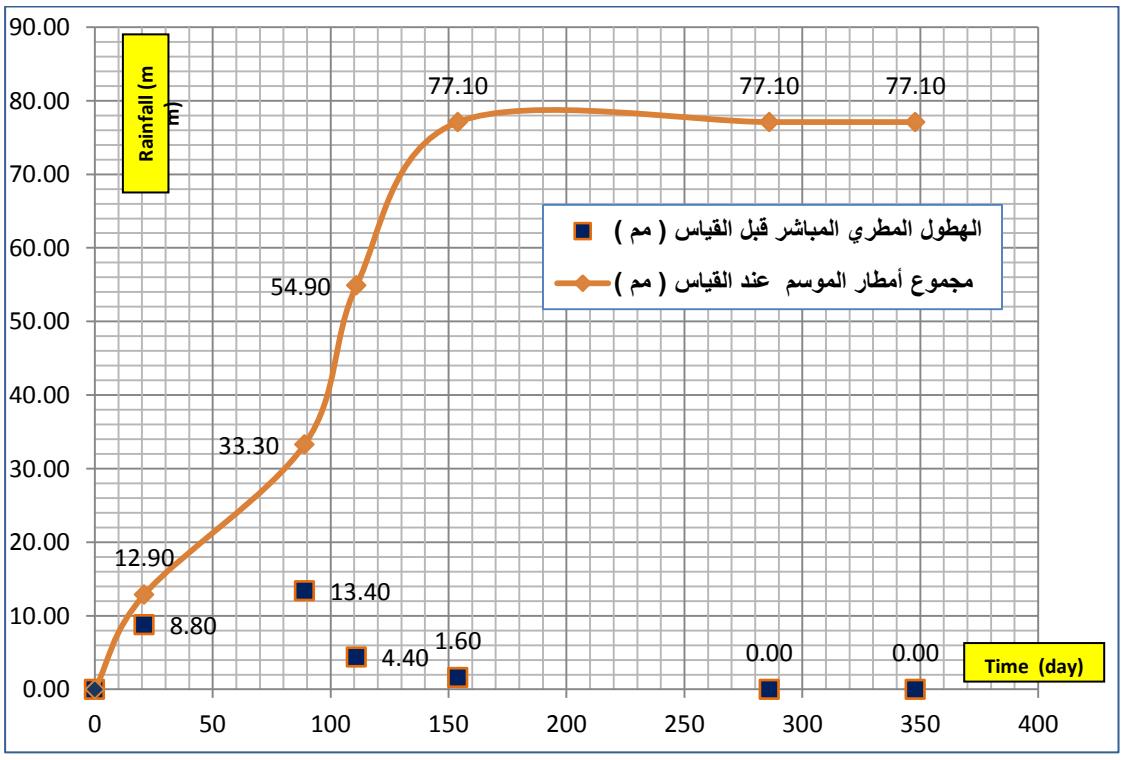
**شكل رقم (55 ) مراقبة حركة المناسيب باستخدام جهاز نيفو دقيق**




شكل رقم 56 الوضع التفصيلي للهطولات المطرية في موقع البحث و في أوقات إجراء قياسات المذاسيب

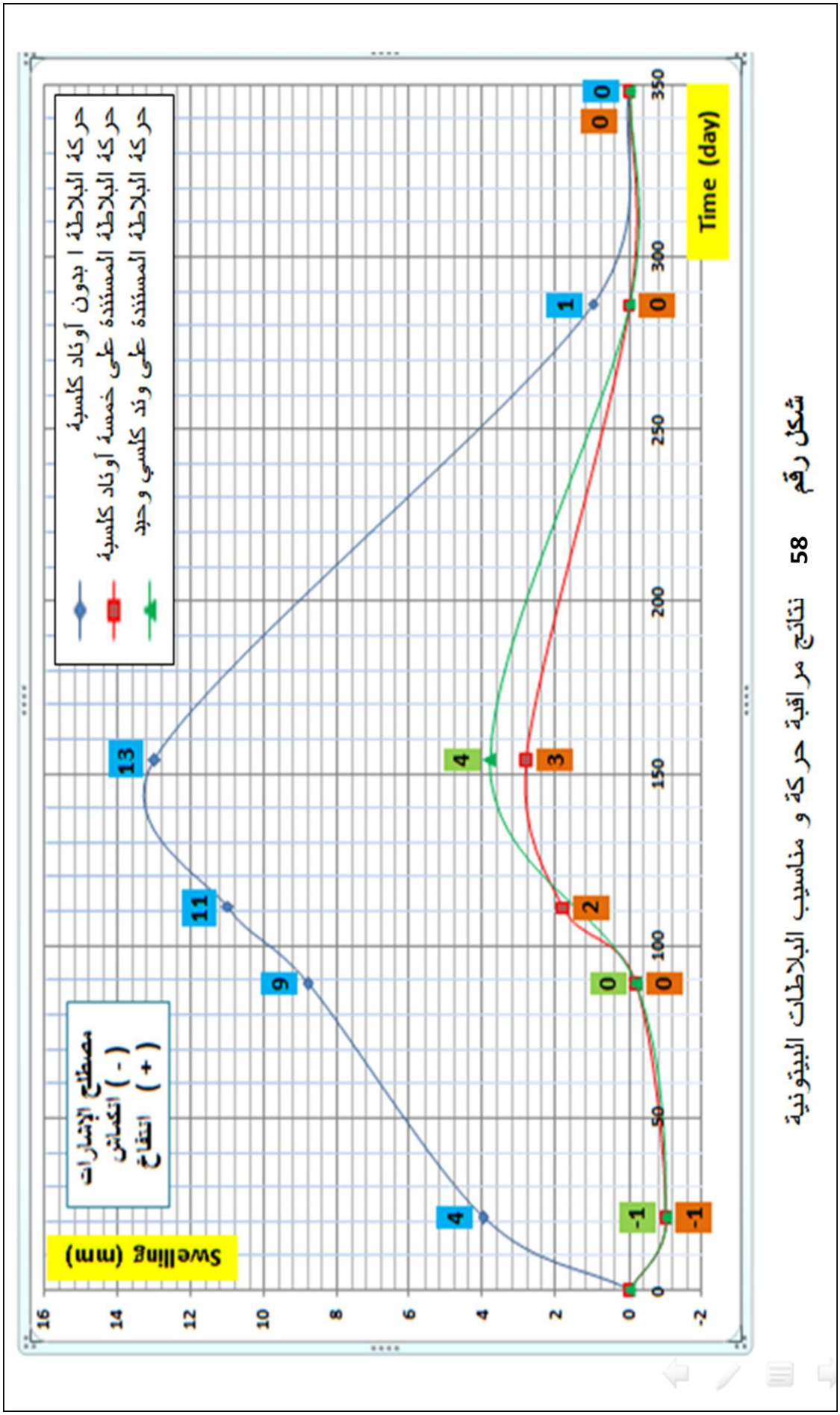
يتضح من الشكل رقم ( 56 ) أن المعدل السنوي للهطول المطري في منطقة اجراء البحث هو 139.2 مم / سنة , و أن مجموع الهطول المطري في السنة السابقة لإجراء البحث قد تجاوز المعدل السنوي للهطول في المنطقة حيث وصل مجموع الهطول المطري في السنة المذكورة إلى 177 مم/ سنة , في حين أن الهطول المطري في سنة إجراء البحث كان متدنياً و أقل من المعدل حيث أن أقصى قيمة وصلها مجموع الهطول المطري في سنة اجراء البحث كانت 77.1 مم / سنة , وهو الأمر الذي يجب أخذه بعين الاعتبار لدى تحليل نتائج قياس حركة و مناسيب البلاطات البيتونية الناتجة عن انتفاخ و انكماش التربة لدى تغير رطوبتها بسبب الهطولات المطرية , حيث يتوقع الحصول على مقادير أعلى لحركة البلاطات البيتونية ( انتفاخ و انكماش التربة ) في سنوات ذات موسم مطري أعلى من سنة اجراء البحث .

يوضح الشكل رقم (57 ) أدناه وضع المجموع التراكمي للهطول المطري في أوقات قياس مناسيب البلاطات البيتونية و الهطولات المطرية الحاصلة قبل اجراء قياسات المناسيب مباشرة .

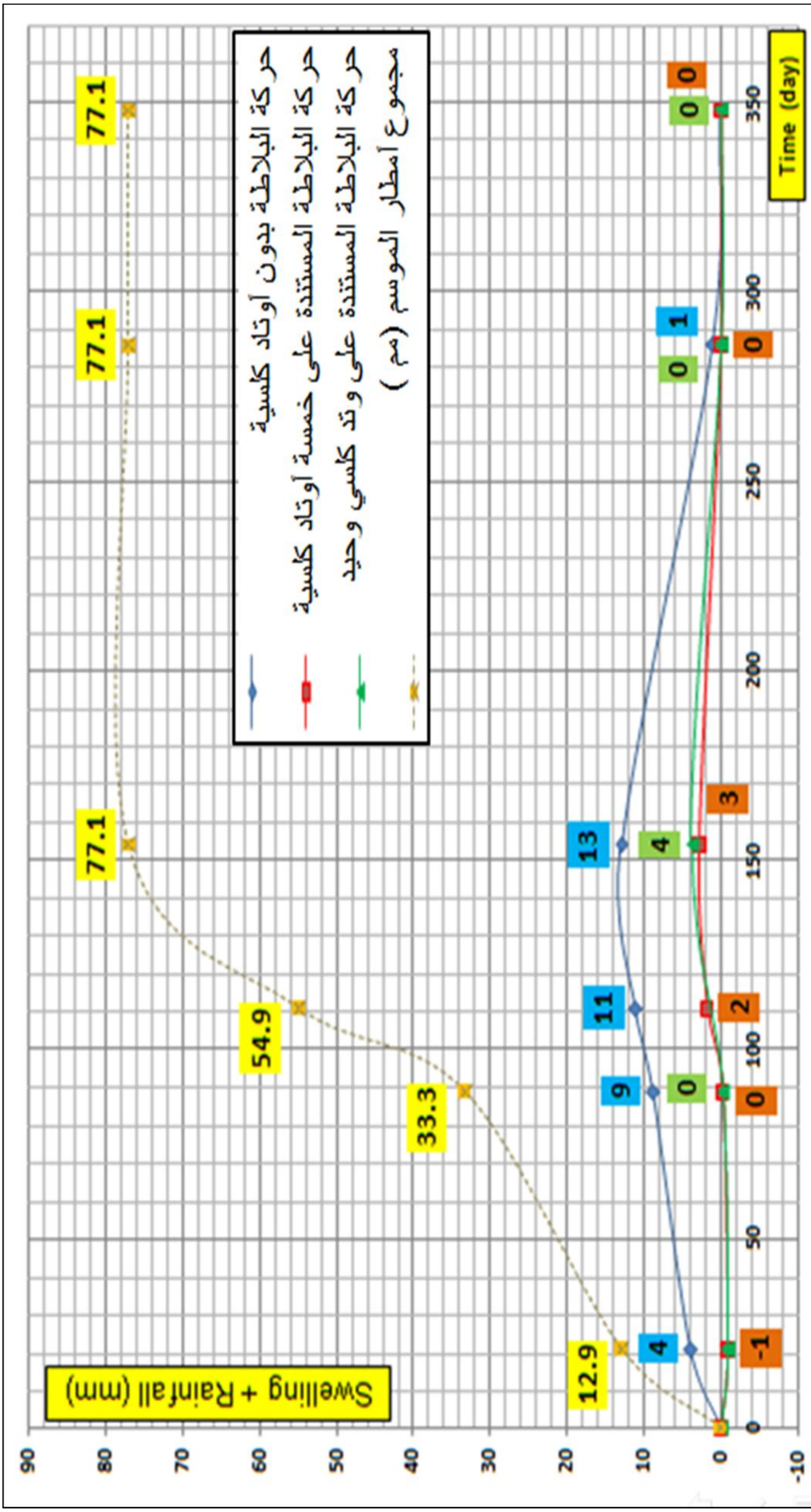



**شكل رقم ( 57 )** الهطولات المطرية في أوقات قياسات المناسيب.

- يوضح الشكلين رقم ( 58 , 59 ) أدناه نتائج مراقبة حركة و مناسيب البلاطات البيتونية مع الهطولات المطرية :




شكل رقم 58 نتائج مراقبة حركة و مناسيب البلاطات البيتونية




شكل رقم 59 نتائج مراقبة حركة و مناسيب البلاطات البيتونية مع الهطولات المطرية

يستنتج من الشكلين السابقين رقم (58 ) و رقم (59 ) أن تقنية أوتاد الكلس المكروية فعالة في تخفيض انتفاخ التربة الغضارية الانتفاخية المدروسة . حيث انه في نهاية الموسم المطري وبلوغ مجموع الهطول المطري قيمته العظمى (77.1 ) مم/ سنة فإن التربة تحت البلاطة التي تستند على التربة مباشر بدون أوتاد تنتفخ التربة بمقدار(13 ) mm في حين ترتفع البلاطة التي تستند على و تد كلسي وحيد بمقدار (4) mm , و ترتفع البلاطة التي تستند على خمسة أوتاد كلسية بمقدار (3) mm .

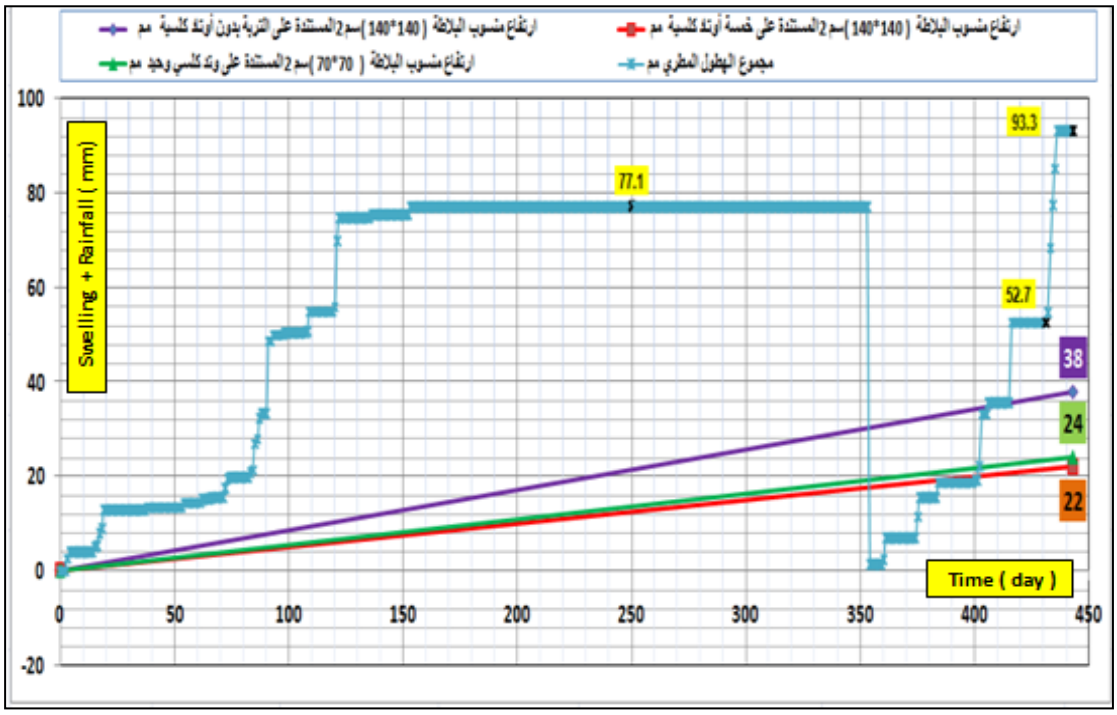
يعود الفرق بين انتفاخ التربة المتوضعة تحت البلاطة المستندة على و تد كلسي وحيد و التربة المتوضعة تحت البلاطة المستندة على خمسة أوتاد كلسية إلى تداخل مناطق تأثير الكلس الناتج عن العمل المشترك لمجموعة الأوتاد الكلسية .

يظهر القياس الأول لمناسيب البلاطات البيتونية و الذي تم بعد انقضاء مدة (21) يوم على تنفيذ الأوتاد الكلسية و البلاطات البيتونية أن البلاطة التي تستند على التربة مباشرة بدون أي أوتاد كلسية ترتفع بمقدار ( 4 ) mm أي يحصل انتفاخ بالتربة غير المعالجة بأوتاد الكلس بالقيمة السابقة , في حين يحصل انكماش بالتربة المعالجة بأوتاد الكلس و المتوضعة تحت البلاطات البيتونية سواء المستندة على و تد كلسي وحيد أو على خمسة أوتاد بمقدار ( −1 ) mm حيث ينخفض منسوب البلاطات المذكورة بمقدار هذه القيمة و يعود سبب ذلك إلى أن الكلس الحي المكون للأوتاد الكلسية في الفترة القريبة بعد تنفيذها يمتص الماء من التربة المحيطة مما يؤدي لانكماشها .

## 3- 9 تحديد مقدار انتفاخ التربة تحت البلاطات البيتونية في حالة محاكاة الهطول المطري الأعظمي :

بعد مرور ( 443 ) يوم على تنفيذ البلاطات البيتونية في الموقع تم اجراء قياس لمناسيب و حركة البلاطات بعد محاكاة حالة الهطول المطري الأعظمي المتوقع في المنطقة ( محاكاة حالة عاصفة مطرية ) . حيث تم قبل ( 72 ) ساعة من قياس المناسيب غمر موقع البحث متضمناً البلاطات البيتونية و الأوتاد الكلسية بالماء بما يعادل قيمة قيمة هطول مطري ( 115.5) mm وهو ما يعادل الهطول المطري الأعظمي خلال ( 29 ) سنة الحاصل في منطقة البحث خلال فترة قصيرة و متواصلة ( 10 ) أيام ( عاصفة مطرية ) , وذلك وفق بيانات الهيئة العامة للموارد المائية و مشروع الاستمطار في وزارة الزراعة , علماً أنه قبل تاريخ القياس بخمسة أيام و على مدار خمسة أيام متواصلة هطل كمية أمطار اضافية قدرها ( 40.6 ) مم , ليصبح المجموع (156.1) مم .

▪ يوضح الشكلين رقم (60 ) و رقم ( 61 ) أدناه نتائج مراقبة المناسيب وحركة البلاطات البيتونية في حالة محاكاة الهطول المطري الأعظمي المتوقع و نسبة التخفيض في انتفاخ التربة نتيجة المعالجة بأوتاد الكلس:




**شكل رقم (60 ) الهطول المطري وارتفاع مناسيب البلاطات البيتونية في حالة محاكاة الهطول المطري الأعظمي**

**شكل رقم (61 ) ارتفاع مناسيب البلاطات البيتونية في حالة الهطول المطري الأعظمي .**

- يتضح من الشكلين ( 60 & 61 ) أن أوتاد الكلس المكروية فعالة في تخفيض انتفاخ التربة الغضارية الانتفاخية المدروسة , حيث انه في حالة الهطول المطري الاعظمي انخفض انتفاخ التربة تحت البلاطة التي تستند على خمسة أوتاد كلسية بنسبة 42% , في حين انخفض انتفاخ التربة تحت البلاطة التي تستند على و تد كلسي وحيد بنسبة 37% مقارنة بانتفاخ التربة تحت البلاطة التي تستند على التربة مباشرة بدون أوتاد كلسية .

يعود الفرق بين انتفاخ التربة تحت البلاطة المستندة على وتد كلسي وحيد , والبلاطة المستندة على خمسة أوتاد الى تداخل مناطق تأثير الكلس الناتج عن العمل المشترك لمجموعة الأوتاد الكلسية , حيث زاد انخفاض قيمة انتفاخ التربة المتوضعة تحت بلاطة بيتونية مستندة على خمسة أوتاد كلسية بنسبة 5% مقارنة بانتفاخ التربة المتوضعة تحت بلاطة بيتونية مستندة على وتد كلسي وحيد , وهذا يعزز النتيجة التي مفادها أن فعالية تقنية أوتاد الكلس في تخفيض انتفاخ التربة الغضارية الانتفاخية تزيد في حالة عملها كمجموعة مقارنة بعملها بشكل منفرد .

# الفصل الرابع

## 4- دراسة تجريبية تحليلية حول مدى فعالية أوتاد الكلس لتخفيض الخواص الانتفاخية للتربة الغضارية المدروسة ومدى وانتشار اثر الكلس على خواص التربة أفقياً حول الوتد الكلسي.

### 4-1 الفرضية العلمية والمنهجية المتبعة للتحقق منها:

يفترض هذا البحث أن لأوتاد الكلس المكروية أثر إيجابي على تخفيض (ضغط الانتفاخ , الانتفاخ النسبي , قرينة الانتفاخ , قرينة اللدونة ) وتحسين خواص التربة الأخرى , و أن هذا الأثر سوف ينتشر أفقياً حول الوتد الكلسي إلى مسافة معينة في التربة وفق الشكل التخطيطي رقم (62 ) المبين أدناه .

**شكل رقم (62) المسافة المتوقعة لانتشار أثر الكلس على خواص التربة حول الوتد الكلسي .**

▪ تم الكشف على الوتد المنفرد بعد مرور(520) يوم على تنفيذ الأوتاد الكلسية و البلاطات البيتونية المسلحة , أخذت عينات سليمة كل (10) cm اعتباراً من السطح الخارجي للوتد الكلسي و لمسافة تصل حتى (120) cm أي (13) عينة وذلك على عمقين مختلفين من سطح الأرض (0.75) m و (2.5) m بالإضافة إلى عينة غير متأثرة بالكلس على مسافة ( 3) m من محيط الوتد الكلسي و على العمقين المذكورين , أي (14) عينة من عمق (0.75 ) m و مثلها من عمق (2.5) م .

تم اختيار العمقين المذكورين لأن نتائج التجارب في المرحلة الأولى و التي اجريت على العينات المأخوذة من السبر المنفرد بينت أن طبقات التربة الواقعة على عمق (0 - 1) m و الممثلة بالعينة على عمق ( 0.5 ) m , و طبقات التربة الواقعة على عمق (2 - 3) m و الممثلة بالعينة على عمق ( 2.5 ) m لها أكبر ضغط انتفاخ و أكبر انتفاخ نسبي كما هو موضح في الجدول رقم (7 ) السابق , وبالتالي يتوقع الحصول على نتائج واضحة بخصوص مقدار فعالية و مدى انتشار أثر الكلس أفقياً على الخواص الانتفاخية للتربة حول الوتد الكلسي .

## 4- 2 التجارب المخبرية:

أجريت التجارب المخبرية على العينات المأخوذة من مسافات أفقية مختلفة من محيط الوتد الكلسي وعلى العمقين المذكورين سابقاً ( 28 عينة من العمقين 0.75 m و 2.5 m ) وبهدف :

- تحديد مدى فعالية أوتاد الكلس الميكروية لتخفيض الخواص الانتفاخية للتربة المدروسة .
- تحديد مدى انتشار أثر الكلس على خواص التربة أفقياً حول الوتد الكلسي.

أجريت التجارب المخبرية على عينات التربة في مخبر ميكانيك التربة في كلية الهندسة المدنية في جامعة دمشق , وأما تحليل عينة أكسيد الكالسيوم المستخدمة في البحث فأجري في مخبر الكيمياء في كلية العلوم في جامعة دمشق.

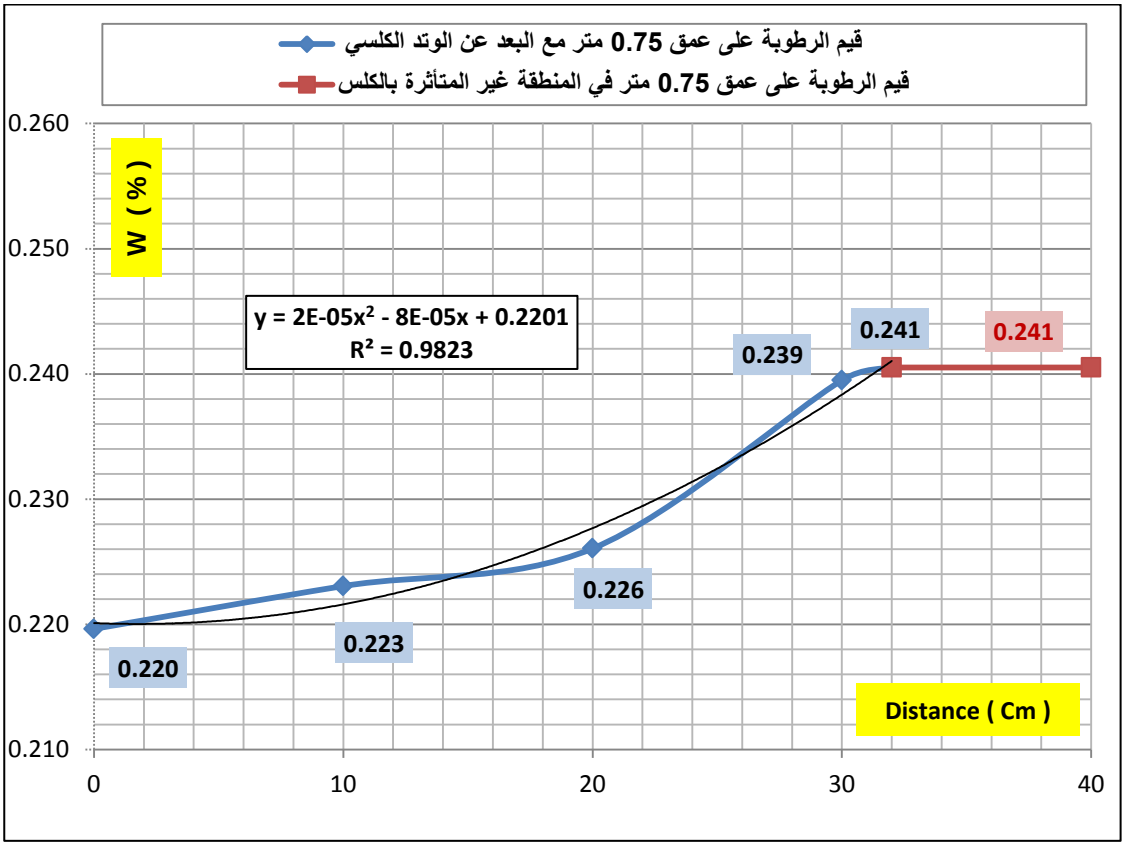
فيما يلي نتائج التجارب المخبرية التي تم اجراؤها .

### 4- 2- 1 تجربة الرطوبة الطبيعية (ASTM - D 2216 -71 ):

تعرف الرطوبة الطبيعية للتربة بأنها النسبة المئوية لوزن الماء الموجود في عينة التربة الى وزن العينة جافة. أجريت تجربة الرطوبة الطبيعية على عينات التربة السليمة غير المخربة المشمعة والمحفوظة ضمن كيس بلاستيكي محكم الإغلاق للمحافظة على الرطوبة الحقيقية لعينة التربة الغضارية , وتم اجراء التجربة على ثلاث عينات وأخذ المتوسط الحسابي لها للحصول على النتيجة النهائية للرطوبة الطبيعية.

#### تجربة الرطوبة الطبيعية على عمق (0.75) m:

يمثل الشكل رقم (63) المبين أدناه تغير قيم الرطوبة الطبيعية على عمق (0.75 ) m مع البعد عن الوتد الكلسي ومقارنتها بالرطوبة الطبيعة لعينة التربة المأخوذة من نفس العمق من المنطقة غير المتأثرة بالكلس على بعد (3) m عن السطح الخارجي للوتد الكلسي.




**شكل رقم (63) انخفاض قيم الرطوبة الطبيعية على عمق (0.75 ) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي.**

يتبين من الشكل رقم ( 63 ) أن قيم الرطوبة على عمق ( 0.75 ) m تتناقص مع الاقتراب من الوتد الكلسي و يتلاشى أثر أوتاد الكلس على الرطوبة بعد مسافة (3.2 * D) من سطح الوتد الكلسي , وأن المنحني المقارب الذي يبين العلاقة بين الرطوبة الطبيعية للتربة و بعدها عن السطح الخارجي للوتد الكلسي تعطى معادلته بالشكل ( $y = 2E\text{-}05x^2 - 8E\text{-}05x + 0.2201$ ) و بدرجة موثوقية 98 % حيث يرمز ( X ) الى بعد العينة عن السطح الخارجي للوتد الكلسي و يرمز ( y ) الى رطوبة العينة .

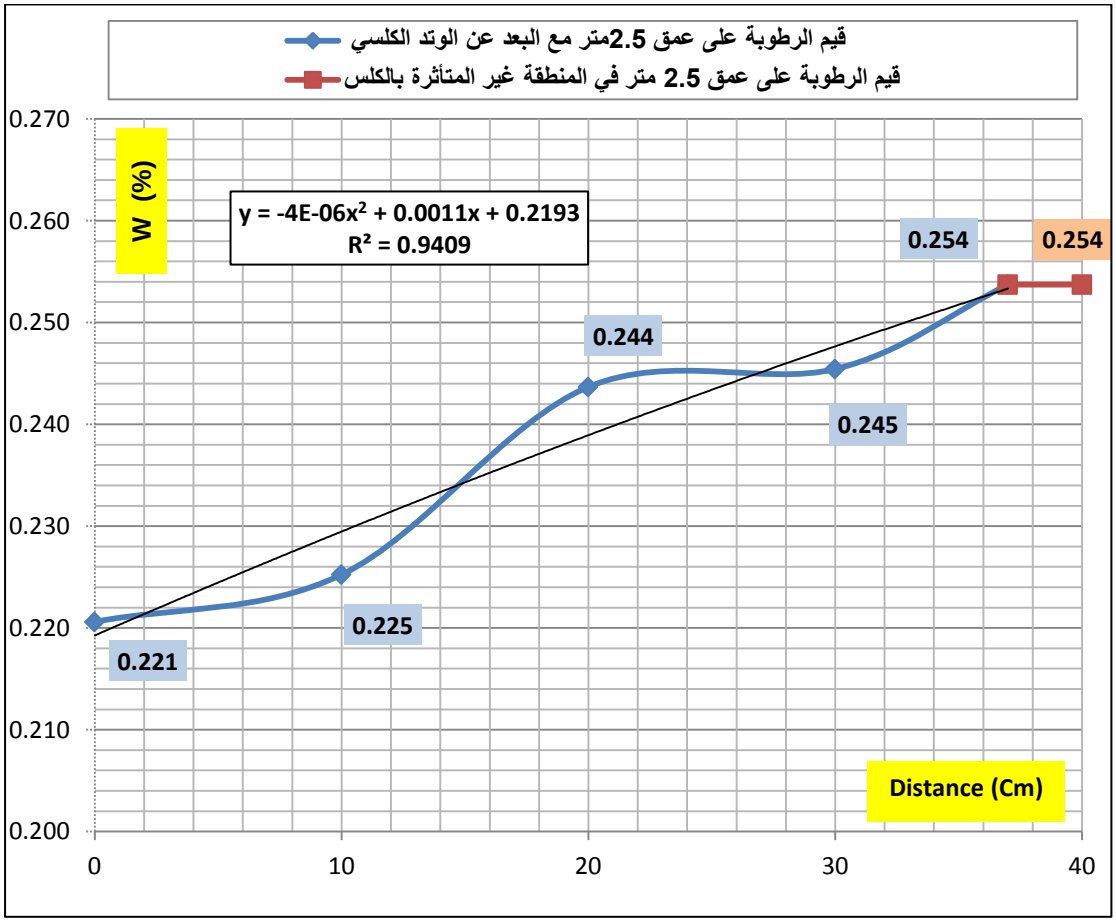
ان نسب انخفاض الرطوبة مع الاقتراب من الوتد الكلسي موضحة بالجدول رقم (9) أدناه.

| المجال | النسبة المئوية لانخفاض الرطوبة |
|---|---|
| D *( 1 −0 ) | % 9 |
| D *( 2 −1 ) | % 7 |
| D *( 3 −2 ) | % 6 |
| D *( 3.2 −3 ) | % 1 |

**جدول رقم (9) انخفاض قيم الرطوبة الطبيعية للتربة على عمق ( 0.75 ) m مع الاقتراب الوتد الكلسي**

**تجربة الرطوبة الطبيعية على عمق ( 2.5 ) m :**

يمثل الشكل رقم (64 ) المبين أدناه تغير قيم الرطوبة الطبيعية على عمق 2.5 متر مع البعد عن الوتد الكلسي ومقارنتها بالرطوبة الطبيعة لعينة التربة المأخوذة من نفس العمق من المنطقة غير المتأثرة بالكلس على بعد (3) m عن السطح الخارجي للوتد الكلسي.




**شكل رقم (64) انخفاض قيم الرطوبة الطبيعية على عمق (2.5 ) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي.**

ان الشكل رقم (64) يبين أن قيم الرطوبة على عمق 2.5 متر تتناقص مع الاقتراب من الوتد الكلسي و يتلاشى أثر أوتاد الكلس على الرطوبة بعد مسافة (D * 3.7) من سطح الوتد الكلسي.

وأن المنحني المقارب الذي يبين العلاقة بين الرطوبة الطبيعية للتربة و بعدها عن السطح الخارجي للوتد الكلسي تعطى معادلته بالشكل ( $y = -4E-06x^2 + 0.0011x + 0.2193$ ) و بدرجة موثوقية 94% حيث يرمز ( X ) الى بعد العينة عن السطح الخارجي للوتد الكلسي و يرمز ( y ) الى رطوبة العينة.

إن نسب انخفاض الرطوبة مع الاقتراب من الوتد الكلسي موضحة بالجدول رقم (10) أدناه.

| المجال | النسبة المئوية لانخفاض الرطوبة |
|---|---|
| D *( 1 −0 ) | % 13 |
| D *( 2 −1 ) | % 11 |
| D *( 3 −2 ) | % 4 |
| D *( 3.7 −3 ) | % 4 |

**جدول رقم (10) انخفاض قيم الرطوبة الطبيعية للتربة على عمق ( 2.5 ) m مع الاقتراب الوتد الكلسي**

▪ تبين القيم الواردة بالجدولين رقم (9 ) و ( 10) أن فعالية أوتاد الكلس تزيد مع العمق حيث يلاحظ زيادة واضحة بنسب انخفاض الرطوبة على عمق (2.5) m مقارنة مع مثيلاتها على عمق ( 0.75 ) m , كما يلاحظ زيادة مدى انتشار أثر الكلس حول الوتد الكلسي مع العمق حيث زادت من مسافة (3.2 * D) على عمق (0.75 ) m الى مسافة (3.7 * D) على عمق (2.5 ) m . ويعود تفسير ظاهرة زيادة فعالية أوتاد الكلس وزيادة مدى انتشار أثر الكلس مع زيادة العمق إلى أن شوارد الكاليسيوم ($Ca^{++}$ ) المنتشرة من الوتد الكلسي سوف تتسرب تدريجياً مع الماء وبفعل الجاذبية باتجاه الأسفل وبالتالي يزداد تركيزها مع العمق الأمر الذي يؤدي لزيادة فعالية تقنية أوتاد الكلس المكروية في تحسين خواص التربة الغضارية الانتفاخية مع العمق .

▪ يلاحظ من الشكلين رقم ( 61 , 62 ) و الجدولين رقم ( 9 , 10 ) أن نسب انخفاض الرطوبة مع الاقتراب من الوتد الكلسي ومدى انتشار أثر الكلس افقياً حول الوتد الكلسي هي قيم صغير نسبياً , و يعود ذلك ان العينات التي أجريت عليها التجارب أخذت بعد فترة طويلة ( 520 ) يوم من تنفيذ الأوتاد الكلسية , أي بعد انتهاء التفاعلات الأساسية بين التربة و الكلس و التي تستهلك الكمية الأكبر من الماء و التي انتهت خلال الأشهر الأولى من تنفيذ الأوتاد الكلسية بالموقع .

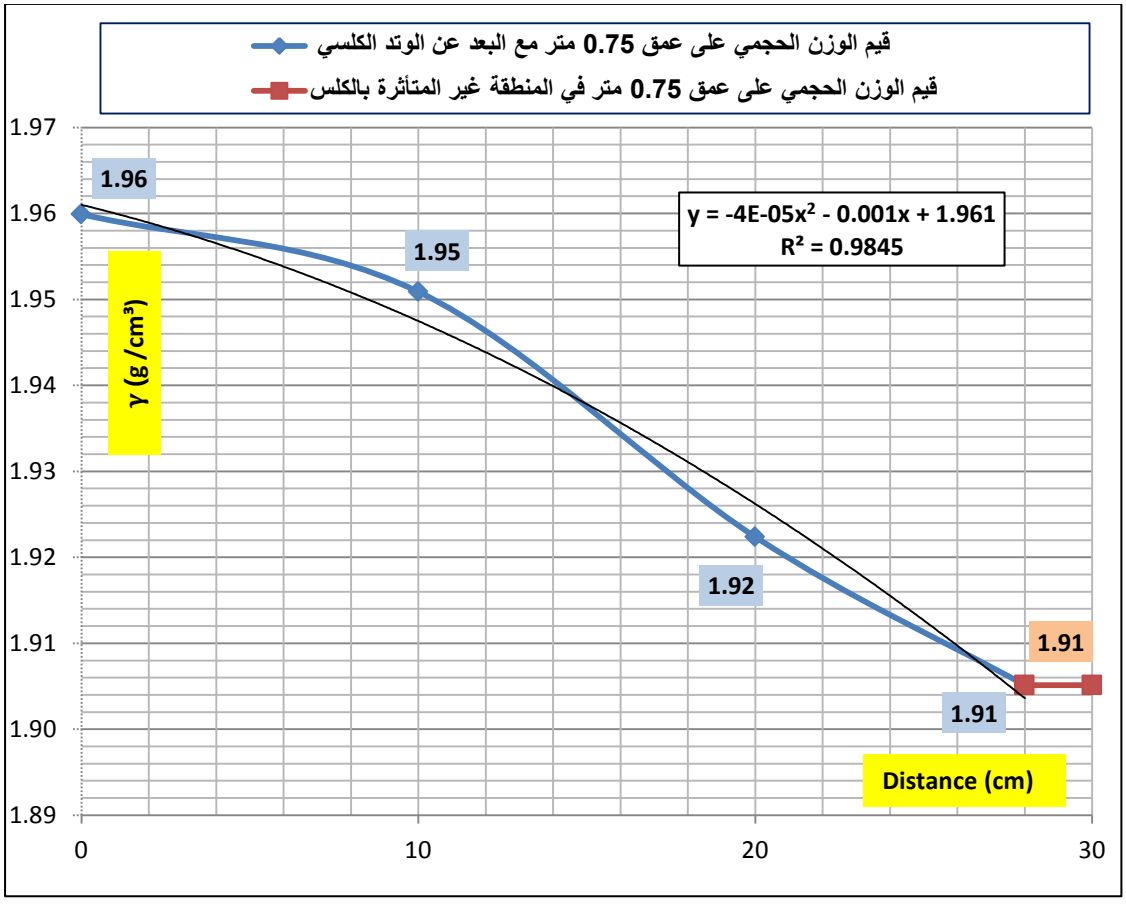
وبالتالي فان الانخفاض الحاصل برطوبة العينات مقارنة بالعينات غير المتأثرة بالكس يعود إلى التغير الذي طرأ على مواصفات التربة الغضارية المتأثرة بالكلس من حيث انخفاض شراهتها للماء وقابليتها للاحتفاظ به والى التفاعلات البوزولانية التي تستمر بالحدوث ببطء لعدة سنوات .

### 4- 2- 2 تجربة الوزن الحجمي :

يعرف الوزن الحجمي الطبيعي بأنه نسبة وزن العينة بحالتها الطبيعية الى حجم العينة, وأجريت تجربة الوزن الحجمي على عينات التربة الطبيعية غير المخربة المشمعة والمحفوظة ضمن كيس بلاستيكي محكم الإغلاق للحفاظ رطوبتها , وأجريت التجربة على ثلاث عينات وأخذ المتوسط الحسابي لها للحصول على النتيجة النهائية للوزن الحجمي .

### تجربة الوزن الحجمي على عمق ( 0.75 ) m :

يمثل الشكل رقم ( 65 ) المبين أدناه تغير قيم الوزن الحجمي على عمق ( 0.75 ) m مع البعد عن الوتد الكلسي ومقارنتها بالوزن الحجمي لعينة التربة المأخوذة من نفس العمق من المنطقة غير المتأثرة بالكلس على بعد (3) m عن السطح الخارجي للوتد الكلسي.




**شكل رقم (65) ارتفاع قيم الوزن الحجمي على عمق (0.75 ) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي .**

يبين الشكل رقم (65 ) أن قيم الوزن الحجمي على عمق ( 0.75 ) m تتزايد مع الاقتراب من الوتد الكلسي و يتلاشى أثر أوتاد الكلس على الرطوبة بعد مسافة (2.8 * D) من سطح الوتد الكلسي .

وأن المنحني المقارب الذي يبين العلاقة بين الوزن الحجمي للتربة و البعد عن السطح الخارجي للوتد الكلسي تعطى معادلته بالشكل ( $y = -4E-05x^2 - 0.001x + 1.961$ ) و بدرجة موثوقية 98% حيث يرمز ( X ) الى بعد عينة التربة عن السطح الخارجي للوتد الكلسي و يرمز ( y ) الى الوزن الحجمي للعينة .

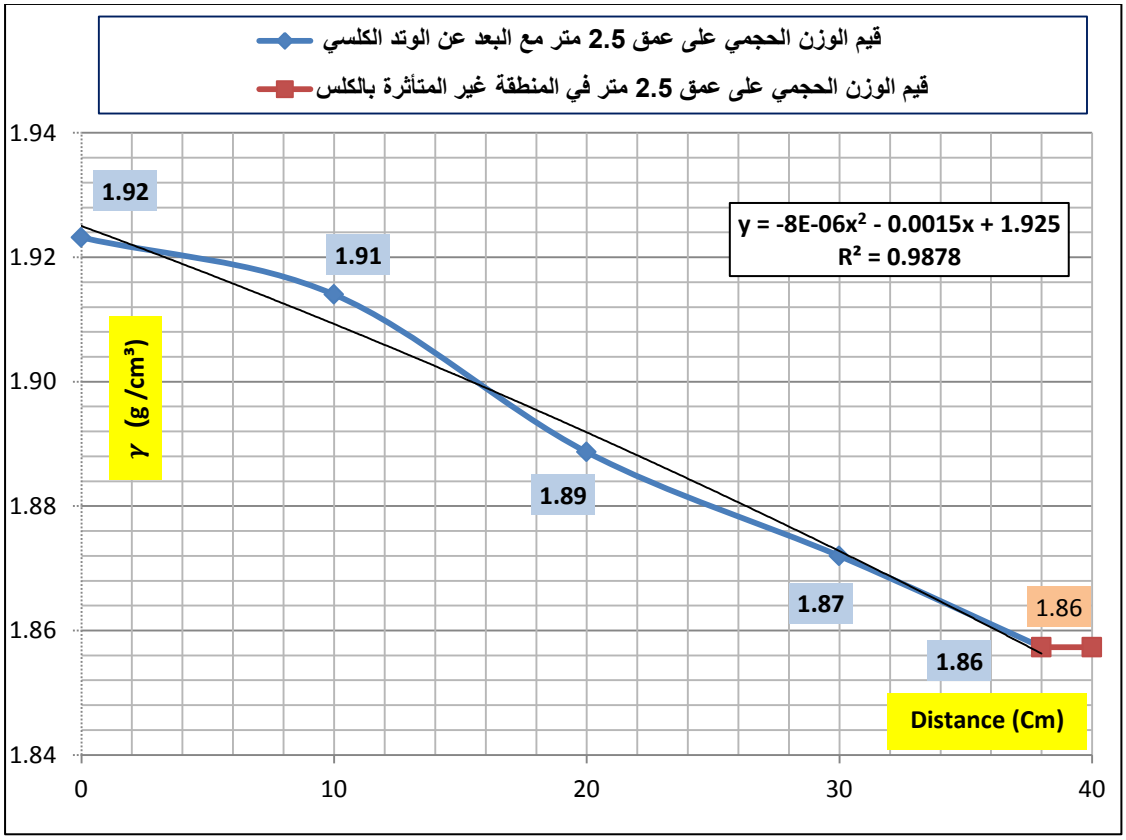
إن نسب تزايد الوزن الحجمي مع الاقتراب من الوتد الكلسي موضحة بالجدول رقم ( 11 ) أدناه.

| المجال | النسبة المئوية لتزايد الوزن الحجمي |
|---|---|
| D *( 1 −0 ) | %3 |
| D *( 2 −1 ) | %2 |
| D *( 2.8 −2 ) | %1 |

**جدول رقم (11) ارتفاع قيم الوزن الحجمي للتربة على عمق (0.75 ) m مع الاقتراب الوتد الكلسي**

### تجربة الوزن الحجمي على عمق ( 2.5 ) m :

يمثل الشكل رقم ( 66 ) المبين أدناه تغير قيم الوزن الحجمي على عمق (2.5 ) m مع البعد عن الوتد الكلسي ومقارنتها بالوزن الحجمي لعينة التربة المأخوذة من نفس العمق من المنطقة غير المتأثرة بالكلس على بعد (3) m عن السطح الخارجي للوتد الكلسي .




**شكل رقم (66) ارتفاع قيم الوزن الحجمي على عمق ( 2. 5 ) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي.**

يبين الشكل رقم (66) أن قيم الوزن الحجمي على عمق (2.5 ) m تتزايد مع الاقتراب من الوتد الكلسي ويتلاشى أثر أوتاد الكلس على الوزن الحجمي بعد مسافة (3.8 * D) من سطح الوتد الكلسي .

وأن المنحني المقارب الذي يبين العلاقة بين الوزن الحجمي للتربة و بعدها عن السطح الخارجي للوتد الكلسي تعطى معادلته بالشكل ( $y = -8E\text{-}06x^2 - 0.0015x + 1.925$ ) و بدرجة موثوقية 98% حيث يرمز ( X ) الى بعد العينة عن السطح الخارجي للوتد الكلسي , و يرمز ( y ) الى الوزن الحجمي لعينة التربة .

إن نسب تزايد الوزن الحجمي مع الاقتراب من الوتد الكلسي موضحة بالجدول رقم (13 ) أدناه.

| المجال | النسبة المئوية لتزايد الوزن الحجمي |
|---|---|
| D *( 1 –0 ) | % 3 |
| D *( 2 –1 ) | % 2.6 |
| D *( 3 –2 ) | % 1.5 |
| D *( 3.8 –3 ) | % 0.5 |

**جدول رقم (12) ارتفاع قيم الوزن الحجمي للتربة على عمق (2.5 ) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي**

- ويعود تفسير حدوث زيادة بالوزن الحجمي للتربة الغضارية المدروسة بعد معالجتها بأوتاد الكلس الى أن أكسيد الكالسيوم ( $CaO$) يمتص الماء من التربة المحيطة بالوتد الكلسي بنسبة ( 1.3 ) و ويتحول ماءات الكالسيوم حيث ينتفخ ويزيد حجمه حوالي مرتين تقريباً [ 6 ] , إن امتصاص الماء من التربة المجاورة للوتد الكلسي وزيادة حجم الكلس تؤدي الى حدوث ارتصاص للتربة في محيط الوتد الكلسي وزيادة اكتنازها مما يزيد وزن التربة في واحدة الحجم .

إن ارتصاص التربة الناتج عن زيادة حجم الكلس لدى امتصاصه الماء من التربة المحيطة و تحوله الى ماءات الكالسيوم هي عملية ميكانيكية , لذلك تبقى آثارها محدودة الانتشار في طبقات التربة القريبة من السطح الخارجي للوتد الكلسي وهو ما يفسر انتشار أثر الكلس على الوزن الحجمي لمسافة (3.8 * D) كحد أقصى الأمر الذي اتؤكده أيضاً نتائج تجربة الرطوبة السابقة .

- تبين القيم الواردة بالجدولين رقم (11) و (12) أعلاه أن فعالية أوتاد الكلس تزيد مع العمق حيث يلاحظ ارتفاع بنسب زيادة الوزن الحجمي على عمق (2.5) m مقارنة مع مثيلاتها على عمق ( 0.75 ) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي , كما يلاحظ زيادة مدى انتشار أثر الكلس على الوزن الحجمي للتربة حول الوتد الكلسي مع العمق حيث زادت من مسافة انتشار الأثر من

(D * 2.8) على عمق ( 0.75) m الى مسافة (D * 3.8) على عمق ( 2.5) m .

ويعود تفسير ظاهرة زيادة فعالية أوتاد الكلس وزيادة مدى انتشار أثر الكلس على الوزن الحجمي مع زيادة العمق إلى أن شوارد الكاليسيوم ( $Ca^{++}$ ) المنتشرة من الوتد الكلسي سوف تتسرب تدريجياً مع الماء وبفعل الجاذبية باتجاه الأسفل وبالتالي يزداد تركيزها مع العمق الأمر الذي يؤدي لزيادة فعالية تقنية أوتاد الكلس المكروية في تحسين خواص التربة الغضارية الانتفاخية مع العمق .

### 4-2-3 الوزن الحجمي الجاف:

إن الوزن الحجمي الجاف من المواصفات الفيزيائية الحسابية للتربة ويحسب وفق العلاقة التالية $\gamma d = \gamma/(1+w)$ حيث :

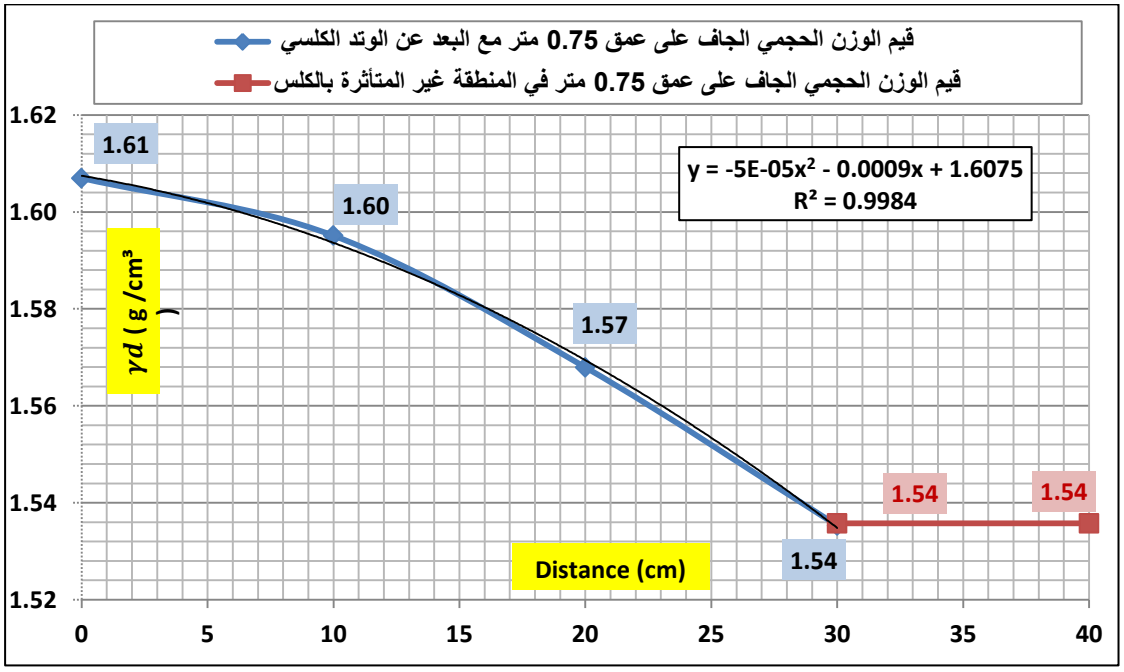
$\gamma d$ : الوزن الحجمي الجاف للتربة ( g /cm³ )

$\gamma$ : الوزن الحجمي الطبيعي للتربة ( g /cm³ )

$w$ : رطوبة العينة %

**الوزن الحجمي الجاف على عمق ( 0.75 ) m :**

يمثل الشكل رقم (67 ) المبين أدناه تغير قيم الوزن الحجمي الجاف على عمق ( 0.75 ) m مع البعد عن الوتد الكلسي ومقارنتها بالوزن الحجمي الجاف لعينة التربة المأخوذة من نفس العمق من المنطقة غير المتأثرة بالكلس على بعد (3) m عن السطح الخارجي للوتد الكلسي.




**شكل رقم (67) ارتفاع قيم الوزن الحجمي الجاف على عمق ( 0.75) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي.**

يبين الشكل رقم ( 67 ) أن قيم الوزن الحجمي الجاف للتربة المعالجة بأوتاد الكلس على عمق ( 0.75 ) m تتزايد مع الاقتراب من الوتد الكلسي و يتلاشى أثر أوتاد الكلس على الوزن الحجمي الجاف بعد مسافة (3 * D) من سطح الوتد الكلسي .

إن المنحني المقارب الذي يبين العلاقة بين الوزن الحجمي الجاف للتربة و البعد عن السطح الخارجي للوتد الكلسي تعطى معادلته بالشكل ( $y = -5E-05x^2 - 0.0009x + 1.6075$ ) و بدرجة موثوقية 99.8 % حيث يرمز ( X ) الى بعد عينة التربة عن السطح الخارجي للوتد الكلسي و يرمز ( y ) الى الوزن الحجمي الجاف للعينة .

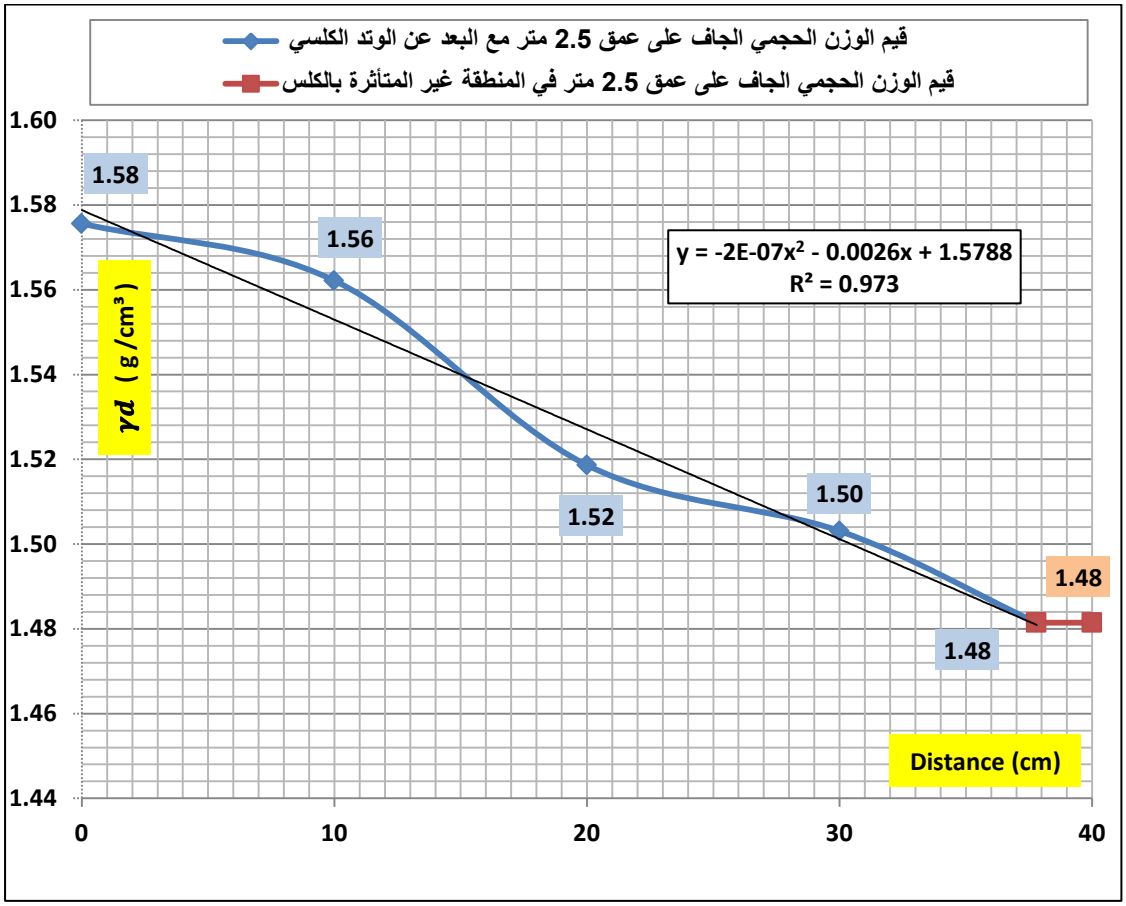
إن نسب تزايد الوزن الحجمي الجاف مع الاقتراب من الوتد الكلسي موضحة بالجدول رقم (13) المبين أدناه .

| المجال | النسبة المئوية لتزايد الوزن الحجمي الجاف |
|---|---|
| D *( 1 −0 ) | % 4.6 |
| D *( 2 −1 ) | % 3.9 |
| D *(3 −2 ) | % 2 |

**جدول رقم (13) ارتفاع قيم الوزن الحجمي الجاف للتربة على عمق ( 0.75 ) m مع الاقتراب الوتد الكلسي.**

**الوزن الحجمي الجاف على عمق ( 2.5 ) m :**

يبين الشكل رقم (68 ) أدناه تغير قيم الوزن الحجمي الجاف على عمق (2.5) m مع البعد عن الوتد الكلسي ومقارنتها بالوزن الحجمي الجاف لعينة التربة المأخوذة من نفس العمق من المنطقة غير المتأثرة بالكلس على بعد (3) m عن السطح الخارجي للوتد الكلسي.




**شكل رقم (68) ارتفاع قيم الوزن الحجمي الجاف على عمق ( 2. 5 ) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي.**

يبين الشكل رقم (68 ) أن قيم الوزن الحجمي**الجاف** على عمق (2.5) m تتزايد مع الاقتراب من الوتد الكلسي ويتلاشى أثر أوتاد الكلس على الرطوبة بعد مسافة (3.8 * D) من السطح الخارجي للوتد الكلسي . وأن المنحني المقارب الذي يبين العلاقة بين الوزن الحجمي**الجاف** للتربة و بعدها عن السطح الخارجي للوتد الكلسي تعطى معادلته بالشكل ( $y = -2E-07x^2 - 0.0026x + 1.5788$ ) و بدرجة موثوقية 97 % حيث يرمز ( X ) إلى بعد العينة عن السطح الخارجي للوتد الكلسي و يرمز ( y ) الى الوزن الحجمي الجاف للعينة .

إن نسب تزايد الوزن الحجمي الجاف مع الاقتراب من الوتد الكلسي موضحة بالجدول رقم (15 ) المبين أدناه .

| المجال | النسبة المئوية لتزايد الوزن الحجمي الجاف |
|---|---|
| D *( 1 −0 ) | % 7 |
| D *( 2 −1 ) | % 5 |
| D *( 3 −2 ) | % 3 |
| D *( 3.8 −3 ) | % 1.4 |

**جدول رقم (14) ارتفاع قيم الوزن الحجمي الجاف للتربة على عمق ( 2.5 ) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي.**

▪ يعود تفسير حدوث زيادة بالوزن الحجمي الجاف للتربة الغضارية المدروسة بعد معالجتها بأوتاد الكلس الى الزيادة الحاصلة بالوزن الحجمي الطبيعي والنقصان الحاصل برطوبة عينات التربة مع الاقتراب من الوتد الكلسي.

▪ تبين القيم الواردة بالجدولين رقم (13 ) و (14 ) أن فعالية أوتاد الكلس تزيد مع العمق حيث يلاحظ زيادة واضحة بنسب تزايد الوزن الحجمي الجاف على عمق (2.5 ) m مقارنة مع مثيلاتها على عمق (0.75 ) m , كما يلاحظ أيضاً زيادة مدى انتشار أثر الكلس على الوزن الحجمي الجاف للتربة حول الوتد الكلسي من مسافة (3 * D) على عمق ( 0.75 ) m إلى مسافة (3.8 * D) على عمق ( 2.5 ) m .

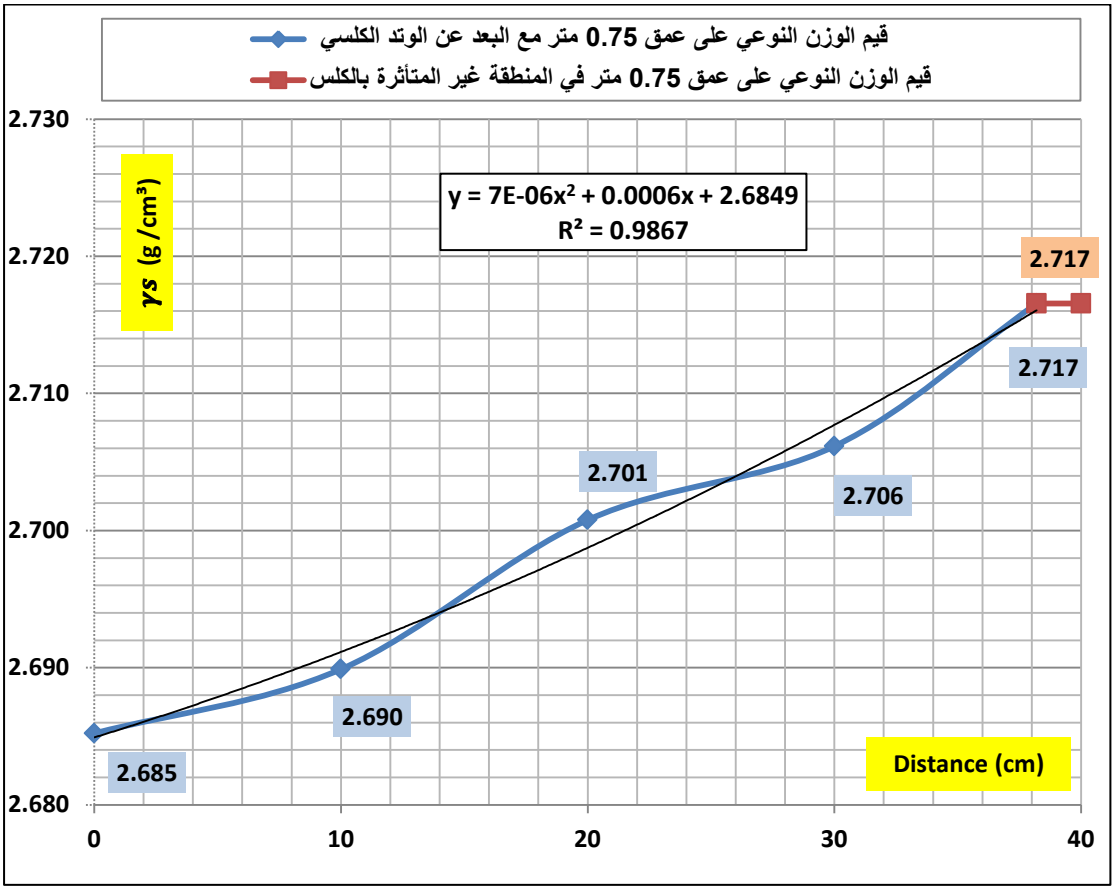
يعود تفسير ظاهرة زيادة فعالية أوتاد الكلس وزيادة مدى انتشار أثر الكلس على الوزن الحجمي الجاف مع زيادة العمق إلى ذات الأسباب التي أشرنا لها سابقاً و المتمثلة بتسرب شوارد الكاليسيوم ($Ca^{++}$ ) المنتشرة من الوتد الكلسي تدريجياً مع الماء وبفعل الجاذبية باتجاه الأسفل الأمر الذي يزيد من تركيزها مع العمق و يؤدي لزيادة فعالية تقنية أوتاد الكلس المكروية في تحسين خواص التربة الغضارية الانتفاخية مع زيادة العمق .

### 4- 2- 4 تجربة الوزن النوعي ASTM- D 854 - 92 :

يعرف الوزن النوعي على أنه وزن المادة الصلبة منسوباً الى حجم المادة الصلبة , و بالتالي فإنه من المعلوم مسبقاً أن تأثير أوتاد الكلس على الوزن النوعي للتربة سيكون بسيط جداً , و لكن نظراً لأن لأهمية هذه التجربة و كونها تدخل في حسابات خواص حسابية أخرى للتربة كالمسامية و غيرها كان لابد من اجراء هذه التجربة على كافة العينات المأخوذة من العمقين المذكورين سابقاً.

### تجربة الوزن النوعي على عمق (0.75) m :

يبين الشكل رقم ( 69 ) أدناه تغير قيم الوزن النوعي على عمق ( 0.75 ) m مع البعد عن الوتد الكلسي ومقارنتها بالوزن النوعي لعينة التربة المأخوذة من نفس العمق من المنطقة غير المتأثرة بأوتاد الكلس على بعد (3) m عن السطح الخارجي للوتد الكلسي.




**شكل رقم (69) انخفاض قيم الوزن النوعي للتربة على عمق (0.75) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي.**

يبين الشكل رقم (69) أن قيم الوزن النوعي على عمق (0.75 ) m تتناقص مع الاقتراب من الوتد الكلسي و يتلاشى أثر أوتاد الكلس على الوزن النوعي بعد مسافة (3.8 * D) من السطح الخارجي للوتد الكلسي . وأن المنحني المقارب الذي يمثل العلاقة بين الوزن النوعي للتربة و بعدها عن السطح الخارجي للوتد الكلسي تعطى معادلته كالتالي ( $y = 7E-06x^2 + 0.0006x +$ 2.6849 ) و بدرجة موثوقية 98 % حيث يرمز ( X ) الى بعد العينة عن السطح الخارجي للوتد الكلسي بينما يرمز ( y ) الى الوزن النوعي للعينة .

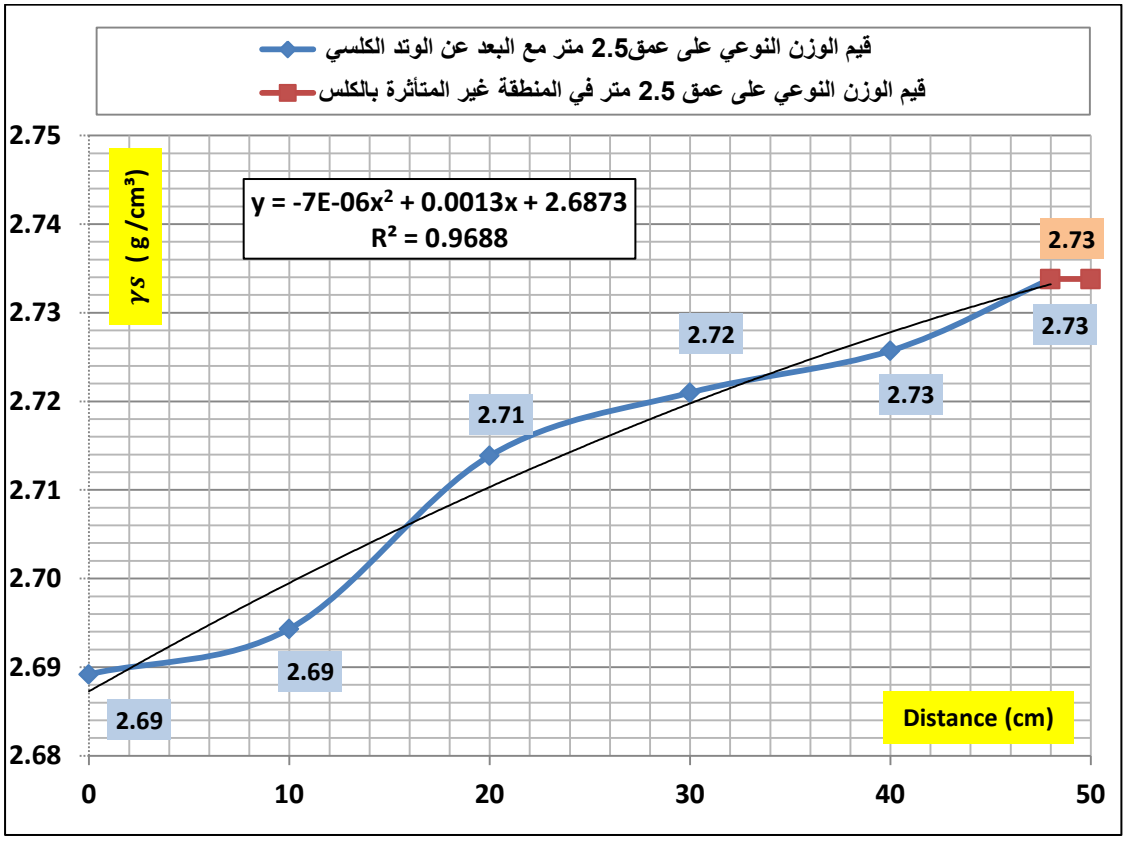
إن نسب انخفاض الوزن النوعي للتربة مع الاقتراب من السطح الخارجي للوتد الكلسي موضحة بالجدول رقم (15 ) المبين أدناه.

| المجال | النسبة المئوية لانخفاض الوزن النوعي |
|---|---|
| D *( 1 −0 ) | % 1.2 |
| D *( 2 −1 ) | % 1 |
| D *( 3 −2 ) | % 0.6 |
| D *( 3.8 −3 ) | % 0.4 |

**جدول رقم (15) انخفاض قيم الوزن النوعي للتربة على عمق ( 0.75 ) m مع الاقتراب الوتد الكلسي**

**تجربة الوزن النوعي على عمق (2.5) m :**

يمثل الشكل رقم (70) أدناه تغير قيم الوزن النوعي على عمق (2.5 ) m مع البعد عن الوتد الكلسي ومقارنتها بالوزن النوعي لعينة التربة المأخوذة من نفس العمق من المنطقة غير المتأثرة بالكلس على بعد (3) m عن السطح الخارجي للوتد الكلسي.




**شكل رقم (70) انخفاض قيم الوزن النوعي للتربة على عمق (2.5) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي.**

يبين الشكل رقم (70) أن قيم الوزن النوعي على عمق ( 2.5 ) m تتناقص مع الاقتراب من الوتد الكلسي ويتلاشى أثر أوتاد الكلس على الوزن النوعي بعد مسافة (D * 4.8) من سطح الوتد الكلسي .

إن المنحني المقارب الذي يمثل العلاقة بين الوزن النوعي للتربة و بعدها عن السطح الخارجي للوتد الكلسي تعطى معادلته بالشكل ( $y = -7E-06x^2 + 0.0013x + 2.6873$ ) و بدرجة موثوقية 97 % حيث يرمز ( X ) الى بعد العينة عن السطح الخارجي للوتد الكلسي بينما يرمز ( y ) الى الوزن النوعي لعينة التربة .

إن نسب انخفاض الوزن النوعي مع الاقتراب من الوتد الكلسي موضحة بالجدول رقم ( 16 ) المبين أدناه .

| المجال | النسبة المئوية لانخفاض الوزن النوعي |
|---|---|
| D *( 1 −0 ) | % 1.6 |
| D *( 2 −1 ) | % 1.5 |
| D *( 3 −2 ) | % 0.7 |
| D *( 4 −3 ) | % 0.5 |
| D *( 4.8 −4 ) | % 0.3 |

**جدول رقم (16) انخفاض قيم الوزن النوعي للتربة على عمق ( 2.5 ) m مع الاقتراب الوتد الكلسي.**

▪ تبين القيم الواردة بالجدولين رقم (15) و (16) أن فعالية أوتاد الكلس تزيد مع العمق حيث يلاحظ زيادة نسب انخفاض قيم الوزن النوعي على عمق (2.5) m مقارنة مع مثيلاتها على عمق (0.75 ) m , كما يلاحظ زيادة مدى انتشار أثر أوتاد الكلس أفقياً حول الوتد الكلسي من مسافة (3.8 *D) على عمق ( 0.75 ) m الى مسافة (4.8 * D) على عمق (2.5 ) m .

يعود تفسير ظاهرة زيادة فعالية أوتاد الكلس وزيادة مدى انتشار أثر الكلس على الوزن النوعي للتربة مع زيادة العمق إلى ذات الأسباب التي أشرنا لها سابقاً و المتمثلة بتسرب شوارد الكاليسيوم ($Ca^{++}$ ) المنتشرة من الوتد الكلسي تدريجياً مع الماء وبفعل الجاذبية باتجاه الأسفل الأمر الذي يزيد من تركيزها مع العمق و يؤدي لزيادة فعالية تقنية أوتاد الكلس المكروية في تحسين خواص التربة الغضارية الانتفاخية مع زيادة العمق .

ويجدر التنويه أن تأثير أوتاد الكلس على قيم الوزن النوعي للتربة الغضارية الانتفاخية محدود جداً حيث تشير القيم الواردة بالجدولين رقم (15) و (16) سابقي الذكر إلى أن نقصان قيم الوزن النوعي للتربة الغضارية الانتفاخية نتيجة معالتها بأوتاد الكلس يكون بنسب صغيرة جداً ليست ذات معنى .

▪ يعود تفسير حدوث انخفاض بالوزن النوعي للتربة الغضارية المدروسة بعد معالجتها بأوتاد الكلس الى زيادة حجم الجزيئات الصلبة للتربة نتيجة ظاهرة التبادل الأيوني ( Ion Exchange ) والتلبد (Flocculation ) و التكتل ( Agglomeration ) الناتجة عن تفاعل التربة مع الكلس , حيث أن السطوح الخارجية للذرات الغضارية الناعمة ذات شحنات سالبة مما يجعل هذه السطوح تجذب اليها أيونات الكالسيوم ذات الشحنات الموجبة ( ++Ca) المتحررة من ماءات الكالسيوم, الأمر الذي يؤدي بدوره إلى تجمع وارتباط ذرات الغضار مع

بعضها البعض و بالتالي زيادة حجمها , ويساهم بذلك الوسط القلوي الناشئ عن هجرة أيونات الكالسيوم من الوتد الكلسي والذي يزيد من سرعة ومستوى انحلال سليكات الألمنيوم التي تعمل كمنتجات اسمنتية مائية رابطة تزيد من ارتباط وتكتل وتجمع ذرات الغضار مع بعضها البعض.

### 4-2-5 المسامية الابتدائية :

إن المسامية الابتدائية من المواصفات الفيزيائية الحسابية للتربة وتعطى فق العلاقة التالية حيث: $e0 = (\gamma s - \gamma d)/\gamma d$

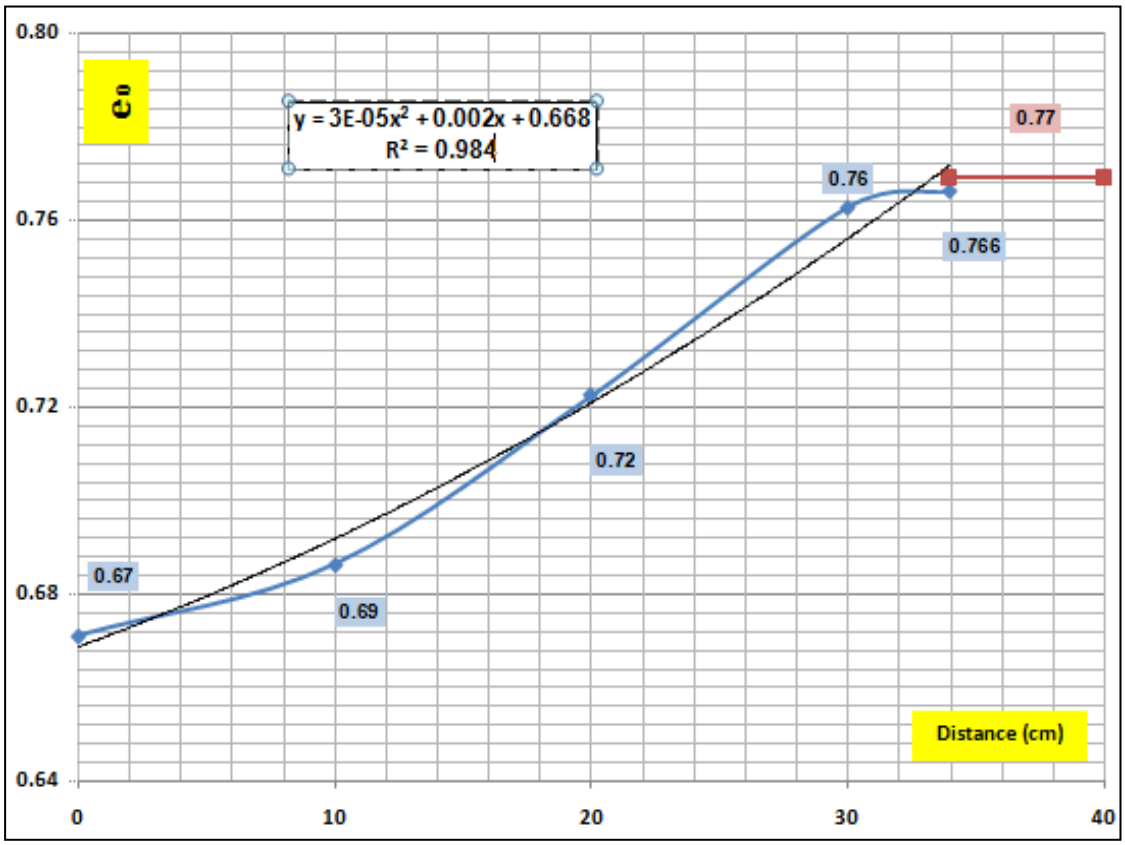
$e_0$ : المسامية الابتدائية للتربة.

$\gamma s$ : الوزن النوعي للتربة ( $g/cm^3$ ) .

$\gamma d$ : الوزن الحجمي الجاف للتربة ( $g/cm^3$ ) .

**المسامية الابتدائية على عمق ( 0.75 ) m :**

يمثل الشكل رقم (71) المبين أدناه تغير قيم المسامية الابتدائية على عمق (0.75 ) m مع البعد عن الوتد الكلسي ومقارنتها بقيمة المسامية الابتدائية لعينة التربة المأخوذة من نفس العمق من المنطقة غير المتأثرة بالكلس على بعد (3) m عن السطح الخارجي للوتد الكلسي.




**شكل رقم (71) انخفاض قيم المسامية الابتدائية على عمق (0.75) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي.**

يتبين من الشكل رقم (71) أن قيم المسامية الابتدائية على عمق (0.75 ) m تنخفض مع الاقتراب من الوتد الكلسي ويتلاشى أثر أوتاد الكلس على المسامية الابتدائية بعد مسافة (3.4 * D) من سطح الوتد الكلسي .

إن المنحني المقارب الذي يمثل العلاقة بين المسامية الابتدائية للتربة و البعد عن السطح الخارجي للوتد الكلسي تعطى معادلته بالشكل ( $y = 3E\text{-}05x^2 + 0.002x + 0.6687$ ) و بدرجة موثوقية 98 % , حيث يرمز (X) الى بعد عينة التربة عن السطح الخارجي للوتد الكلسي بينما يرمز ( y ) الى المسامية الابتدائية للعينة .

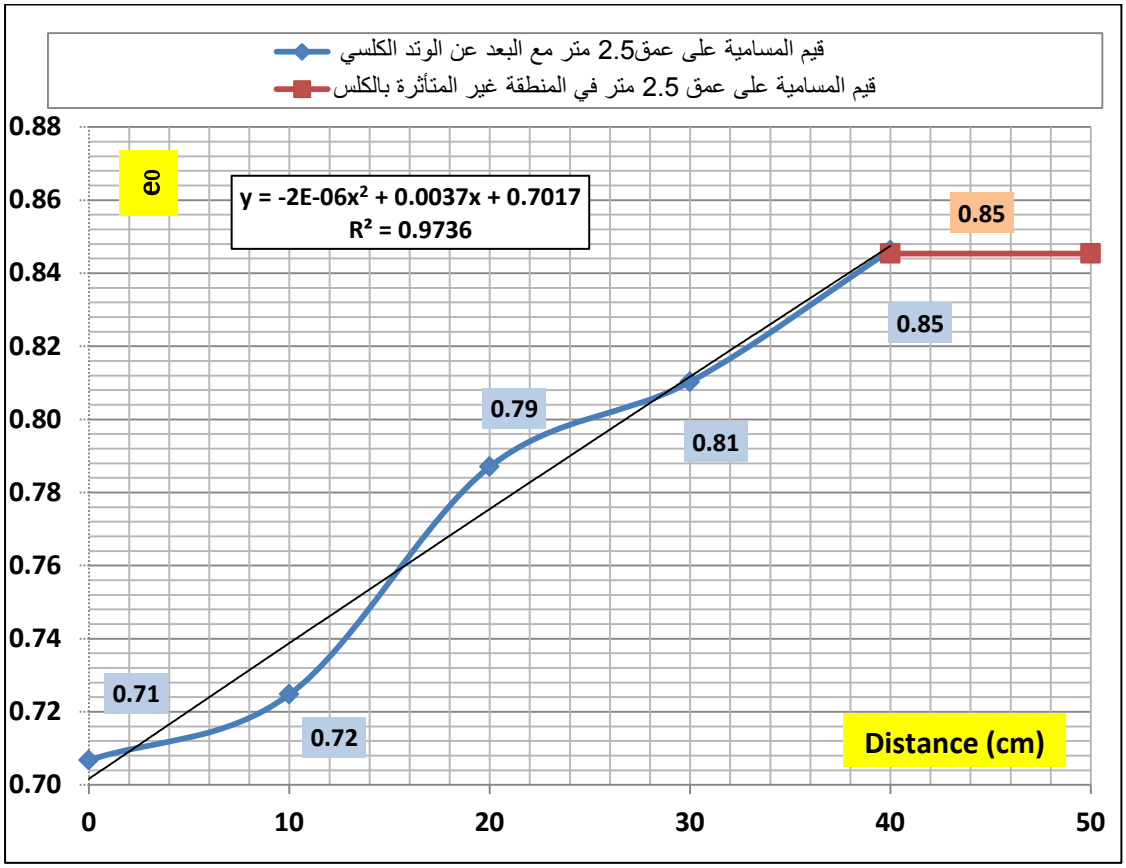
إن نسب انخفاض المسامية الابتدائية مع الاقتراب من الوتد الكلسي موضحة بالجدول رقم ( 17 ) المبين أدناه.

| المجال | النسبة المئوية لانخفاض المسامية الابتدائية |
|---|---|
| D *( 1 −0 ) | %13 |
| D *( 2 −1 ) | %10 |
| D *(3 −2 ) | %6.5 |
| D *(3.4 −3 ) | %1.3 |

**جدول رقم (17) انخفاض قيم المسامية الابتدائية على عمق (0.75 ) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي .**

**المسامية الابتدائية على عمق ( 2.5 ) m :**

يمثل الشكل رقم (72 ) المبين أدناه تغير قيم المسامية الابتدائية على عمق (2.5) m مع البعد عن الوتد الكلسي ومقارنتها بقيمة المسامية الابتدائية لعينة التربة المأخوذة من نفس العمق من المنطقة غير المتأثرة بالكلس على بعد (3) m عن السطح الخارجي للوتد الكلسي.




**شكل رقم (72) انخفاض قيم المسامية الابتدائية على عمق (2.5 ) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي.**

يتبين من الشكل رقم (72) أن قيم المسامية الابتدائية على عمق ( 2.5 ) m تنخفض مع الاقتراب من الوتد الكلسي ويتلاشى أثر أوتاد الكلس على المسامية الابتدائية بعد مسافة (4* D) من السطح الخارجي للوتد الكلسي.

إن المنحني المقارب الذي يمثل العلاقة بين المسامية الابتدائية للتربة و بعدها عن السطح الخارجي للوتد الكلسي تعطى معادلته بالشكل ( $y = -2E-06x^2 + 0.0037x + 0.7017$ ) و بدرجة موثوقية 97% , حيث يرمز ( X ) الى بعد العينة عن السطح الخارجي للوتد الكلسي بينما يرمز ( y ) الى المسامية الابتدائية للعينة .

إن نسب انخفاض المسامية الابتدائية للتربة مع الاقتراب من الوتد الكلسي موضحة بالجدول رقم (18 ) المبين أدناه.

| المجال | النسبة المئوية لانخفاض المسامية الابتدائية |
|---|---|
| D *( 1 −0 ) | % 16.5 |
| D *( 2 −1 ) | % 15.3 |
| D *( 3 −2 ) | % 7 |
| D *(4 −3 ) | % 4.7 |

**جدول رقم (18) انخفاض قيم المسامية الابتدائية على عمق ( 2.5 ) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي .**

▪ يعود تفسير حدوث انخفاض في قيم المسامية الابتدائية للتربة الغضارية المدروسة بعد معالجتها بأوتاد الكلس الى الزيادة الحاصلة بالوزن الحجمي الجاف والنقصان الحاصل بالوزن النوعي لعينات التربة مع الاقتراب من الوتد الكلسي.

▪ تبين القيم الواردة بالجدولين رقم (17 ) و (18 ) أن فعالية أوتاد الكلس تزيد مع العمق حيث يلاحظ زيادة واضحة بنسب انخفاض المسامية الابتدائية على عمق ( 2.5 ) m مقارنة مع مثيلاتها على عمق ( 0.75 ) m , كما يلاحظ زيادة مدى انتشار أثر الكلس على المسامية الابتدائية للتربة حول الوتد الكلسي من مسافة (3.4 * D) على عمق (0.75) m الى مسافة (4* D) على عمق ( 2.5 ) m .

▪ يعود تفسير ظاهرة زيادة فعالية أوتاد الكلس وزيادة مدى انتشار أثر الكلس على المسامية الابتدائية للتربة مع زيادة العمق إلى ذات الأسباب التي أشرنا لها سابقاً و المتمثلة بتسرب شوارد الكاليسيوم ($Ca^{++}$ ) المنتشرة من الوتد الكلسي تدريجياً مع الماء وبفعل الجاذبية باتجاه الأسفل الأمر الذي يزيد من تركيزها مع العمق و يؤدي لزيادة فعالية تقنية أوتاد الكلس المكروية في تحسين خواص التربة الغضارية الانتفاخية مع زيادة العمق .

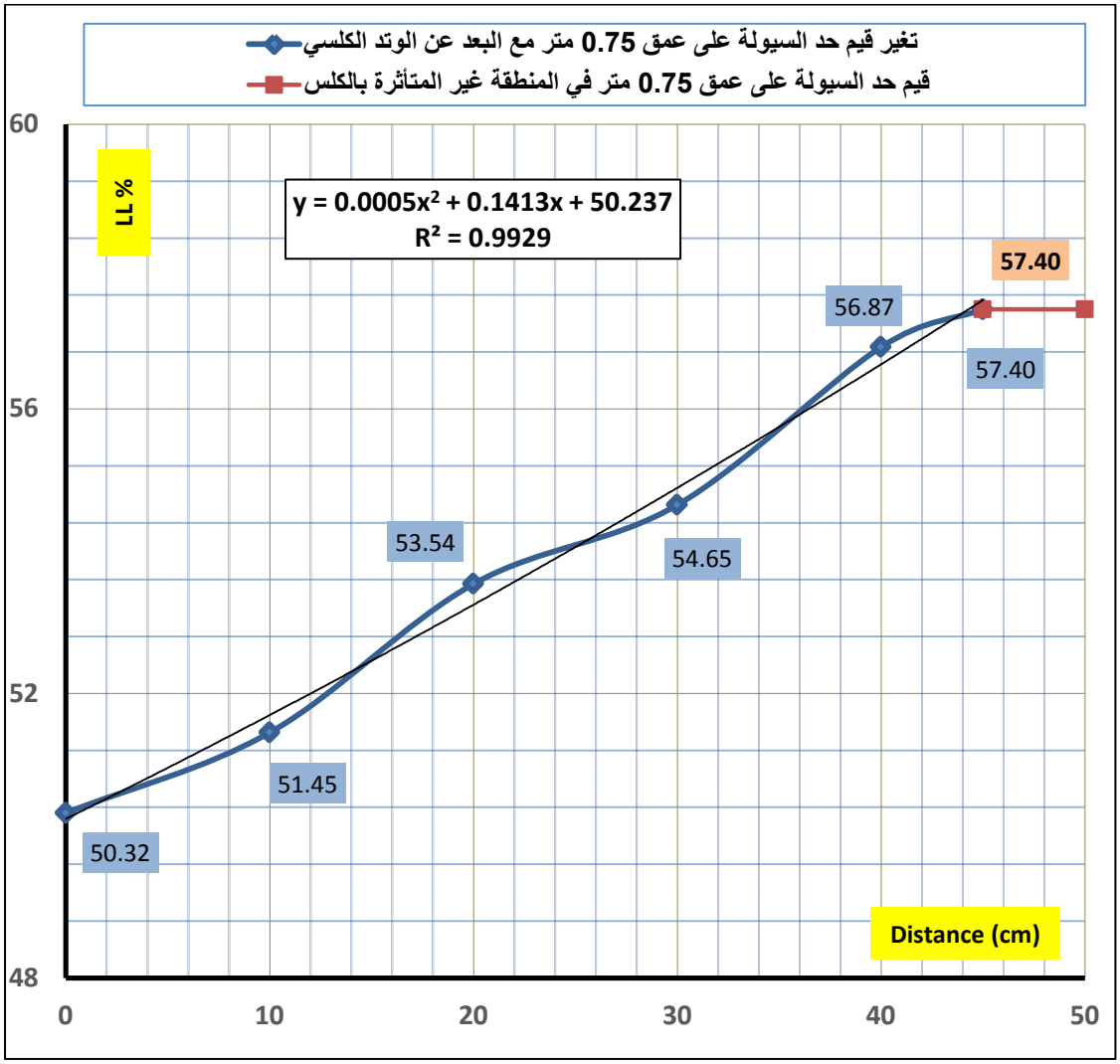
### 4- 2- 6 حدود اتربرغ ASTM- D 4318 - 93

### 4- 2-6-1 تجربة حد السيولة :

أجريت تجارب حد السيولة باستخدام جهاز كازاغراندي **في مخبر ميكانيك التربة في كلية الهندسة المدنية بدمشق.**

**تجربة حد السيولة على عمق (0.75 ) m :**

يمثل الشكل رقم ( 73 ) المبين أدناه تغير قيم حد السيولة على عمق 0.75 متر مع البعد عن الوتد الكلسي ومقارنتها بقيمة حد السيولة لعينة التربة المأخوذة من نفس العمق من المنطقة غير المتأثرة بالكلس على بعد (3) m عن السطح الخارجي للوتد الكلسي .




**شكل رقم (73) انخفاض قيم حد السيولة على عمق ( 0.75 ) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي.**

يبين الشكل رقم (73 ) أن قيم حد السيولة على عمق 0.75 متر تنخفض مع الاقتراب من الوتد الكلسي ويتلاشى أثر أوتاد الكلس على حد السيولة بعد مسافة (D * 4.5) من السطح الخارجي للوتد الكلسي.

إن المنحني المقارب الذي يمثل العلاقة بين حد السيولة للتربة و البعد عن السطح الخارجي للوتد الكلسي تعطى معادلته بالشكل ( $y = 0.0005x^2 + 0.1413x + 50.237$ ) و بدرجة موثوقية 99% حيث يرمز ( X ) إلى بعد عينة التربة عن السطح الخارجي للوتد الكلسي بينما يرمز ( y ) الى حد السيولة لعينة التربة .

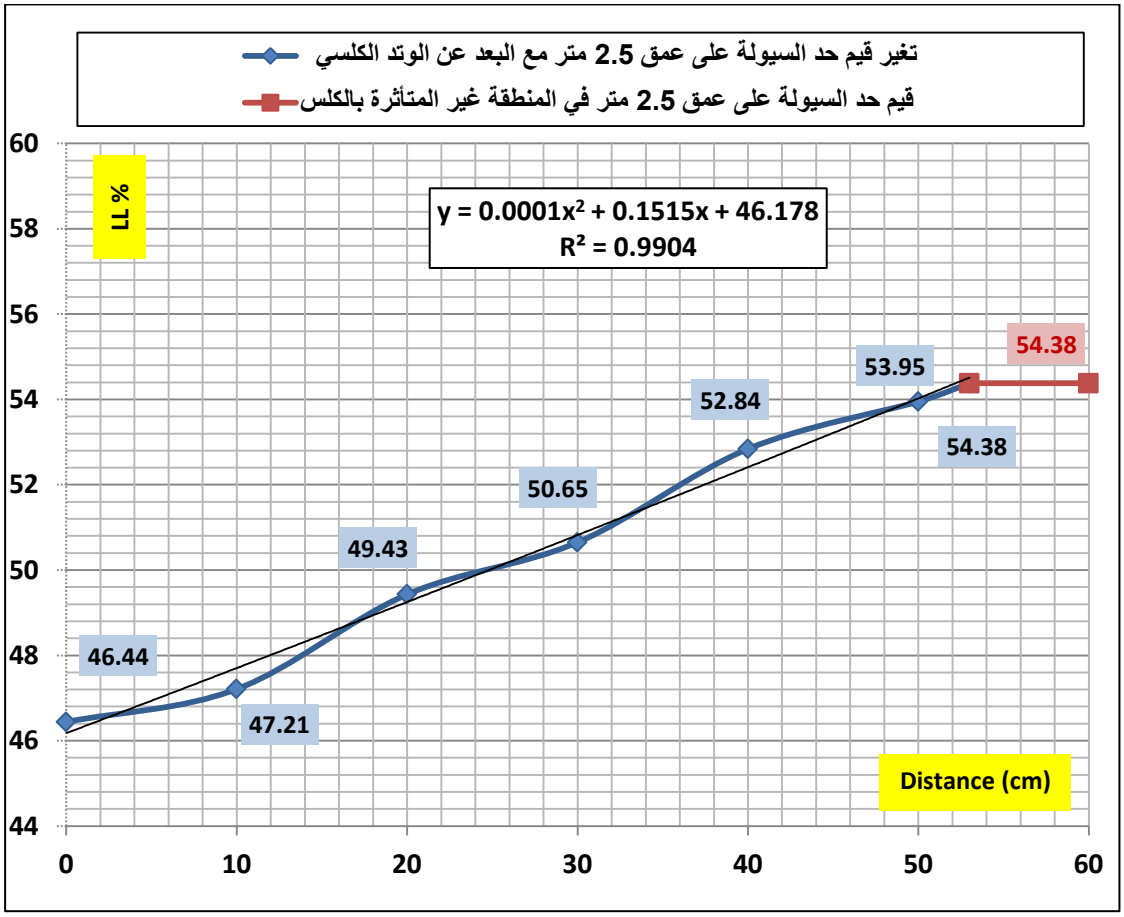
إن نسب انخفاض حد السيولة مع الاقتراب من الوتد الكلسي موضحة بالجدول رقم ( 19 ) المبين أدناه .

| المجال | النسبة المئوية لانخفاض حد السيولة |
|---|---|
| D *( 1 −0 ) | % 12.3 |
| D *( 2 −1 ) | % 10.4 |
| D *(3 −2 ) | % 6.7 |
| D *(4 −3 ) | % 4.8 |
| D *(4.5 −4 ) | % 1 |

**جدول رقم (19) انخفاض قيم حد السيولة على عمق (0.75) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي.**

**تجربة حد السيولة على عمق (2.5) m :**

يمثل الشكل رقم ( 74 ) المبين أدناه تغير قيم حد السيولة على عمق 2.5 متر مع البعد عن الوتد الكلسي ومقارنتها بقيمة حد السيولة لعينة التربة المأخوذة من نفس العمق من المنطقة غير المتأثرة بالكلس على بعد (3) m عن السطح الخارجي للوتد الكلسي .




**شكل رقم (74) انخفاض قيم حد السيولة على عمق ( 2. 5 ) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي.**

يبين الشكل رقم (74) أن قيم حد السيولة على عمق (2.5 ) m تنخفض مع الاقتراب من الوتد الكلسي ويتلاشى أثر أوتاد الكلس على حد السيولة بعد مسافة (5.3* D) من السطح الخارجي للوتد الكلسي.

إن المنحني المقارب الذي يمثل العلاقة بين حد السيولة للتربة و بعدها عن السطح الخارجي للوتد الكلسي تعطى معادلته بالشكل ( $y = 0.0001x^2 + 0.1515x + 46.178$ ) و بدرجة موثوقية 99% حيث يرمز (X) الى بعد العينة عن السطح الخارجي للوتد الكلسي بينما يرمز ( y ) الى قيم حد السيولة للعينة . إن نسب انخفاض قيم حد السيولة للتربة مع الاقتراب من الوتد الكلسي موضحة بالجدول رقم (20) المبين أدناه.

| المجال | النسبة المئوية لانخفاض حد السيولة |
|---|---|
| D *( 1 −0 ) | % 14.6 |
| D *( 2 −1 ) | % 13.2 |
| D *( 3 −2 ) | % 9.1 |
| D *(4 −3 ) | % 6.9 |
| D *(5 −4 ) | % 2.8 |
| D *(5.3 −5 ) | % 0.8 |

**جدول رقم (20) انخفاض قيم حد السيولة على عمق ( 2.5 ) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي .**

- إن حدوث انخفاض في قيم حد السيولة للتربة الغضارية المدروسة بعد معالجتها بأوتاد الكلس هو دليل على التحسن الذي طرأ على خواص التربة الغضارية , ويعود تفسيرهالى ظاهرة تبادل الأيونات ( الكاتيونات ) التي تؤدي الى نقصان سماكة الأغشية المائية المحيطة بذرات الغضار , فتنخفض شراهة التربة الغضارية للماء وتقل أيضا قابليتها للاحتفاظ به.
- تبين القيم الواردة بالجدولين رقم (19) و (20) ان فعالية أوتاد الكلس تزيد مع العمق حيث يلاحظ زيادة واضحة بنسب انخفاض حد السيولة على عمق (2.5 ) m مقارنة مع مثيلاتها على عمق (0.75 ) m , كما يلاحظ زيادة مدى انتشار أثر الكلس حول الوتد الكلسي على حد السيولة من مسافة (4.5 * D) على عمق ( 0.75 ) m الى مسافة (5.3* D) على عمق (2.5 ) m , ويعود تفسير ظاهرة زيادة فعالية أوتاد الكلس وزيادة مدى انتشار أثر الكلس على حد السيولة للتربة مع زيادة العمق إلى ذات الأسباب التي أشرنا لها سابقاً و المتمثلة بتسرب شوارد الكاليسيوم ($Ca^{++}$ ) المنتشرة من الوتد الكلسي تدريجياً مع الماء وبفعل الجاذبية باتجاه

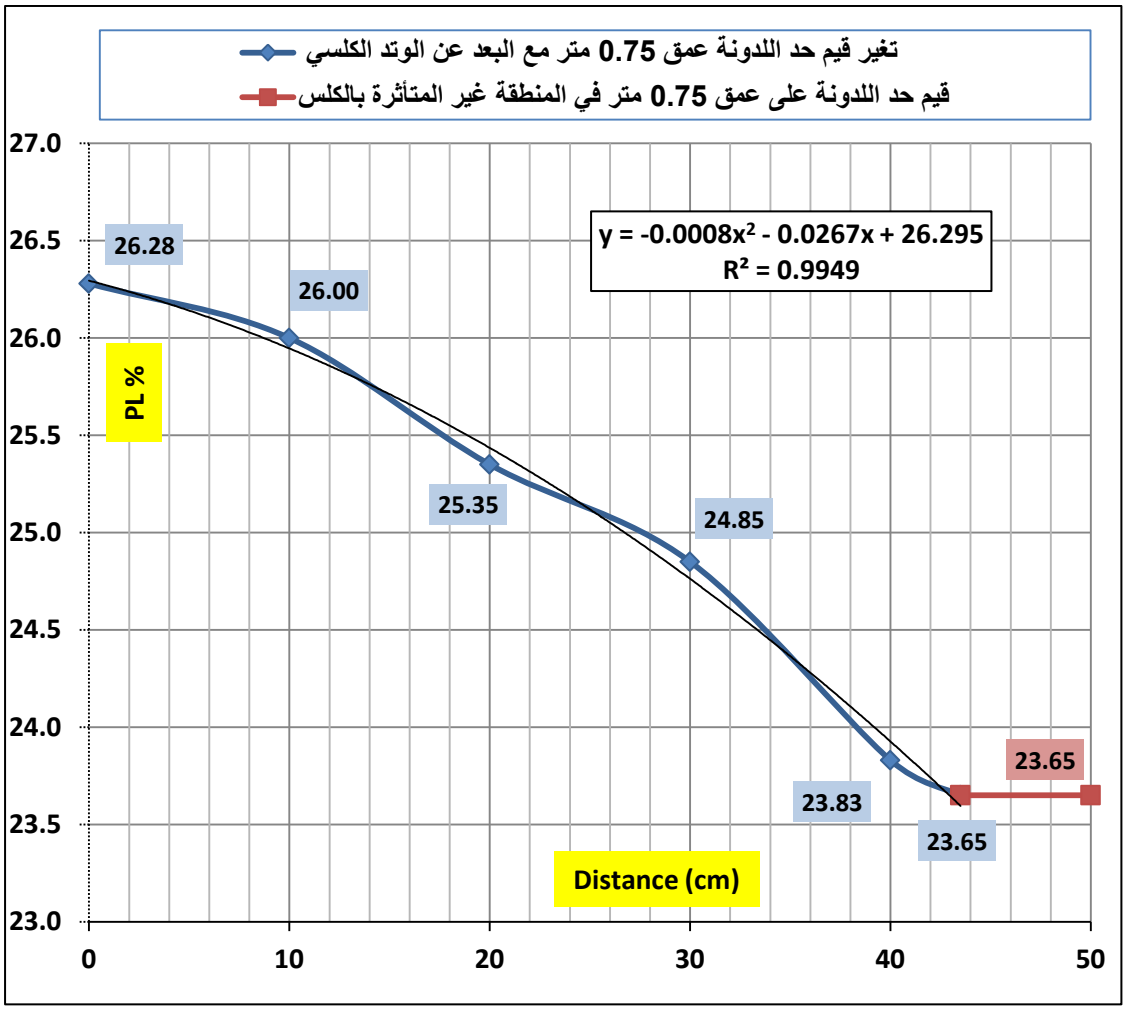
الأسفل الأمر الذي يزيد من تركيزها مع العمق و يؤدي لزيادة فعالية تقنية أوتاد الكلس المكروية في تحسين خواص التربة الغضارية الانتفاخية مع زيادة العمق .

### 4- 2- 6 - 2 تجربة حد اللدونة :

أجريت تجارب حد اللدونة باستخدام الطريقة اليدوية لصنع فتائل من معجونة التربة و أخذ رطوبتها عندما تبدأ بالتشقق بقطر ( 3.2 ) mm .

### تجربة حد اللدونة على عمق ( 0.75 ) m :

يمثل الشكل رقم ( 75 ) المبين أدناه تغير قيم حد اللدونة على عمق (0.75 ) m مع البعد عن الوتد الكلسي ومقارنتها بقيمة حد اللدونة لعينة التربة المأخوذة من نفس العمق من المنطقة غير المتأثرة بالكلس على بعد (3) m عن السطح الخارجي للوتد الكلسي .




**شكل رقم (75) ارتفاع قيم حد اللدونة على عمق ( 0.75 ) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي.**

يبين الشكل رقم (75 ) أن قيم حد اللدونة على عمق 0.75 متر تتزايد مع الاقتراب من الوتد الكلسي ويتلاشى أثر أوتاد الكلس على حد اللدونة بعد مسافة (4.35 * D) من سطح الوتد الكلسي .

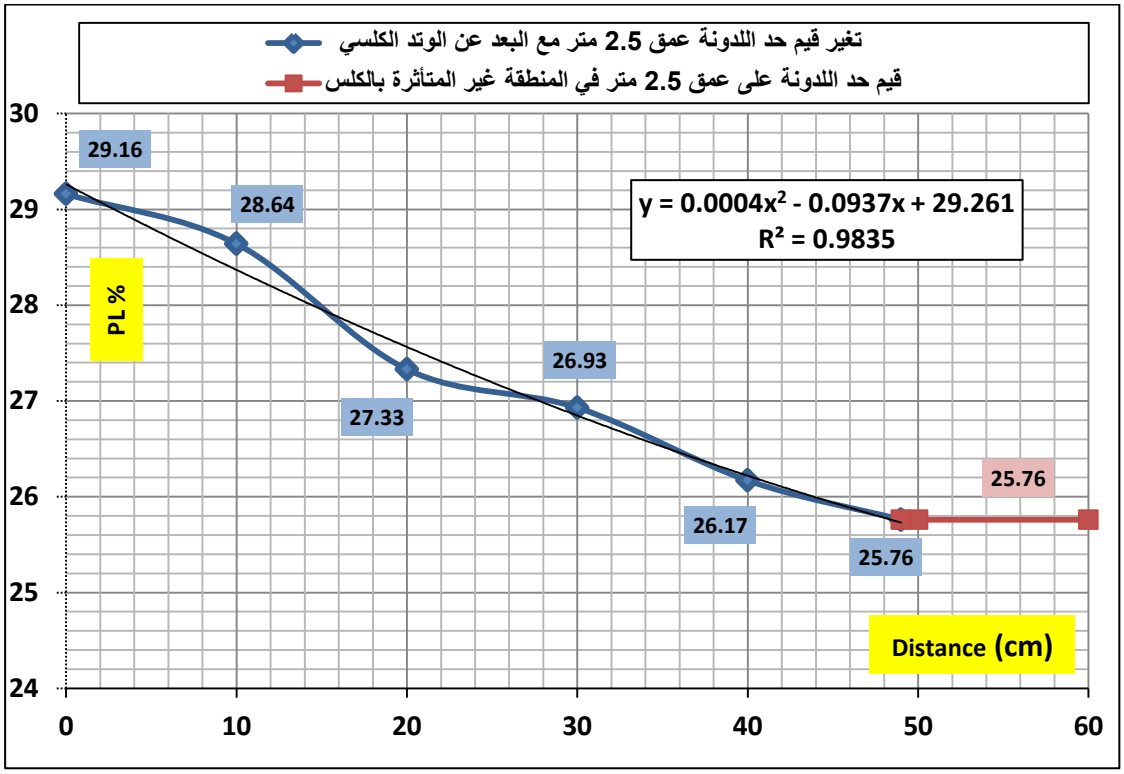
إن المنحني المقارب الذي يمثل العلاقة بين حد اللدونة للتربة و البعد عن السطح الخارجي للوتد الكلسي تعطى معادلته بالشكل ( $y = -0.0008X^2 - 0.0267X + 26.295$ ) و بدرجة موثوقية 99 % , حيث يرمز ( X ) الى بعد عينة التربة عن السطح الخارجي للوتد الكلسي بينما يرمز ( y ) الى حد اللدونة لعينة التربة . إن نسب تزايد قيم حد اللدونة على عمق (0.75 ) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي موضحة بالجدول رقم ( 21 ) المبين أدناه.

| المجال | النسبة المئوية لتزايد حد اللدونة |
|---|---|
| D *( 1 −0 ) | % 11.1 |
| D *( 2 −1 ) | % 10 |
| D *(3 −2 ) | % 7.2 |
| D *(4 −3 ) | % 5 |
| D *(4.35 −4 ) | % 1 |

**جدول رقم (21) ارتفاع قيم حد اللدونة على عمق ( 0.75 ) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي.**

**تجربة حد اللدونة على عمق (2.5) m :**

يمثل الشكل رقم ( 76 ) المبين أدناه تغير قيم حد اللدونة على عمق (2.5 ) m مع البعد عن الوتد الكلسي ومقارنتها بقيمة حد اللدونة لعينة التربة المأخوذة من نفس العمق من المنطقة غير المتأثرة بالكلس على بعد (3) m عن السطح الخارجي للوتد الكلسي.




**شكل رقم (76) ارتفاع قيم حد اللدونة على عمق ( 2.5 ) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي.**

يبين الشكل رقم (76 ) أن قيم حد اللدونة على عمق (2.5 ) m تتزايد مع الاقتراب من الوتد الكلسي ويتلاشى أثر أوتاد الكلس على حد اللدونة بعد مسافة (4.9* D) من السطح الخارجي للوتد الكلسي .

إن المنحني المقارب الذي يمثل العلاقة بين حد اللدونة للتربة و بعدها عن السطح الخارجي للوتد الكلسي تعطى معادلته بالشكل ( $y = 0.0004x^2 - 0.0937x + 29.261$ ) و بدرجة موثوقية 98 % , حيث يرمز ( X ) الى بعد العينة عن السطح الخارجي للوتد الكلسي بينما يرمز ( y ) الى قيم حد اللدونة لعينة التربة .

يوضح الجدول رقم (22) المبين أدناه نسب تزايد قيم حد اللدونة للتربة المعالجة بأوتاد الكلس مع الاقتراب من الوتد الكلسي .

| المجال | النسبة المئوية لتزايد حد اللدونة |
|---|---|
| D *( 1 -0 ) | % 13.2 |
| D *( 2 -1 ) | % 11.2 |
| D *( 3 -2 ) | % 6 |
| D *(4 -3 ) | % 4.5 |
| D *(4.9 -4 ) | % 1.6 |

**جدول رقم (22) ارتفاع قيم حد اللدونة على عمق ( 2.5 ) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي .**

▪ أظهرت النتائج أن معالجة التربة الغضارية المدروسة بأوتاد الكلس أدت الى زيادة في حد اللدونة مقارنة مع حد اللدونة للتربة المأخوذة من نفس العمق و لكن من المنطقة غير المتأثرة بالكلس على بعد (3 ) m من السطح الخارجي للوتد الكلسي .

▪ تبين القيم الواردة بالجدولين رقم (21) و (22) أن فعالية أوتاد الكلس تزيد مع العمق حيث يلاحظ زيادة واضحة بنسب زيادة حداللدونة على عمق (2.5 ) m مقارنة مع مثيلاتها على عمق ( 0.75 ) m , كما يلاحظ زيادة مدى انتشار أثر الكلس حول الوتد الكلسي على حداللدونة من مسافة (4.35 * D) على عمق (0.75 ) m إلى مسافة (4.9* D) على عمق (2.5) m .

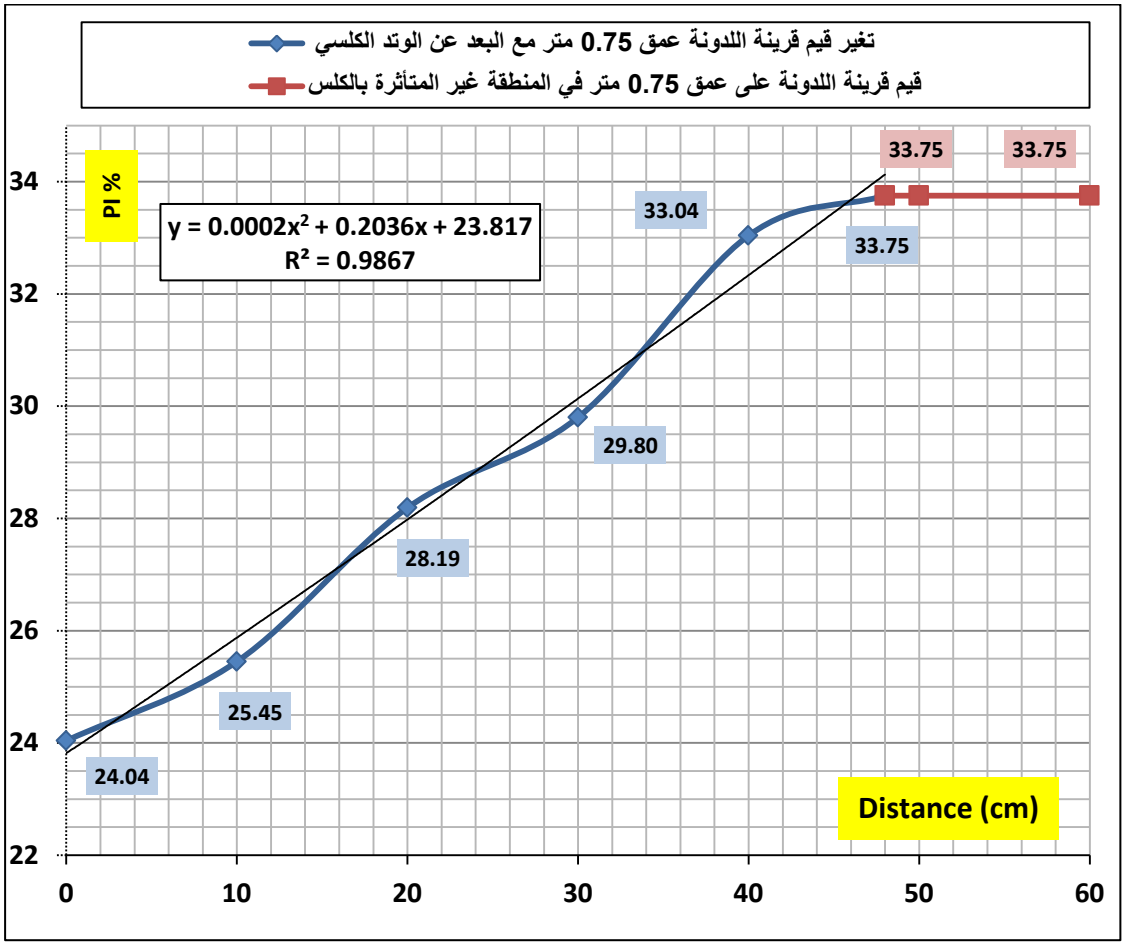
ويعود تفسير ظاهرة زيادة فعالية أوتاد الكلس وزيادة مدى انتشار أثر الكلس على حد اللدونة للتربة مع زيادة العمق إلى ذات الأسباب التي أشرنا لها سابقاً و المتمثلة بتسرب شوارد الكاليسيوم ($Ca^{++}$ ) المنتشرة من الوتد الكلسي تدريجياً مع الماء وبفعل الجاذبية باتجاه الأسفل الأمر الذي يزيد من تركيزها مع العمق و يؤدي لزيادة فعالية تقنية أوتاد الكلس المكروية في تحسين خواص التربة الغضارية الانتفاخية مع زيادة العمق .

**4- 2- 6- 3 قرينة اللدونة ( PI = LL - PL ):**

هي الفرق بين القيمة العددية لحد السيولة و حد اللدونة و بما أن حد السيولة ينخفض و حد اللدونة يزداد مع الاقتراب من الوتد الكلسي و بالتالي فان قرينة اللدونة التي تمثل الفرق بين قيمتي حد السيولة و حد اللدونة تنخفض مع الاقتراب من السطح الخارجي للوتد الكلسي.

**قرينة اللدونة على عمق (0.75 ) m :**

يبين الشكل رقم ( 77 ) المبين أدناه تغير قيم قرينة اللدونة على عمق (0.75 ) m مع البعد عن الوتد الكلسي مقارنة بقيمة قرينة اللدونة لعينة التربة المأخوذة من نفس العمق من المنطقة غير المتأثرة بالكلس على بعد (3) m عن السطح الخارجي للوتد الكلسي.




**شكل رقم (77) انخفاض قيم قرينة اللدونة على عمق ( 0.75 ) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي.**

يبين الشكل رقم (77) أن قيم **قرينة** اللدونة على عمق ( 0.75 ) m تنخفض مع الاقتراب من الوتد الكلسي ويتلاشى أثر أوتاد الكلس على **قرينة** اللدونة بعد مسافة (D * 4.8) من السطح الخارجي للوتد الكلسي .

إن المنحني المقارب الذي يمثل العلاقة بين قرينة اللدونة للتربة و البعد عن السطح الخارجي للوتد الكلسي تعطى معادلته بالشكل ( $y = 0.0002X^2 + 0.2036X + 23.817$ ) و بدرجة موثوقية 98.7% حيث يرمز ( X ) الى بعد عينة التربة عن السطح الخارجي للوتد الكلسي بينما يرمز ( y ) الى قيمة قرينة اللدونة لعينة التربة .

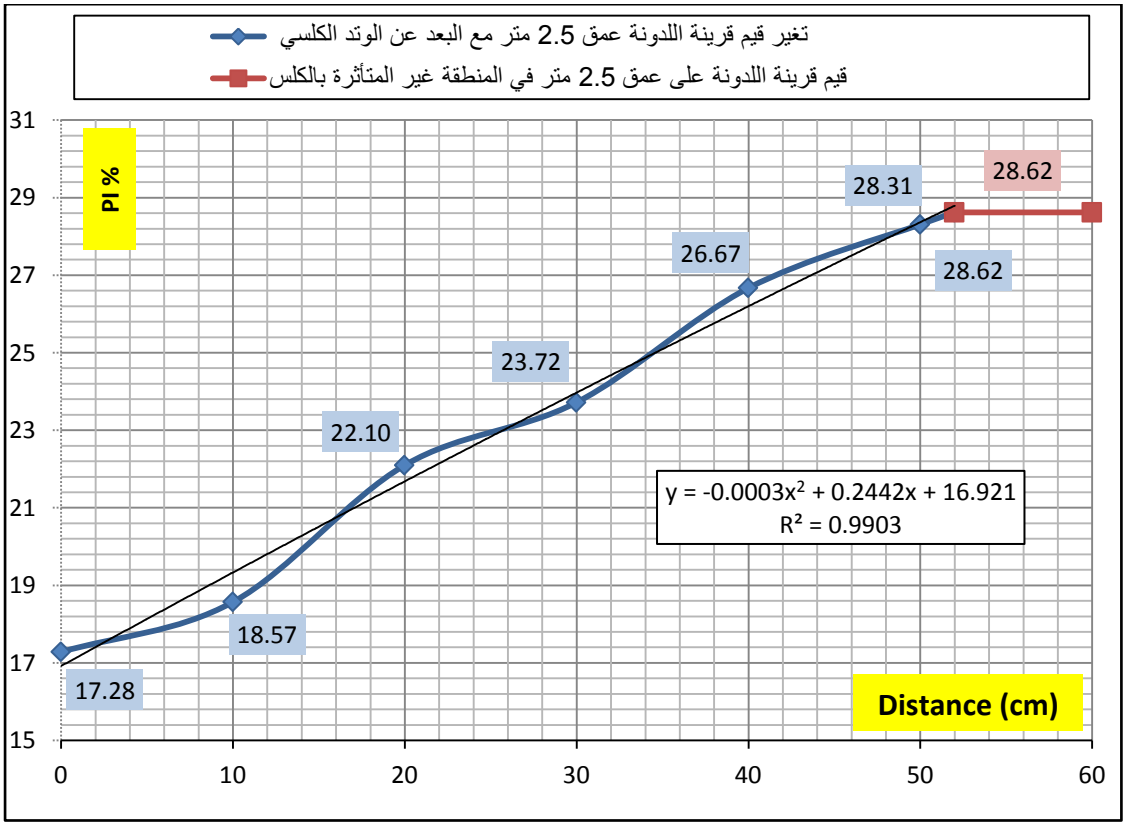
إن نسب انخفاض قيم قرينة اللدونة على عمق ( 0.75 ) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي موضحة بالجدول رقم ( 23 ) المبين أدناه .

| المجال | النسبة المئوية لانخفاض قرينة اللدونة |
|---|---|
| D *( 1 −0 ) | %29 |
| D *( 2 −1 ) | %25 |
| D *(3 −2 ) | %16 |
| D *(4 −3 ) | %12 |
| D *(4.8 −4 ) | %2 |

**جدول رقم (23) انخفاض قيم قرينة اللدونة على عمق ( 0.75 ) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي .**

**قرينة اللدونة على عمق (2.5 ) m :**

يمثل الشكل رقم (78) المبين أدناه تغير قيم قرينة اللدونة على عمق (2.5 ) m مع البعد عن الوتد الكلسي ومقارنتها بقيمة قرينة اللدونة لعينة التربة المأخوذة من نفس العمق من المنطقة غير المتأثرة بالكلس على بعد (3) m عن السطح الخارجي للوتد الكلسي .




**شكل رقم (78) انخفاض قيم قرينة اللدونة على عمق ( 2.5 ) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي.**

يبين الشكل رقم (78 ) أن قيم قرينة اللدونة على عمق (2.5 ) m تنخفض مع الاقتراب من الوتد الكلسي ويتلاشى أثر أوتاد الكلس على قرينة اللدونة بعد مسافة (D *5.2) من السطح الخارجي للوتد الكلسي.

إن المنحني المقارب الذي يبين العلاقة بين قرينة اللدونة للتربة و بعدها عن السطح الخارجي للوتد الكلسي تعطى معادلته بالشكل ( $y = -0.0003x^2 + 0.2442x + 16.921$ ) و بدرجة موثوقية 99 % حيث يرمز ( X ) الى بعد العينة عن السطح الخارجي للوتد الكلسي بينما يرمز ( y ) الى قيم قرينة اللدونة لعينة التربة .

يوضح الجدول رقم (24) المبين أدناه نسب انخفاض قيم قرينة اللدونة للتربة مع الاقتراب من الوتد الكلسي على عمق (2.5 ) m .

| المجال | النسبة المئوية لتناقص قرينة اللدونة |
|---|---|
| D *( 1 −0 ) | %40 |
| D *( 2 −1 ) | %35 |
| D *( 3 −2 ) | % 23 |
| D *(4 −3 ) | %17 |
| D *(5 −4 ) | %7 |
| D *(5.2 −5 ) | %1 |

**جدول رقم (24) انخفاض قيم قرينةاللدونة على عمق ( 2.5 ) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي**

- يحدث انخفاض في قرينة اللدونة للتربة الغضارية المعالجة بأوتاد الكلس نتيجة انخفاض قيمة حد السيولة و زيادة قيمة حد اللدونة , وإن الانخفاض في قرينة اللدونة للتربة الغضارية المدروسة بعد معالجتها بأوتاد الكلس هو دليل على التحسن الذي طرأ على خواص التربة الغضارية المعالجة ويعبر عن ارتفاع قابلية تشغيل التربة وتغير تركيبها الحبي و الحاصل نتيجة ظاهرة تبادل الكاتيونات المشار اليها سابقاً , و التي تؤدي الى زيادة ارتباط ذرات التربة الغضارية مع بعضها البعض و تكتلها / Flocculation / وتجمها / Agglomeration / و بالتالي زيادة حجم حبيبات التربة و تغير تركيبها الحبي.

تبين القيم الواردة بالجدولين رقم (23 ) و (24) أن فعالية أوتاد الكلس تزيد مع العمق حيث يلاحظ زيادة واضحة بنسب انخفاض قرينة اللدونة على عمق (2.5 ) m مقارنة مع مثيلاتها على عمق ( 0.75 ) m , كما يلاحظ زيادة مدى انتشار أثر الكلس حول الوتد الكلسي على قرينة اللدونة من مسافة (4.8 * D) على عمق (0.75 ) m الى مسافة (5.2* D) على

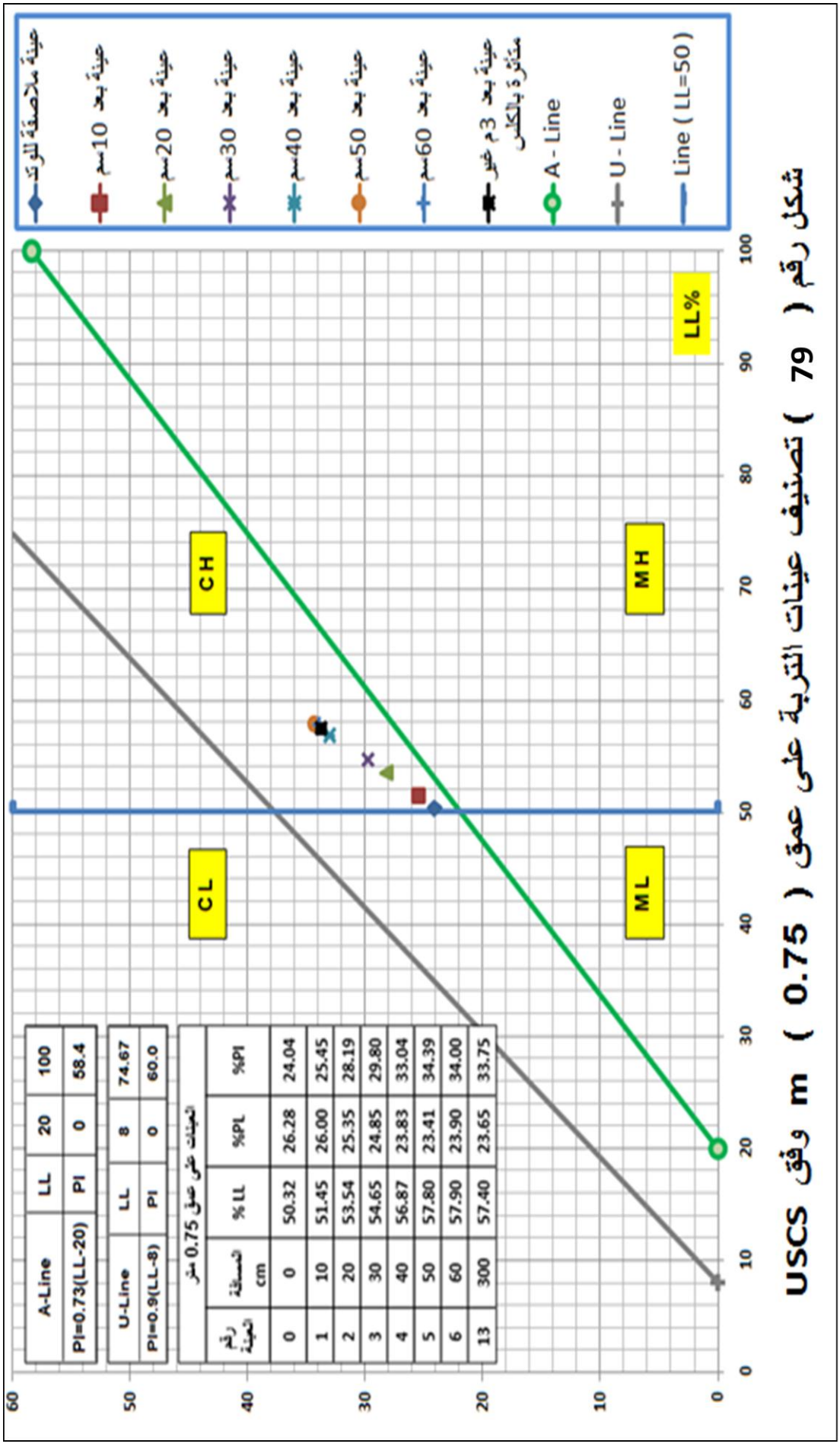
عمق (2.5 ) m . ويعود تفسير ظاهرة زيادة فعالية أوتاد الكلس وزيادة مدى انتشار أثر الكلس على قرينة اللدونة للتربة مع زيادة العمق إلى ذات الأسباب التي أشرنا لها سابقاً و المتمثلة بتسرب شوارد الكاليسيوم ($Ca^{++}$ ) المنتشرة من الوتد الكلسي تدريجياً مع الماء وبفعل الجاذبية باتجاه الأسفل الأمر الذي يزيد من تركيزها مع العمق و يؤدي لزيادة فعالية تقنية أوتاد الكلس المكروية في تحسين خواص التربة الغضارية الانتفاخية مع زيادة العمق .

**4- 2- 6- 4 تصنيف عينات التربة بحسب USCS ( ASTM D-2487- 06 ).**

**تصنيف عينات التربة على عمق ( 0.75 ) m .**

يمثل الشكل رقم ( 79 ) المبين أدناه تصنيف عينات التربة المعالجة بأوتاد الكلس بحسب USCS على عمق ( 0.75 ) m مع البعد عن الوتد الكلسي , ومقارنتها بتصنيف عينة التربة المأخوذة من نفس العمق و لكن من المنطقة غير المتأثرة بالكلس على بعد (3) m عن السطح الخارجي للوتد الكلسي .

لقد اقتصر الشكل المذكور آنفاً فقط على العينات الواقعة ضمن المجال الذي ظهر فيه أثر لأوتاد الكلس على قيم حدود أتربرغ للتربة المعالجة أي فقط ضمن مجال حوالي ( 6*D ) اعتباراً من السطح الخارجي للوتد الكلسي , و تم مقارنتها مع العينة رقم (13) الواقعة على نفس العمق ( 0.75 ) m و لكن في المنطقة غير المتأثرة بالكلس على مسافة (3) m من السطح الخارجي للوتد الكلسي .


شكل رقم ( 79 ) تصنيف عينات التربة على عمق ( 0.75 m ) وفق USCS
LL%
CH
CL
MH
ML
Line ( LL=50 )
U - Line
A - Line
عينة بعد 3دم غير متأثرة بالكلس
عينة بعد 60سم
عينة بعد 50سم
عينة بعد 40سم
عينة بعد 30سم
عينة بعد 20سم
عينة بعد 10سم
عينة ملاصقة للوتد
A-Line LL 20 100
PI=0.73(LL-20) PI 0 58.4
U-Line LL 8 74.67
PI=0.9(LL-8) PI 0 60.0
العينات على عمق 0.75 متر
رقم العينة | المسافة cm | % LL | %PL | %PI
0 | 0 | 50.32 | 26.28 | 24.04
1 | 10 | 51.45 | 26.00 | 25.45
2 | 20 | 53.54 | 25.35 | 28.19
3 | 30 | 54.65 | 24.85 | 29.80
4 | 40 | 56.87 | 23.83 | 33.04
5 | 50 | 57.80 | 23.41 | 34.39
6 | 60 | 57.90 | 23.90 | 34.00
13 | 300 | 57.40 | 23.65 | 33.75

**تصنيف عينات التربة على عمق ( 2.5 ) m .**

يمثل الشكل رقم ( 80 ) المبين أدناه تصنيف عينات التربة المعالجة بأوتاد الكلس بحسب USCS على عمق (2.5 ) m مع البعد عن الوتد الكلسي , ومقارنتها بتصنيف عينة التربة المأخوذة من نفس العمق من المنطقة غير المتأثرة بالكلس على بعد (3) m عن السطح الخارجي للوتد الكلسي .

لقد اقتصر الشكل آنف الذكر على العينات الواقعة ضمن المجال الذي ظهر فيه أثر للكلس على حدود أتربرغ أي بحدود ( 6*D ) من السطح الخارجي للوتد الكلسي و تم مقارنتها مع العينة رقم (13) الواقعة على نفس العمق ( 2.5 ) m و لكن في المنطقة الغير متأثرة بالكلس وعلى مسافة ( 3 ) m من السطح الخارجي للوتد الكلسي .

يتضح من الشكل رقم (79 ) والشكل رقم ( 80 ) أن هناك تأثير واضح لأوتاد الكلس على تصنيف التربة الغضارية الانتفاخية , حيث تتجه التربة للتحول بتصنيفها من غضار عالي اللدونة (CH ) إلى سيلت أو غضار سيلتي منخفض اللدونة ( ML) , و هو ما يتفق مع نتائج الأبحاث السابقة بهذا الخصوص [ 1 ] , [ 10 ] , ( Basma and Tuncer 1991 ) , و يتناسب هذا التحول مع البعد عن السطح الخارجي للوتد الكلسي حيث ينخفض تدريجياً بالابتعاد عن الوتد الكلسي . و يعود تفسير ظاهرة انخفاض نسبة الحبيبات الناعمة الموافقة لقياس حبيبات الغضار و ارتفاع نسبة حبيبات التربة الموافقة لقياس حبيبات السيلت و التي تحدث بشكل أساسي ضمن مسافة التأثير الفعال لأوتاد الكلس إلى عملية التبادل الأيوني و التلبد و التكتل و زيادة ترابط ذرات الغضار مما يزيد من حجمها .

يلاحظ أن العينات الملاصقة للسطح الخارجي للوتد الكلسي و الواقعة ضمن مجال ( 0– 3*D ) هي التي ظهر فيها هذا التحول بشكل أساسي لوقوعها ضمن المجال الفعال ( لهجرة ) انتشار أيونات الكالسيوم المتولدة من الوتد الكلسي .

ظهر هذا التحول أيضاً على العينات الواقعة على بعد ( 4* D ) ولكن بدرجة أقل , في حين لم يظهر أي أثر لأعمدة الكلس على تصنيف التربة الواقعة على بعد (5*D) و ( 6*D) , ويكاد يكون هناك شبه تطابق في تصنيف التربة الواقعة على بعد ( 5*D ) , (6*D ) مع تصنيف عينة التربة المأخوذة من نفس العمق و لكن من المنطقة غير المتأثرة بأعمدة الكلس على مسافة (3) m من السطح الخارجي للوتد الكلسي .

إن ما سبق يتفق مع نتائج مدى انتشار أثر أعمدة الكلس على حدود أتربرغ و التي تشير أن أثر أعمدة الكلس على الحدود المذكورة يتلاشى في معظمها بعد مسافة حوالي ( 5*D ) من سطح الوتد الكلسي .

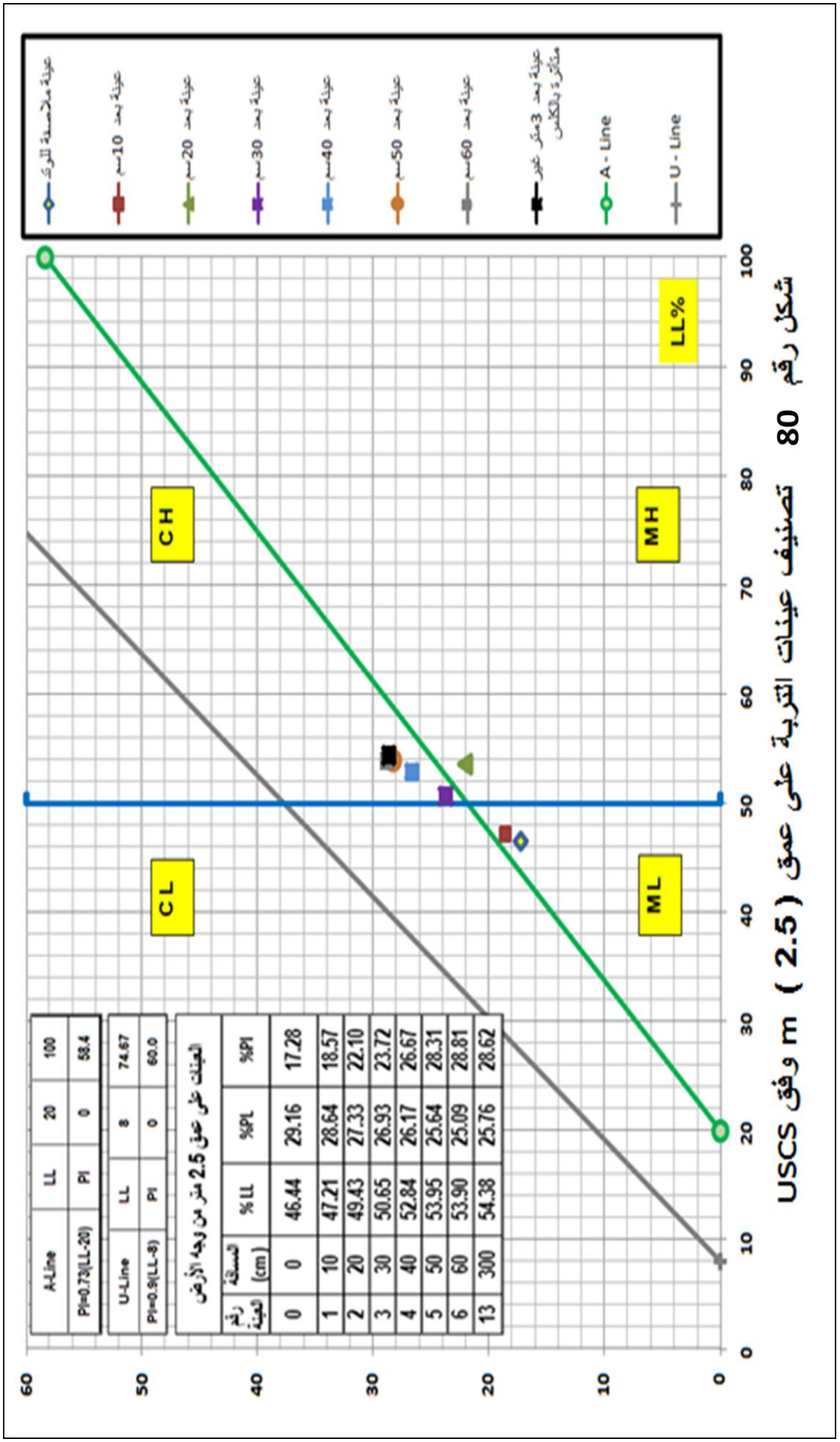
إن تغير تصنيف التربة الغضارية الانتفاخية بعد معالجتها بأوتاد الكلس وتحول تصنيف جزء منها من الغضار الى السيلت هو دليل آخر على التحسن الحاصل في مواصفات هذه التربة نتيجة معالجتها بأوتاد الكلس .

و يعزى تغير تصنيف التربة بعد معالجتها بأوتاد الكلس الى حصول تغير بتركيب التربة المعالجة نتيجة ظاهرة التبادل الأيوني التي تؤدي الى تلبد و تكتل و زيادة ترابط حبيبات التربة الغضارية و بالتالي زيادة حجمها فتنقص نسبة حبيبات التربة الموافقة لقياس ذرات الغضار و تزيد نسبة حبيبات التربة الموافقة لقياس ذرات السيلت , ويحدث ذلك وفق الآلية التالية :

تنتشر ( تهاجر ) شوارد الكالسيوم المنبعثة من الوتد الكلسي و أيونات هيدروكسيل الكالسيوم في التربة الغضارية المحيطة بالوتد الكلسي فينشأ وسط قلوي فيها يساهم بزيادة و تسريع انحلال سليكات الألمنيوم التي تترسب فيما بعد على شكل نواتج تفاعل اسمنتية مائية تساهم بدورها بتكتل حبيبات التربة الغضارية المتجاورة و وتجمعها و ربطها مع بعضها البعض مما يزيد من حجم حبيبات التربة الغضارية المعالجة بأوتاد الكلس و يغير جزئياً من تركيبها الحبي.

يتبين أيضاً من الشكلين رقم (79 ) و (80 ) لتصنيف التربة الغضارية المعالجة بأوتاد الكلس على عمق ( 0.75 ) m و (2.5 ) m على التوالي أن فعالية أوتاد الكلس تزيد مع العمق حيث يلاحظ زيادة واضحة بنسبة تحول تصنيف عينات التربة من تربة غضارية عالية اللدونة الى تربة سيلتية منخفضة اللدونة على عمق ( 2.5 ) m مقارنة مع مثيلاتها على عمق (0.75 ) m و خاصة ضمن المجال ( 0 – 3)*D .

يعود تفسير ظاهرة زيادة فعالية أوتاد الكلس وزيادة مدى انتشار أثرها على تصنيف التربة مع زيادة العمق إلى ذات الأسباب التي أشرنا لها سابقاً و المتمثلة بتسرب شوارد الكاليسيوم ($Ca^{++}$) المنتشرة من الوتد الكلسي تدريجياً مع الماء وبفعل الجاذبية باتجاه الأسفل الأمر الذي يزيد من تركيزها وفعاليتها .


شكل رقم 80 تصنيف عينات التربة على عمق ( 2.5 ) m وفق USCS
LL%
CH
MH
CL
ML
عينة ملاصقة للركن
عينة بعد 10سم
عينة بعد 20سم
عينة بعد 30سم
عينة بعد 40سم
عينة بعد 50سم
عينة بعد 60سم
عينة بعد 3سم غير مكثرة بالكلس
A - Line
U - Line
A-Line LL 20 100
PI=0.73(LL-20) PI 0 58.4
U-Line LL 8 74.67
PI=0.9(LL-8) PI 0 60.0
العينات على عمق 2.5 متر من وجه الأرض
رقم العينة المسافة (cm) % LL %PL %PI
0 0 46.44 29.16 17.28
1 10 47.21 28.64 18.57
2 20 49.43 27.33 22.10
3 30 50.65 26.93 23.72
4 40 52.84 26.17 26.67
5 50 53.95 25.64 28.31
6 60 53.90 25.09 28.81
13 300 54.38 25.76 28.62

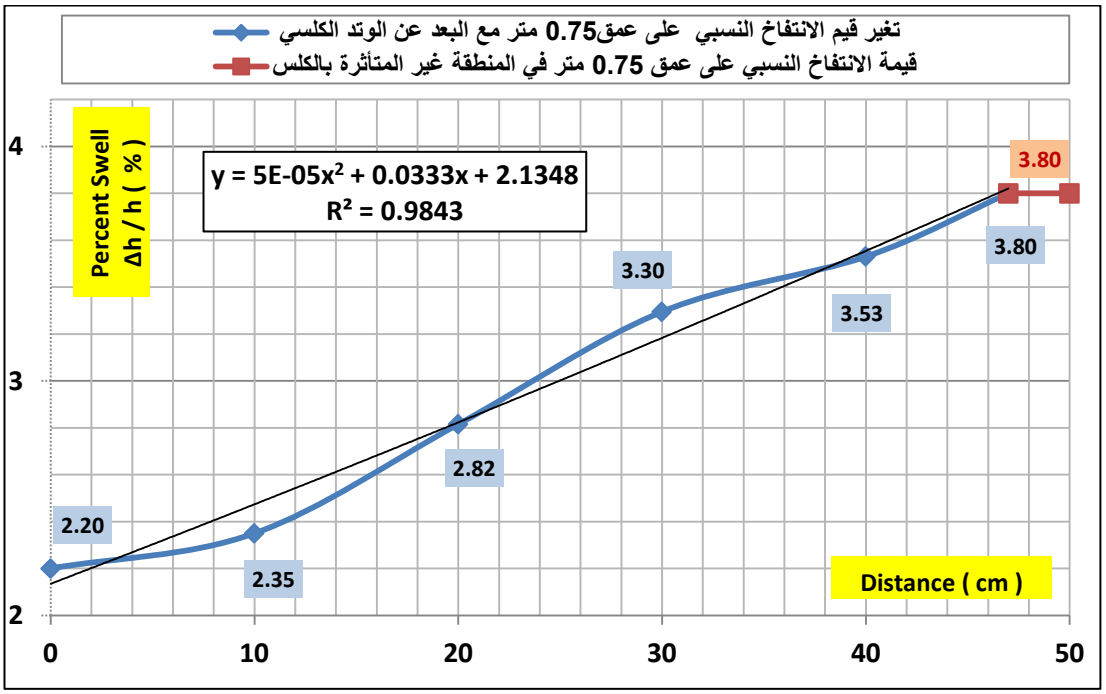
### 4- 2- 7 تجربة الانتفاخ النسبي :

تم إجراء تجارب الانتفاخ النسبي و فق ( ASTM – D 4546 – 96 ) باستخدام أجهزة الأدومتر في مخبر ميكانيك التربة في كلية الهندسة المدنية بدمشق .

**شكل رقم ( 81 ) اجراء تجارب الانتفاخ النسبي و ضغط الانتفاخ باستخدام جهاز الأدومتر.**

### تجربة الانتفاخ النسبي على عمق (0.75 ) m :

يمثل الشكل رقم ( 82 ) المبين أدناه تغير قيم الانتفاخ النسبي على عمق (0.75 ) m مع البعد عن الوتد الكلسي ومقارنتها بقيمة الانتفاخ النسبي لعينة التربة المأخوذة من نفس العمق من المنطقة غير المتأثرة بالكلس على بعد (3) m عن السطح الخارجي للوتد الكلسي .




**شكل رقم ( 82 ) انخفاض قيم الانتفاخ النسبي على عمق ( 0.75 ) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي.**

يبين الشكل رقم (82 ) أن قيم الانتفاخ النسبي على عمق (0.75 ) m تنخفض مع الاقتراب من الوتد الكلسي ويتلاشى أثر أوتاد الكلس على الانتفاخ النسبي بعد مسافة (4.7 * D) من السطح الخارجي للوتد الكلسي ,

إن المنحني المقارب الذي يمثل العلاقة بين قيمة الانتفاخ النسبي للتربة و بعدها عن السطح الخارجي للوتد الكلسي تعطى معادلته بالشكل ( $y = 5E\text{-}05x^2 + 0.0333x + 2.1348$ ) و بدرجة موثوقية 98 % حيث يرمز ( X ) إلى بعد العينة عن السطح الخارجي للوتد الكلسي و يرمز ( y ) الى قيمة الانتفاخ النسبي لعينة التربة

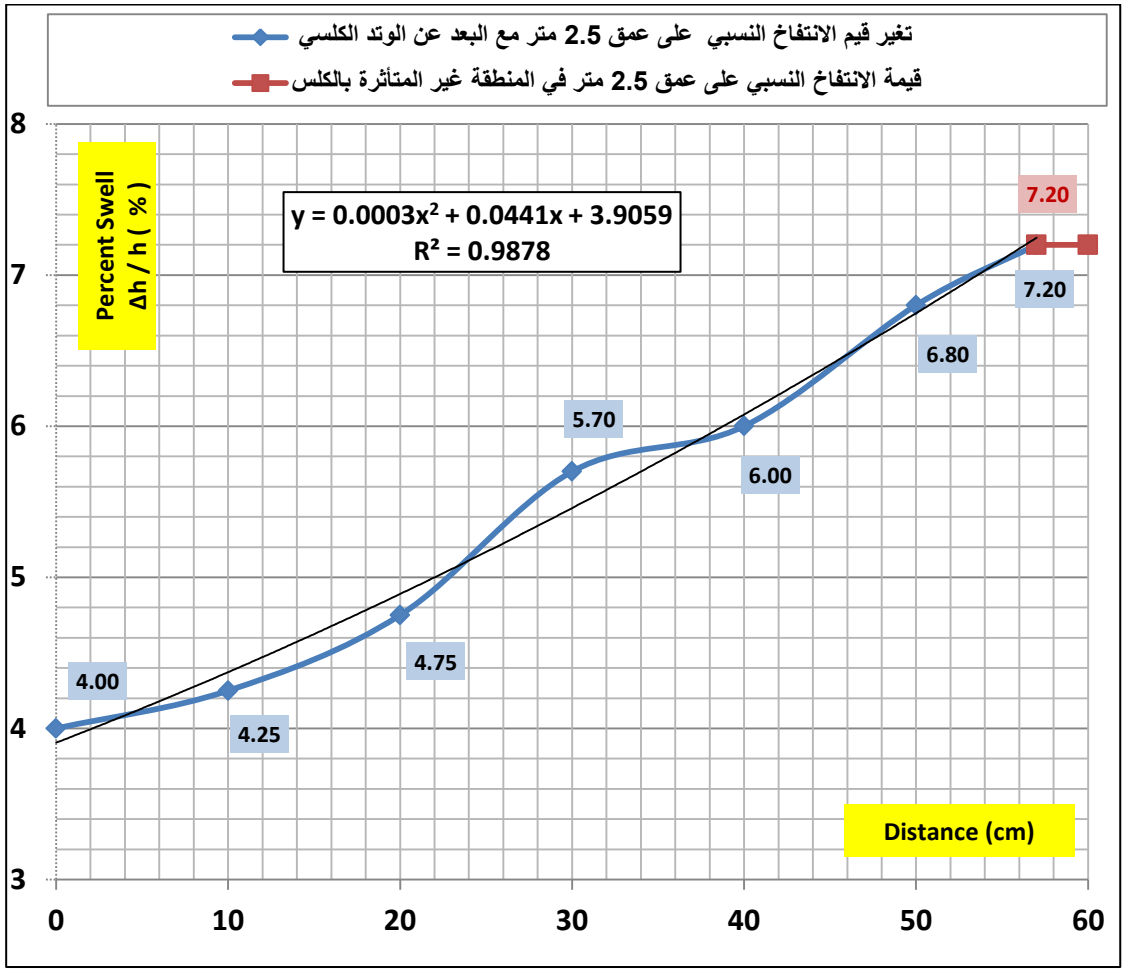
إن نسب انخفاض الانتفاخ النسبي على عمق (0.75 ) مع الاقتراب من الوتد الكلسي موضحة بالجدول رقم ( 25 ) المبين أدناه .

| المجال | النسبة المئوية لانخفاض الانتفاخ النسبي |
|---|---|
| D *( 1 −0 ) | % 42 |
| D *( 2 −1 ) | % 38 |
| D *( 3 −2 ) | % 26 |
| D *( 4 −3 ) | % 13 |
| D *( 4.7 −4 ) | % 7 |

**جدول رقم (25) انخفاض قيم الانتفاخ النسبي على عمق ( 0.75 ) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي.**

**تجربة الانتفاخ النسبي على عمق ( 2.5 ) m :**

يمثل الشكل رقم ( 83 ) أدناه تغير قيم الانتفاخ النسبي على عمق ( 2.5 ) m مع البعد عن الوتد الكلسي ومقارنتها بقيمة الانتفاخ النسبي لعينة التربة المأخوذة من نفس العمق من المنطقة غير المتأثرة بالكلس على بعد (3) m عن السطح الخارجي للوتد الكلسي.




**شكل رقم (83) انخفاض قيم الانتفاخ النسبي على عمق( 2.5 ) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي.**

يبين الشكل رقم (83 ) أن قيم الانتفاخ النسبي على عمق (2.5 ) m تنخفض مع الاقتراب من الوتد الكلسي ويتلاشى أثر أوتاد الكلس على الانتفاخ النسبي للتربة بعد مسافة (5.7* D) من السطح الخارجي للوتد الكلسي.

إن المنحني المقارب الذي يمثل العلاقة بين قيم الانتفاخ النسبي للتربة و بعدها عن السطح الخارجي للوتد الكلسي تعطى معادلته بالشكل ( $y = 0.0003x^2 + 0.0441x + 3.9059$ ) و بدرجة موثوقية 99 % حيث يرمز ( X ) الى بعد العينة عن السطح الخارجي للوتد الكلسي بينما يرمز ( y ) الى قيم الانتفاخ النسبي للعينة .

إن نسب انخفاض الانتفاخ النسبي للتربة على عمق ( 2.5 ) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي موضحة بالجدول رقم ( 26 ) المبين أدناه .

| المجال | النسبة المئوية لانخفاض الانتفاخ النسبي |
|---|---|
| D *( 1 −0 ) | % 44 |
| D *( 2 −1 ) | % 41 |
| D *( 3 −2 ) | % 34 |
| D *(4 −3 ) | % 21 |
| D *(5 −4 ) | % 17 |
| D *(5.7 −5 ) | % 6 |

**جدول رقم (26) انخفاض قيم الانتفاخ النسبي للتربةعلى عمق ( 2.5 ) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي .**

- إن الانخفاض بقيم الانتفاخ النسبي للتربة الغضارية المدروسة بعد معالجتها بأوتاد الكلس يعود الى أن المعالجة بالكلس تؤدي الى نقصان سماكة الأغشية المائية المحيطة بذرات التربة الغضارية وازدياد ارتباط ذرات الكالسيوم معها , مما يؤدي الى انخفاض شراهة التربة الغضارية للماء وانخفاض قابليتها للاحتفاظ به .

- تبين القيم الواردة بالجدولين رقم (25 ) و (26) أن فعالية أوتاد الكلس تزيد مع العمق حيث يلاحظ زيادة واضحة بنسب انخفاض قيم الانتفاخ النسبي على عمق ( 2.5 ) m مقارنة مع مثيلاتها على عمق (0.75) m , كما يلاحظ زيادة مدى انتشار أثر أوتاد الكلس على الانتفاخ النسبي للتربة حول الوتد الكلسي من مسافة (4.7 * D) على عمق (0.75) m الى مسافة (5.7* D) على عمق (2.5 ) m .

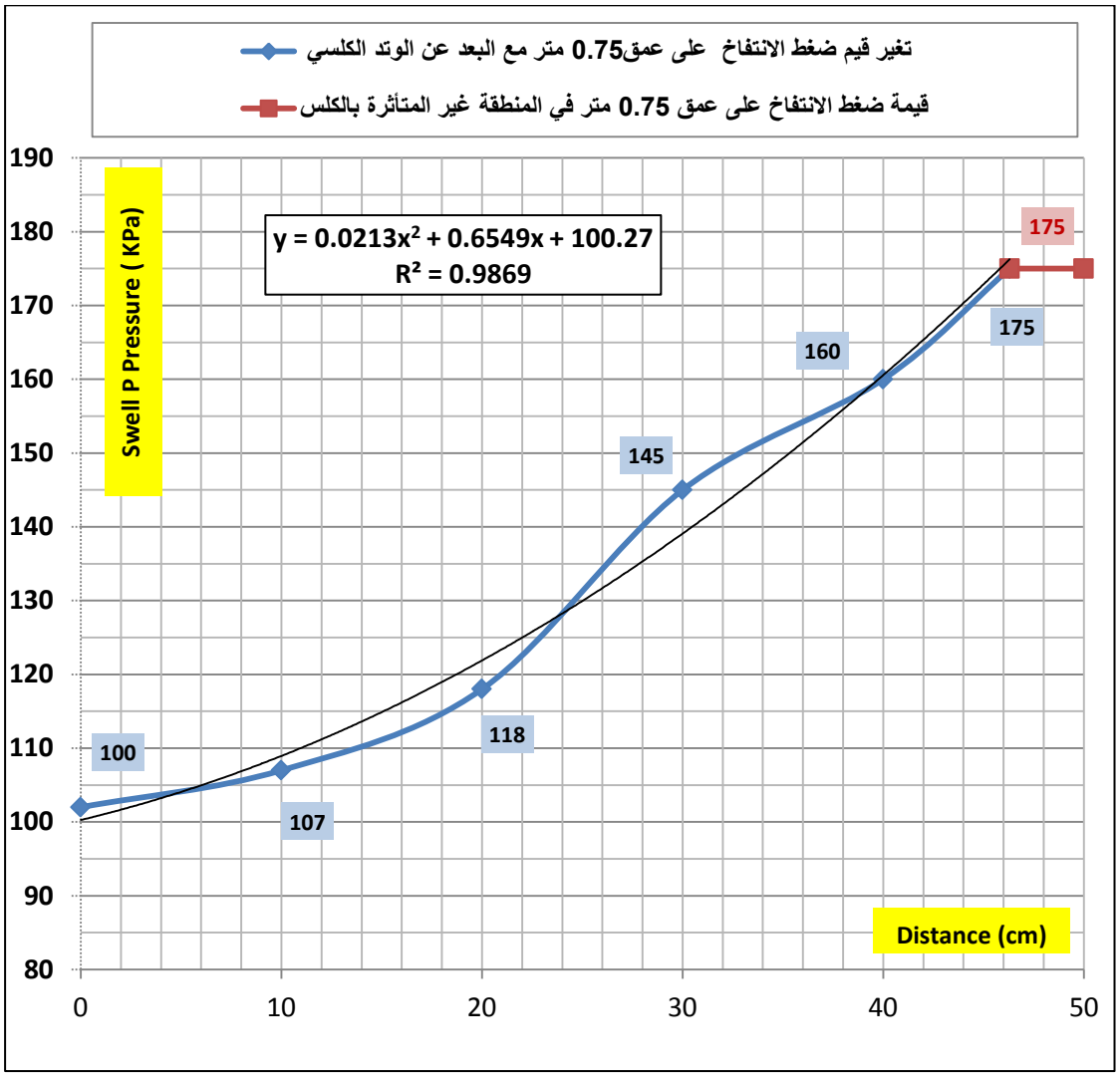
يعود تفسير ظاهرة زيادة فعالية أوتاد الكلس وزيادة مدى انتشار أثر ها على حد الانتفاخ النسبي للتربة مع زيادة العمق إلى ذات الأسباب التي أشرنا لها سابقاً و المتمثلة بتسرب شوارد الكاليسيوم ($Ca^{++}$ ) المنتشرة من الوتد الكلسي تدريجياً مع الماء وبفعل الجاذبية باتجاه الأسفل الأمر الذي يزيد من تركيزها وفعاليتها مع زيادة العمق .

### 4− 2− 8 تجربة ضغط الانتفاخ :

تم اجراء تجارب ضغط الانتفاخ وفق (ASTM – D 4546 – 96 ) وباستخدام أجهزة الأدومتر الموجودة في مخبر ميكانيك التربة بكلية الهندسة المدنية بدمشق .

**تجربة ضغط الانتفاخ على عمق (0.75 ) m :**

يبين الشكل رقم ( 84 ) أدناه تغير قيم ضغط الانتفاخ على عمق ( 0.75 ) m مع البعد عن الوتد الكلسي ومقارنتها بقيمة ضغط الانتفاخ لعينة التربة المأخوذة من نفس العمق ولكن من المنطقة غير المتأثرة بالكلس على بعد (3) m عن السطح الخارجي للوتد الكلسي.




**شكل رقم (84) انخفاض قيم ضغط الانتفاخ على عمق ( 0.75 ) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي.**

يبين الشكل رقم (84 ) أن قيم ضغط الانتفاخ على عمق (0.75 ) m تنخفض مع الاقتراب من الوتد الكلسي ويتلاشى أثر أوتاد الكلس على ضغط الانتفاخ بعد مسافة (4.6 * D) من سطح الوتد الكلسي . وأن المنحني المقارب الذي يمثل العلاقة بين قيمة ضغط الانتفاخ للتربة و بعدها عن السطح الخارجي للوتد الكلسي تعطى معادلته بالشكل ( $y = 0.0213x^2 + 0.6549x + 100.27$ ) و بدرجة موثوقية 98.6 % حيث يرمز ( X ) الى بعد العينة عن السطح الخارجي للوتد الكلسي بينما يرمز ( y ) الى قيمة

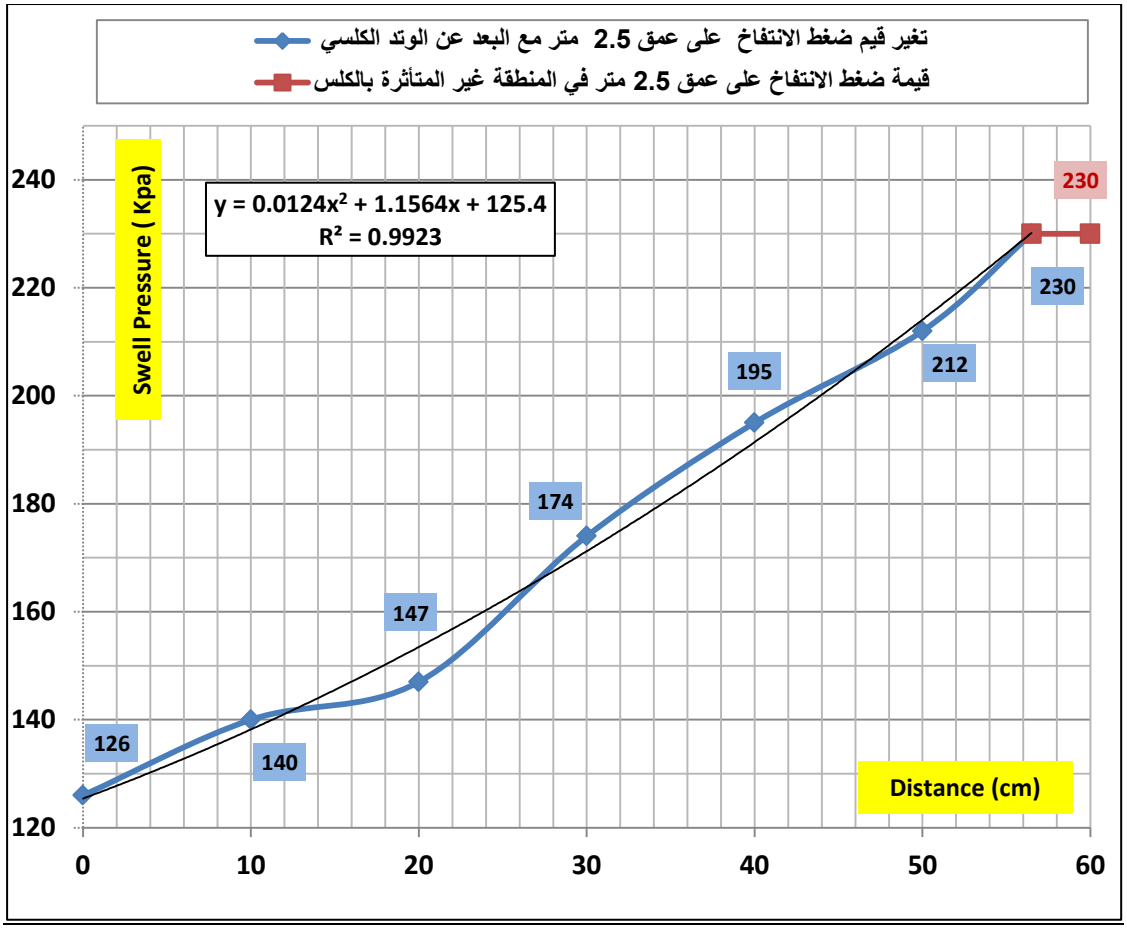
ضغط الانتفاخلعينة التربة . يوضح الجدول رقم (27) المبين أدناه نسب انخفاض قيم ضغط الانتفاخ على عمق ( 0.75 ) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي .

| المجال | النسبة المئوية لتناقص ضغط الانتفاخ |
|---|---|
| D *( 1 −0 ) | % 43 |
| D *( 2 −1 ) | % 39 |
| D *( 3 −2 ) | % 23 |
| D *( 4 −3 ) | % 17 |
| D *( 4.6 −4 ) | % 9 |

**جدول رقم (27) انخفاض قيم ضغط الانتفاخ على عمق ( 0.75 ) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي.**

**تجربة ضغط الانتفاخ على عمق ( 2.5 ) m :**

يبين الشكل رقم ( 85 ) المبين أدناه تغير قيم ضغط الانتفاخ على عمق ( 2.5 ) m مع البعد عن الوتد الكلسي ومقارنتها بقيمة ضغط الانتفاخ لعينة التربة المأخوذة من نفس العمق من المنطقة غير المتأثرة بالكلس على بعد (3) m عن السطح الخارجي للوتد الكلسي.




**شكل رقم (85) انخفاض قيم ضغط الانتفاخ على عمق 2.5 m مع الاقتراب من الوتد الكلسي.**

يبين الشكل رقم ( 85 ) أن قيم ضغط الانتفاخ على عمق ( 2.5 ) m تنخفض مع الاقتراب من الوتد الكلسي ويتلاشى أثر أوتاد الكلس على الانتفاخ النسبي بعد مسافة (5.7* D) من سطح الوتد الكلسي.

إن معادلة المنحني المقارب الذي يمثل العلاقة بين قيم ضغط الانتفاخ للتربة المعالجة و بعدها عن السطح الخارجي للوتد الكلسي تعطى بالشكل ( $y = 0.0124x^2 + 1.1564x + 125.4$ ) و بدرجة موثوقية 99 % حيث يرمز ( X ) الى بعد العينة عن السطح الخارجي للوتد الكلسي , و يرمز ( y ) الى قيمة ضغط الانتفاخ للعينة .

يوضح الجدول رقم ( 28 ) أدناه نسب انخفاض ضغط الانتفاخ مع الاقتراب من الوتد الكلسي .

| المجال | النسبة المئوية لانخفاض ضغط الانتفاخ |
|---|---|
| D *( 1 −0 ) | % 45 |
| D *( 2 −1 ) | % 39 |
| D *( 3 −2 ) | % 36 |
| D *(4 −3 ) | % 24 |
| D *(5 −4 ) | % 15 |
| D *(5.7 −5 ) | % 8 |

**جدول رقم (28) انخفاض قيم ضغط الانتفاخ للتربة على عمق (2.5) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي.**

- إن انخفاض الانتفاخ النسبي للتربة الغضارية المدروسة بعد معالجتها بأوتاد الكلس للأسباب التي أوردناها في الفقرة السابقة يستدعي بالضرورة انخفاض قيمة ضغط الانتفاخ اللازم لإعادة هذه التربة الى حجمها الأصلي قبل الانتفاخ .
- تبين القيم الواردة بالجدولين رقم (27) و (28) أن فعالية أوتاد الكلس تزيد مع العمق ، حيث يلاحظ زيادة واضحة بنسب انخفاض قيم ضغط الانتفاخ للتربة الغضارية المعالجة مع الاقتراب من السطح الخارجي الوتد الكلسي على عمق ( 2.5 ) m مقارنة مع مثيلاتها على عمق ( 0.75 ) m , و زيادة مدى انتشار أثر الكلس على ضغط الانتفاخ للتربة حول الوتد الكلسي من مسافة (4.6 * D) على عمق (0.75 ) m الى مسافة (5.7* D) على عمق (2.5) m . يعود تفسير زيادة فعالية أوتاد الكلس وزيادة مدى انتشار أثر الكلس على ضغط الانتفاخ للتربة مع زيادة العمق إلى ذات الأسباب التي أشرنا لها سابقاً و المتمثلة بتسرب شوارد الكاليسيوم ($Ca^{++}$ ) المنتشرة من الوتد الكلسي تدريجياً مع الماء وبفعل الجاذبية باتجاه الأسفل الأمر الذي

يزيد من تركيز و فعالية تقنية أوتاد الكلس المكروية في تحسين خواص التربة الغضارية الانتفاخية مع زيادة العمق .

**4- 2- 9 تجربة قرينة الانتفاخ :**

أجريت تجربة قرينة الانتفاخ Expansion Index ( EI ) وفق ( ASTM – D 4829 – 95 ) و من أجل درجة اشباع % ( 43 - 42 ) ≈S .

**مفهوم قرينة الانتفاخ :**

إن مفهوم قرينة الانتفاخ يشبه الانتفاخ النسبي باستثناء أن تجربة الانتفاخ النسبي تجرى على عينات سليمة برطوبة طبيعية بينما تجرى تجربة قرينة الانتفاخ على عينات محضرة مخبرياً بدرجة اشباع ورص محددة .

تتلخص التجربة بالقيام برص التربة حتى تصل لدرجة اشباع ( 40 - 60 )% , ثم توضع العينة في حلقة الأدومتر ويطبق عليها ضغط (6.9) Kpa , بعد ذلك تغمر العينة بالماء ويسمح لها بالانتفاخ , ويستمر قياس التغير بالحجم لمدة (24 ) ساعة أو حتى يصبح معدل الانتفاخ أقل من ( 0.0005 ) mm/h أيهما يحدث أولاً وبمدة زمنية لا تقل عن ثلاث ساعات و تستخدم قرينة الانتفاخ لتصنيف التربة وفقاً لطاقة انتفاخها بحسب الجدول التالي :

| تصنيف التربة الغضارية حسب طاقة الانتفاخ | |
|---|---|
| **طاقة الانتفاخ Expansion Potential** | **قرينة الانتفاخ Expansion Index** |
| منخفضة جداً | 0-20 |
| منخفضة | 21-50 |
| متوسطة | 51-90 |
| عالية | 91-130 |
| عالية جداً | > 130 |

**جدول رقم ( 29 ) تصنيف التربة الغضارية وفقاً لطاقة انتفاخها بناءاً على قيم قرينة الانتفاخ .**

**❖ خطوات اجراء تجربة طاقة الانتفاخ ( EI ):**

- تحضير عينة التربة :

نقوم بتكسير عينة التربة بحيث تمر من المهزة رقم ( 4 ) , ويؤخذ حوالي (1) Kg من التربة المارة من المهزة رقم ( 4 ) وتخلط مع كمية كافية من الماء بحيث تصبح رطوبتها التي تحدد من

تجربة الرطوبة قريبة من الرطوبة المثالية , توضع العينة المحضرة في وعاء محكم الاغلاق و معزول عن الهواء لمدة ( 16 ) ساعة أو لمدة ليلة كاملة حتى تتوازن .

- رص عينة التربة :

يتم رص التربة على طبقتين متساويتين بعمق كلي ( 5.1 ) cm و بطاقة رص مساوية لطاقة الرص في تجربة بروكتور النظامي .

- اجراء التجربة :

توضع العينة المرصوصة في حلقة جهاز الأدومتر ويوضع فوقها و تحتها أقراص مسامية و يطبق عليها ضغط شاقولي (6.9) Kpa لمدة عشر دقائق وتؤخذ قراءة (D1) على المقياس , ثم تغمر العينة بالماء وتؤخذ قراءات دورية لمدة ( 24) ساعة و بعد انتهاء التجربة تؤخذ القراءة ( D2 ).

- حساب درجة اشباع عينة التربة:

حسبت رطوبة العينة من الخطوات السابقة , نقوم بوزن حلقة الأدومتر مع التربة بعد انتهاء التجربة لمعرفة وزن التربة الرطبة والجافة الموجودة داخل الحلقة المعدنية. وبمعرفة الوزن النوعي والوزن الحجمي الجاف نحسب درجة الاشباع من العلاقة التالية :

$$\mathbf{S = (W.\gamma s.\gamma d\ )/(\gamma s.Ww - \gamma d\ )}$$

S : درجة الاشباع ( % ) قرينة الانتفاخ وتقرب الى أقرب رقم صحيح .

γs : الوزن النوعي

γd : الوزن الحجمي الجاف للتربة $Kn/m^3$

Ww : وزن الواحدة من الماء $Kn/m^3$

- حساب قرينة الانتفاخ :

<u>الحالة الأولى</u> :

إذا كانت قيمة درجة الاشباع ( 1 ± 50 ) % عندها تحسب قرينة الانتفاخ من العلاقة التالية

$EImeas = \left[\frac{D2-D1}{H1}\right] * 1000$ حيث :

EImeas : قرينة الانتفاخ وتقرب الى أقرب رقم صحيح .

D2 : القراءة النهائية Cm وتمثل ارتفاع عينة التربة عند نهاية الانتفاخ الأساسي.

D1 : القراءة الأولية Cm وتمثل الارتفاع الأولي لعينة التربة.

H1 : الارتفاع الأولي لعينة التربة Cm وهو مساوي لارتفاع الحلقة المعدنية المساوي Cm ( 2.54).

الحالة الثانية :

إذا كانت قيمة درجة الاشباع ضمن المجال [ % ( 40 - 60 ) = S ] يتم اجراء تصحيح على قيمة قرينة الانتفاخ المقاسة من التجربة ( EImeas ) للحصول على قيمة قرينة الانتفاخ عند درجة اشباع [ % (1 ± 50 ) =S ] وتحسب طاقة الانتفاخ عندها من العلاقة التالية :

$$EI50 = EImeas - (50 - Smeas).\left[\frac{65 + EImeas}{220 + EImeas}\right]$$

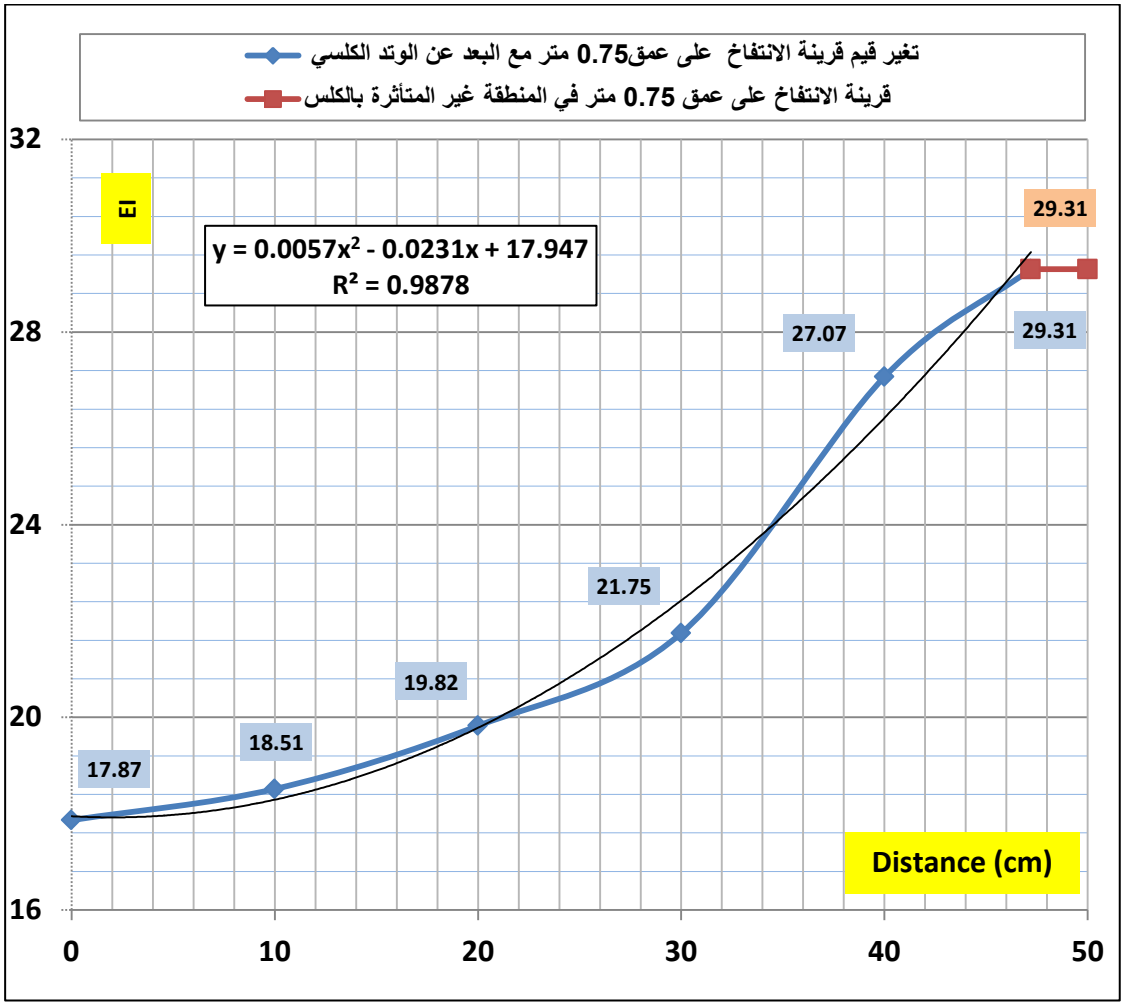
EI 50 : قرينة انتفاخ التربة من أجل درجة اشباع [% ( 1 ± 50 )=S ]

EI meas : قرينة انتفاخ التربة من أجل درجة اشباع [% ( 60 – 40 )=S ]

S meas : درجة اشباع التربة المحسوبة و الواقعة ضمن المجال [% ( 60 – 40 )=S ]

**تجربة قرينة الانتفاخ على عمق ( 0.75 ) m :**

يمثل الشكل رقم ( 86 ) أدناه تغير قيم قرينة الانتفاخ على عمق (0.75 ) m مع البعد عن الوتد الكلسي ومقارنتها بقيمة قرينة الانتفاخ لعينة التربة المأخوذة من نفس العمق من المنطقة غير المتأثرة بأوتاد الكلس على بعد (3) m عن السطح الخارجي للوتد الكلسي .




**شكل رقم (86) انخفاض قيم قرينة الانتفاخ على عمق ( 0.75 ) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي.**

إن الشكل رقم ( 86 ) يبين أن قيم قرينة الانتفاخ على عمق (0.75 ) m تنخفض مع الاقتراب من الوتد الكلسي ويتلاشى أثر أوتاد الكلس على قرينة الانتفاخ بعد مسافة (4.7 * D) من سطح الوتد الكلسي .

إن المنحني المقارب الذي يمثل العلاقة بين قيمة قرينة الانتفاخ للتربة و بعدها عن السطح الخارجي للوتد الكلسي تعطى معادلته بالشكل ( $y = 0.0057x^2 - 0.0231x + 17.947$ ) و بدرجة موثوقية 98.8 % حيث يرمز ( X ) الى بعد العينة عن السطح الخارجي للوتد الكلسي بينما يرمز ( y ) الى قيمة قرينة الانتفاخ لعينة التربة .

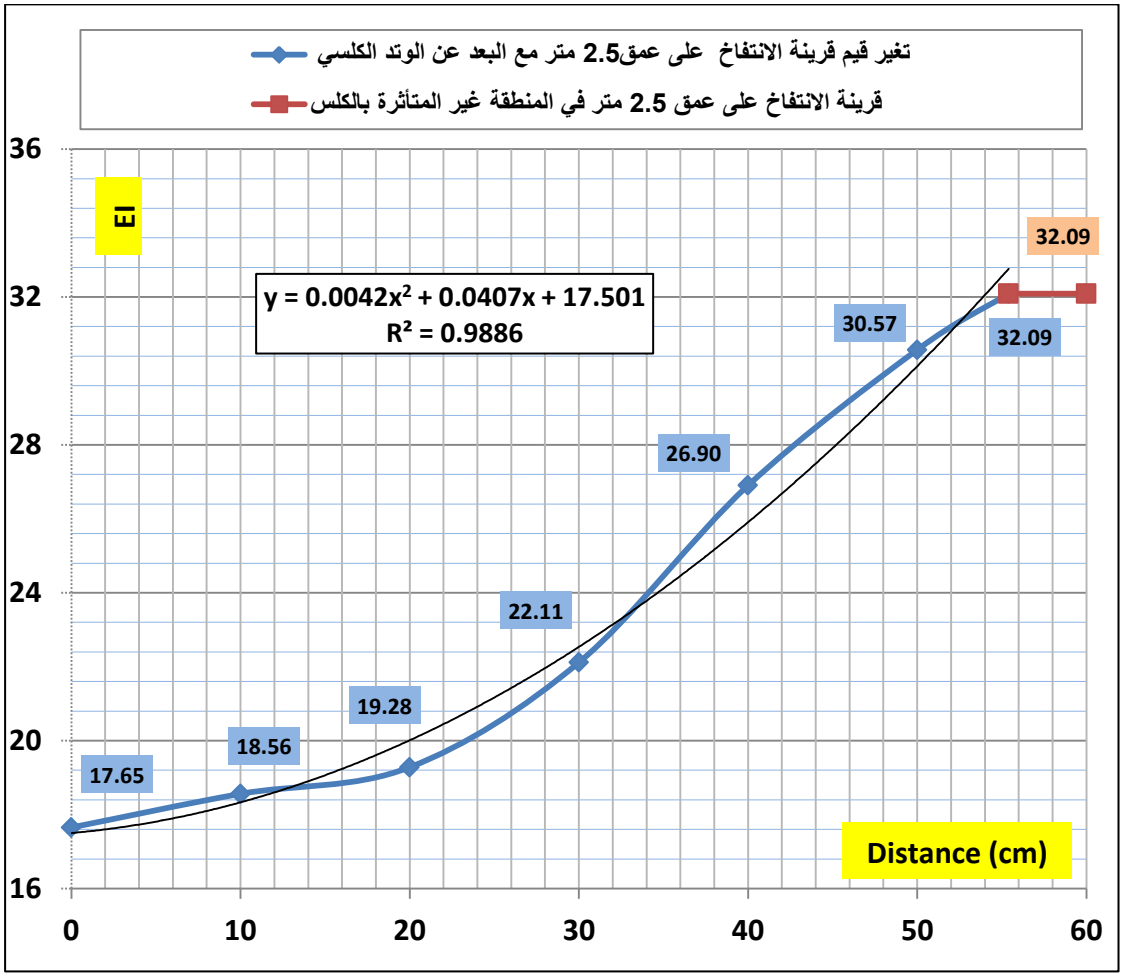
يوضح الجدول رقم (30 ) المبين أدناه نسب تناقص قيم ضغط الانتفاخ على عمق (0.75 ) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي .

| المجال | النسبة المئوية لانخفاض الانتفاخ النسبي |
|---|---|
| D *( 1 –0 ) | % 39 |
| D *( 2 –1 ) | % 37 |
| D *( 3 –2 ) | % 32 |
| D *( 4 –3 ) | % 26 |
| D *( 4.7 –4 ) | % 8 |

**جدول رقم (30) انخفاض قيم قرينة الانتفاخ على عمق (0.75 ) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي.**

### تجربة قرينة الانتفاخ على عمق ( 2.5 ) m :

يبين الشكل رقم ( 87 ) أدناه تغير قيم قرينة الانتفاخ على عمق ( 2.5 ) m مع البعد عن الوتد الكلسي ومقارنتها بقيمة قرينة الانتفاخ لعينة التربة المأخوذة من نفس العمق من المنطقة غير المتأثرة بالكلس على بعد (3) m عن السطح الخارجي للوتد الكلسي.




**شكل رقم (87) انخفاض قيم قرينة الانتفاخ على عمق ( 2.5 ) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي.**

يتبين من الشكل رقم (87 ) أن قيم قرينة الانتفاخ على عمق ( 2.5 ) m تنخفض مع الاقتراب من الوتد الكلسي ويتلاشى أثر أوتاد الكلس على قرينة الانتفاخ بعد مسافة (5.5* D) من سطح الوتد الكلسي.

إن المنحني المقارب الذي يمثل العلاقة بين قيم قرينة الانتفاخ للتربة و بعدها عن السطح الخارجي للوتد الكلسي تعطى معادلته بالشكل ( $y = 0.0042x^2 + 0.0407x + 17.501$ ) و بدرجة موثوقية 99% حيث يرمز ( X ) الى بعد العينة عن السطح الخارجي للوتد الكلسي بينما يرمز ( y ) الى قيمة قرينة الانتفاخ للعينة .

يوضح الجدول رقم ( 31 ) أدناه نسب انخفاض قيم قرينة الانتفاخ مع الاقتراب من السطح الخارجي للوتد الكلسي .

| المجال | النسبة المئوية لتناقص قرينة الانتفاخ |
|---|---|
| D *( 1 −0 ) | % 45 |
| D *( 2 −1 ) | % 42 |
| D *( 3 −2 ) | % 40 |
| D *(4 −3 ) | % 31 |
| D *(5 −4 ) | % 16 |
| D *(5.5 −5 ) | % 4.7 |

**جدول رقم (31) انخفاض قيم قرينة الانتفاخ للتربة على عمق ( 2.5 ) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي.**

- إن مفهوم قرينة الانتفاخ يشبه الانتفاخ النسبي , باستثناء أن تجربة الانتفاخ النسبي تجرى على عينات سليمة برطوبة طبيعية بينما تجرى تجربة قرينة الانتفاخ على عينات محضرة مخبرياً بدرجة اشباع ورص محددة . و بالتالي فان انخفاض قرينة انتفاخ التربة الغضارية لدى معالجتها بأوتاد الكلس تعود لذات الأسباب التي أدت لانخفاض الانتفاخ النسبي, والتي تلخص بنقصان سماكة الأغشية المائية المحيطة بذرات التربة الغضارية المعالجة بأوتاد الكلس مما يؤدي لانخفاض شراهة التربة الغضارية المعالجة للماء وانخفاض قابليتها للاحتفاظ به .

تبين القيم الواردة بالجدولين رقم (30 ) و (31 ) أن فعالية أوتاد الكلس في تخفيض قرينة الانتفاخ تزيد مع العمق حيث يلاحظ زيادة واضحة بنسب انخفاض قرينة الانتفاخ على عمق ( 2.5 ) m مقارنة مع مثيلاتها على عمق (0.75 ) m , كما يلاحظ زيادة مدى انتشار أثر الكلس حول الوتد

الكلسي على قرينة الانتفاخ من مسافة (4.7 *D) على عمق (0.75 ) m إلى مسافة (5.5* D ) على عمق (2.5 ) m , و يعود تفسير ظاهرة زيادة فعالية أوتاد الكلس وزيادة مدى انتشار أثرها على قرينة انتفاخ التربة مع زيادة العمق إلى ذات الأسباب التي أشرنا لها سابقاً و المتمثلة بتسرب شوارد الكاليسيوم ($Ca^{++}$) المنتشرة من الوتد الكلسي تدريجياً مع الماء وبفعل الجاذبية باتجاه الأسفل الأمر الذي يزيد من تركيزها وفعاليتها .

**4- 2- 10 تجربة PH :**

تم اجراء التجربة في مخبر ميكانيك التربة في كلية الهندسة المدنية بدمشق و فقاً للمواصفة (ASTM – D 4972 – 01 ) باستخدام جهاز PH دقيق ومعاير من مخبر الكيمياء بالكلية.

تعرف PH على أنها اللوغاريتم السالب لنشاط أيونات الهيدروجين [+H] pH = - log , و تفيد معرفة قيمة PH بتحديد قابلية انحلال منرالات التربة و قابلية انتقال الأيونات خلالها . يستخدم لقياس PH مقياس يسمى (Potentiometer ) تتم معايرته بمحاليل معايرة (Buffers) ذات قيم محددة و ثابتة (PH ) و معروفة مسبقاً .

تتلخص التجربة بتجفيف التربة بالهواء وهزها بواسطة المنخل رقم (10) ذو فتحات بأبعاد (2) mm , ثم نأخذ منها وزن حوالي (10) g , توضع في وعاء زجاجي ويضاف لها حوالي (10) mL مللي ليتر من الماء المقطر , تخلط التربة و الماء جيداً و يترك الوعاء الزجاجي مستقراً لمدة حوالي ساعة و احدة , بعدها يوضع حساس جهاز ( Potentiometer ) في المحلول و نقرأ قيمة PH .

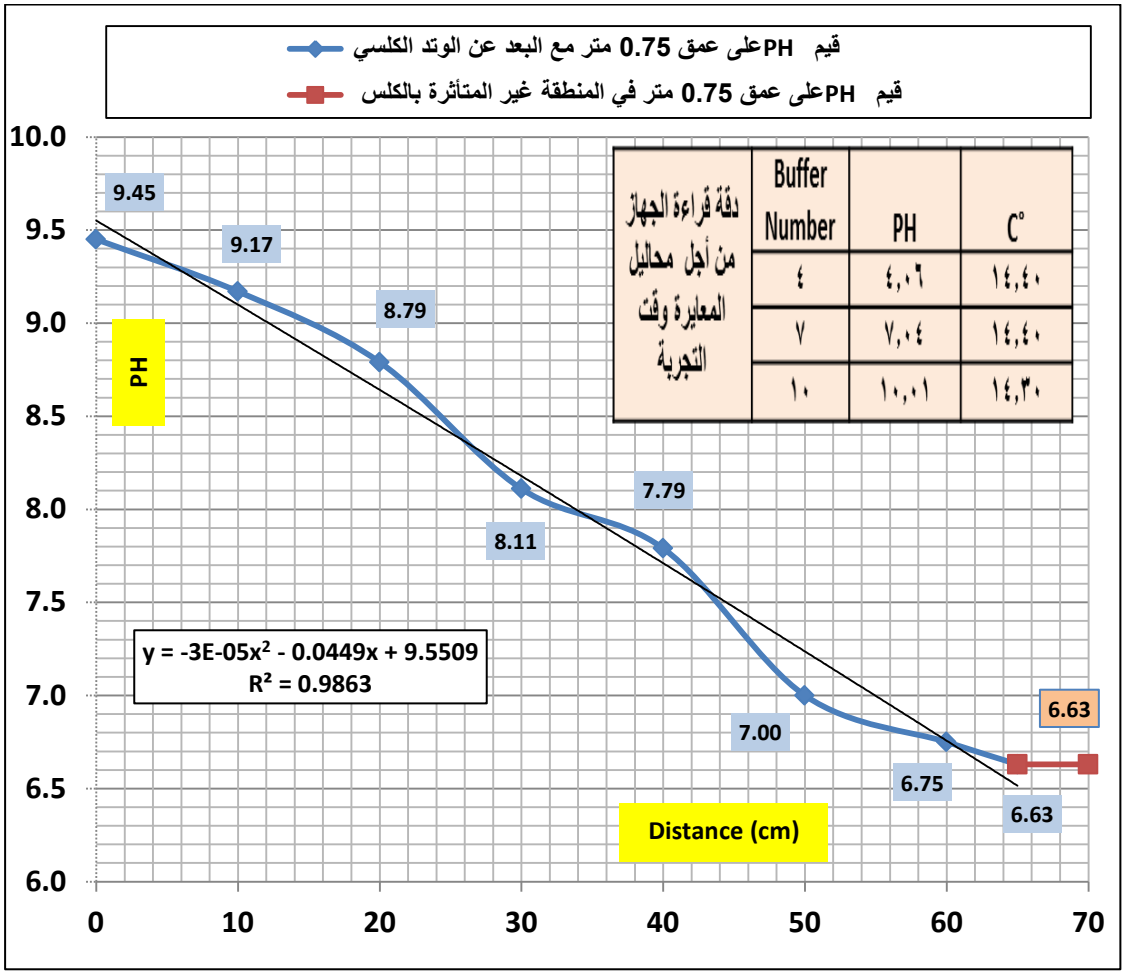
إن قيمة ( PH ) بالتربة في الحالة العادية بحدود (7 ) , وتقاس على مقياس مدرج من (3) الى (10) حيث تعتبر التربة وسط محايد اذا كانت قيمة [ PH = 7 ] , بينما اذا كانت قيمة [ PH >7 ] فالتربة قلوية , و إذا [ PH <7 ] فالتربة حمضية , ومن الثابت أن معالجة التربة بالكلس يؤدي لرفع قيمة (PH ) فيها.

تم إجراء تجربة ( PH ) في هذا البحث لتحقيق هدفين , يتمثل أولهما في التحقق من نتائج تجارب ميكانيك التربة بطريقة كيميائية من خلال معرفة تغير قيم ( PH ) في التربة مع الاقتراب من الوتد الكلسي , حيث تعبر قيم ( PH ) في التربة عن نسب وجود شوارد الكالسيوم ($Ca^{++}$) فيها . و يتمثل الهدف الثاني في رفع درجة الموثوقية في نتائج تجارب ميكانيك التربة المنفذة وذلك من خلال الوصول إلى نفس النتائج بطريقة كيميائية .

**شكل رقم ( 88) الجهاز المستخدم في قياس قيمة ( PH ) في التربة .**

### تجربة PH على عمق (0.75 ) m :

يمثل الشكل رقم ( 89 ) المبين أدناه تغير قيم ( PH ) على عمق ( 0.75 ) m مع البعد عن الوتد الكلسي ومقارنتها بقيمة ( PH ) لعينة التربة المأخوذة من نفس العمق من المنطقة غير المتأثرة بالكلس على بعد (3) m عن السطح الخارجي للوتد الكلسي.




**شكل رقم (89) ارتفاع قيم ( PH ) على عمق (0.75) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي.**

يبين الشكل رقم (89 ) أن قيم ( PH ) على عمق ( 0.75 ) m تتزايد مع الاقتراب من الوتد الكلسي ويتلاشى أثر أوتاد الكلس على قيم ( PH ) بعد مسافة (D * 6.5) من السطح الخارجي للوتد الكلسي .

إن المنحني المقارب الذي يبين العلاقة بين قيمة ( PH ) للتربة و بعدها عن السطح الخارجي للوتد الكلسي تعطى معادلته بالشكل( $y = -3E-05x^2-0.0449x + 9.5509$ ) و بدرجة موثوقية 98.6 % حيث يرمز ( X ) الى بعد العينة عن السطح الخارجي للوتد الكلسي بينما يرمز ( y ) الى قيمة (PH ) لعينة التربة .

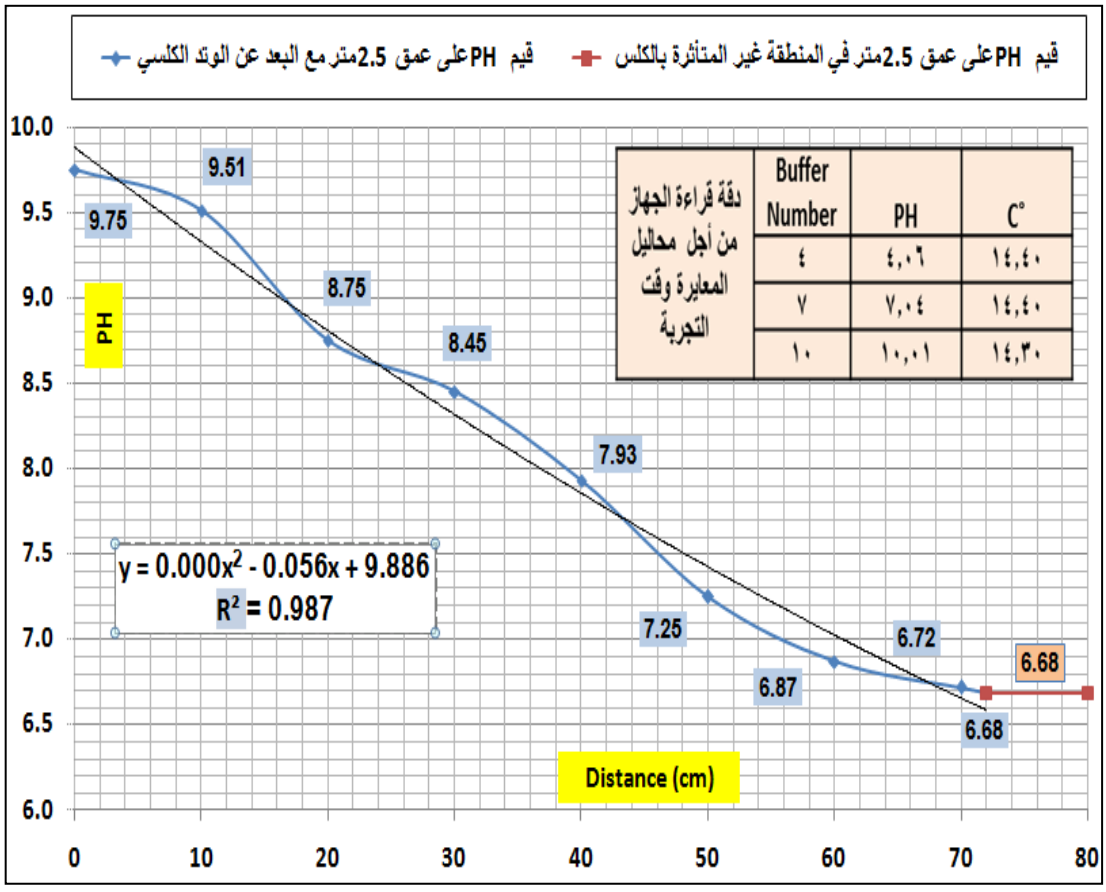
يبين الجدول رقم ( 32 ) نسب تزايد قيم ( PH ) على عمق ( 0.75 ) m مع الاقتراب من السطح الخارجي للوتد الكلسي .

| المجال | النسبة المئوية لارتفاع قيمة ( PH ) |
|---|---|
| D *( 1 −0 ) | % 43 |
| D *( 2 −1 ) | % 38 |
| D *( 3 −2 ) | % 33 |
| D *( 4 −3 ) | % 22 |
| D *(5 −4 ) | % 17 |
| D *(6 −5 ) | % 6 |
| D *(6.5 −6 ) | % 2 |

**جدول رقم (32) ارتفاع قيم ( PH ) للتربة على عمق ( 0.75 ) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي.**

**تجربة PH على عمق (2.5 ) m :**

يمثل الشكل رقم ( 90 ) المبين أدناه تغير قيم PH على عمق ( 2.5 ) m مع البعد عن الوتد الكلسي ومقارنتها بقيمة PH لعينة التربة المأخوذة من نفس العمق من المنطقة غير المتأثرة بالكلس على بعد (3) m عن السطح الخارجي للوتد الكلسي .




**شكل رقم (90) ارتفاع قيم (PH) على عمق ( 2.5 ) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي.**

يبين الشكل رقم (90 ) أن قيم PH على عمق ( 2.5 ) m تزداد مع الاقتراب من الوتد الكلسي ويتلاشى أثر أوتاد الكلس على PH بعد مسافة (7.2* D) من السطح الخارجي للوتد الكلسي.

إن المنحني المقارب الذي يبين العلاقة بين قيم PH للتربة و بعدها عن السطح الخارجي للوتد الكلسي تعطى معادلته بالشكل ( $y = 0.0002x^2 - 0.0568x + 9.886$ ) و بدرجة موثوقية 98.7 % حيث يرمز ( X ) الى بعد العينة عن السطح الخارجي للوتد الكلسي بينما يرمز ( y ) الى قيمة PH .

يوضح الجدول رقم (33) المبين أدناه نسب تزايد قيم PH مع الاقتراب من الوتد الكلسي على عمق ( 2.5 ) m .

| المجال | النسبة المئوية لتزايد قيم PH |
|---|---|
| D *( 1 −0 ) | % 46 |
| D *( 2 −1 ) | % 42 |
| D *( 3 −2 ) | % 31 |
| D *(4 −3 ) | % 26 |
| D *(5 −4 ) | % 19 |
| D *(6 −5 ) | % 8.5 |
| D *(7.2 −6 ) | % 3 |

**جدول رقم (33) ارتفاع قيم (PH ) للتربة على عمق ( 2.5 ) m مع الاقتراب من الوتد الكلسي**

إن كافة نتائج تجارب ميكانيك التربة التي أجريت في سياق تنفيذ هذا البحث تبين حصول تحسن واضح في مواصفات التربة الغضارية المعالجة وخاصة فيما يخص تخفيض خواصها الانتفاخية ، و أن انتشار أثر أوتاد الكلس على التربة المدروسة يمتد حول الوتد الكلسي الى مسافة حوالي (D*5 ) من سطحه الخارجي .

بهدف زيادة درجة الموثوقية في نتائج تجارب ميكانيك التربة سابقة الذكر و التي اجريت في سياق تنفيذ هذا البحث و لاسيما تجارب الانتفاخ ( ضغط انتفاخ , انتفاخ نسبي , قرينة انتفاخ ) و تجارب حدود أتربرغ , فقد ارتأينا التحقق من تلك النتائج بطريقة أخرى ( كيميائية ) عن طريق تتبع تغير قيم PH في التربة مع الاقتراب من الوتد الكلسي حيث أن التغير بقيم PH ينتج و يعبر عن تغير نسب وجود شوارد الكالسيوم في التربة.

إن تغير قيم PH في التربة " الواردة في الشكلين رقم ( 89 ) و ( 90 ) " مع البعد عن السطح الخارجي للوتد الكلسي ومقارنتها بقيمة PH للتربة المأخوذة من نفس العمق ولكن من المنطقة غير المتأثرة بالكلس أي على بعد (3 ) m عن السطح الخارجي للوتد الكلسي , تبين أن شوارد الكالسيوم قد انتشرت في التربة حول الوتد الكلسي لمسافة تتراوح بين ( 6.5 – 7 )* D إلا أن التغير الحاصل بقيم PH بعد مسافة ( 5*D ) من الوتد الكلسي لا يتعدى 8.5 % وهي قيمة صغيرة لا تحدث أثراً يذكر على خواص التربة .

وبالتالي فإن نتائج تجارب ميكانيك التربة المخبرية و نتائج تجارب PH الكيميائية تكاد تتطابق حول نتيجة واحدة مفادها أن أثر أوتاد الكلس على خواص التربة و لا سيما ( ضغط الانتفاخ , الانتفاخ نسبي , قرينة الانتفاخ , قرينة اللدونة ) ينتشر أفقياً حو الوتد الكلسي لمسافة حوالي ( 5 * D ) من سطحه الخارجي .

إن فعالية أوتاد الكلس تزيد مع العمق حيث يلاحظ زيادة واضحة بنسب ارتفاع قيم PH على عمق (2.5 ) m مقارنة مع مثيلاتها على عمق (0.75 ) m , كما يلاحظ زيادة مدى انتشار أثر أوتاد الكلس حول الوتد الكلسي على قيم ( PH ) من مسافة (6.5 * D) على عمق (0.75 ) m الى مسافة (7.2* D) على عمق (2.5 ) m , و يعود تفسير ذلك إلى ذات الأسباب التي أشرنا لها سابقاً و المتمثلة بتسرب شوارد الكاليسيوم ($Ca^{++}$ ) المنتشرة من الوتد الكلسي تدريجياً مع الماء وبفعل الجاذبية باتجاه الأسفل الأمر الذي يزيد من تركيزها وفعاليتها .

## 4- 2-11 تجربة الاستهلاك الأولي للكلس:

إن الهدف من هذه التجربة هو تحديد النسبة الدنيا من الكلس اللازم اضافتها للتربة الغضارية الانتفاخية المدروسة للحصول على تحسين واضح لخواصها, لذلك يجب أن تكون نسب الكلس المراد إضافتها للترب الغضارية الانتفاخية لتحسين خواصها أعلى من القيمة المحددة بهذه التجربة .

إن المبدأ الأساسي لهذه التجربة يعتمد على إضافة كمية كافية من الكلس للتربة المراد تحسينها للوصول إلى درجة قلوية في التربة المعنية تعادل ( PH = 12.4 ) و ذلك لضمان استمرارية التفاعل البوزولاني بين التربة والكلس .

أجريت هذه التجربة في مخبر ميكانيك التربة بكلية الهندسة المدنية بجامعة دمشق وفقاً للمواصفة ( ASTM- D 6276-99 a ) و كانت النتائج كما هو مبين في الجدول أدناه :

| عينة تربة غير متأثرة بالكلس على عمق (0.75) m ومسافة (3) m من السطح الخارجي للوتد الكلسي | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| نسبة الكلس | 2 % | 3 % | 4 % | 5 % | 6 % | 2 gram |
| قيمة PH | 12.29 | 12.36 | 12.42 | 12.46 | 12.47 | 12.83 |
| درجة الحرارة C° | 25.30 | 25.10 | 25.50 | 25.00 | 25.10 | 25.10 |

**جدول رقم ( 34 ) نتائج تجربة الاستهلاك الأدنى من الكلس**

وفقاً للجدول رقم ( 34 ) فان النسبة الدنيا المقبولة الواجب اضافتها للتربة الغضارية المدروسة لتحسين خواصها هي ( 4 % ) من الوزن الجاف لها كونها تؤمن قلوية بالتربة تساوي (12.4) .

**شكل رقم (91) اجراء تجربة الاستهلاك الأدنى من الكلس**

**4- 3 مقارنة اقتصادية بين طريقة أوتاد الكلس المكروية وطريقة الخلط المباشر بالكلس من حيث كمية الكلس المستخدمة :**

**طريقة أوتاد الكلس المكروية :**

- وزن الكلس الحي المطحون المستخدم في الوتد الكلسي الواحد :

إن وزن أحجار الكلس الحي ( CaO ) المستخدمة في البحث ( 400 ) kg , طحنت في معمل اسمنت عدرا و استخدمت لتنفيذ (7) أوتاد كلسية بقطر (10 ) cm و عمق ( 6 ) cm .

وزن الكلس الحي المطحون المستخدم في الوتد الكلسي الواحد $= \frac{400}{7} = 57.14 \ kg$

- وزن التربة المحسنة باستخدام وتد كلسي واحد :

إن نتائج التجارب بينت أن أثر أوتاد الكلس على تحسين مواصفات التربة الغضارية ينتشر حول الوتد الكلسي لمسافة حوالي (5*D ) اعتباراً من السطح الخارجي للوتد الكلسي , و باعتماد أن مجال التأثير الفعال لأوتاد الكلس يمتد فقط حتى مسافة ( 3*D = 30 cm ) من السطح الخارجي للوتد الكلسي , و بإهمال وزن التربة المحسنة بالكلس تحت الوتد الكلسي و الذي تشير الأبحاث أن تأثير أوتاد الكلس يمتد شاقولياً لمسافة لا تقل عن ( 2*D ) اعتباراً من منسوب أسفل الوتد الكلسي , و حيث أن الوزن الحجمي الطبيعي الوسطي للتربة الغضارية الانتفاخية المدروسة في المنطقة غير المتأثرة بالكلس على مسافة (3 ) m من السطح الخارجي للوتد الكلسي وعلى العمقين ( 0.75 ) و (2.5 ) m تساوي ( 1.88) g /cm³ , و عليه يكون :

وزن التربة المحسنة باستخدام وتد كلسي واحد $= \pi.(0.30)^2 \times 6 \times 1.88 \times 1000 = 3189$ kg

**طريقة الخلط المباشر بالكلس:**

- وزن الكلس المطلوب لتحسين تربة وزنها ( 3189 ) kg بطريقة الخلط المباشر بالكلس بنسبة ( 4 % ) .

وزن الكلس الحي المطحون اللازم لتحسين ( 3189) kg تربة $= 3189 \times 0.04 = 127.56 \ \boldsymbol{kg}$

**التوفير في كمية الكلس المستهلكة :**

النسبة المئوية الدنيا للتوفير بكمية الكلس المستخدم في حالة تطبيق طريقة أوتاد الكلس المكروية

$$\frac{(127.56 - 57.14)}{127.56} = 55.2\ \%$$

| مقارنة اقتصادية بين كمية الكلس المستخدمة بطريقة أوتاد الكلس المكروية و طريقة الخلط المباشر للكلس مع التربة | |
|---|---|
| وزن الكلس الحي المطحون المستخدم في الوتد الكلسي الواحد | $\text{Lime Weight} = \frac{400}{7} = 57.14 \text{ kg}$ |
| وزن أحجار الكلس الكلس الحي ( CaO) المستخدمة في البحث . | 400 kg |
| عدد الأوتاد الكلسية المنفذة | 7 |
| وزن التربة المحسنة باستخدام وتد كلسي واحد | $\text{Treated Soil Weight}$ $\pi \times (0.3)^2 \times 6 \times 1.88 \times 1000 = 3189\ kg$ |
| اعتبرت مسافة الانتشار الفعال لأثر أوتاد الكلس على خواص التربة فقط ( 3*D) | 0.30 m |
| عدد الأوتاد الكلسية | 6 |
| الوزن الحجمي الطبيعي للتربة الغضارية المدروسة في المنطقة غير المتأثرة بالكلس على بعد (3) m من السطح الخارجي للوتد الكلسي. | 1.88 g/cm³ |
| وزن الكلس المطلوب لتحسين تربة و زنها (3189 ) kg بطريقة الخلط المباشر بنسبة 4 % | $Lime\ Weight = 3189 \times 0.04 = 127.56\ Kg$ |
| وزن التربة المحسنة بالوتد الكلسي الواحد | 3189 |
| النسبة الدنيا المقبولة من الكلس لتحسين التربة الغضارية المدروسة | % 4 |
| النسبة المئوية الدنيا للتوفير في كمية الكلس المستخدم في حالة تطبيق طريقة أوتاد الكلس المكروية | $Minmum\ Saved\ Amount\ of\ Lime$ $\frac{127.56 - 57.14}{127.56} = 55.2\ \%$ |

**جدول رقم (35 ) مقارنة اقتصادية بين كمية الكلس المستخدمة بطريقة أوتاد الكلس المروية و طريقة الخلط المباشر للكلس مع التربة**

في معرض المقارنة بين طريقة الخلط المباشر للكلس مع التربة الغضارية الانتفاخية وطريقة أوتاد الكلس المكروية المستخدمتين لتحسين خواص التربة الغضارية الانتفاخية لا بد من الإشارة الى النقطتين التاليتين :

- إضافة إلى التوفير الحاصل بكمية الكلس اللازمة لتحسين خواص التربة الغضارية الانتفاخية عند معالجتها بطريقة أوتاد الكلس المكروية مقارنة بطريقة الخلط المباشر والبالغة (52.2 % ) , فإن لطريقة أوتاد الكلس المكروية فوائد أخرى تتمثل بإمكانية الوصول الى طبقات التربة الغضارية الانتفاخية العميقة وتحسين خواصها , في حين يستحيل تطبيق طريقة الخلط المباشر بالكلس في مثل هذه الحالة .

- في حالة معالجة التربة الغضارية بالخلط المباشر مع الكلس نحصل على تربة معالجة متجانسة أي يحصل تحسن عام و بسوية و احدة بمواصفات التربة الغضارية المعالجة , في حين أنه في حالة المعالجة بأوتاد الكلس فإن تحسن المواصفات ينخفض تدريجياً مع الابتعاد عن الوتد الكلسي .

# الفصل الخامس

## النتائج والتوصيات

### 5-1 النتائج :

### 5-1-1 النتيجة العامة للبحث :

أثبت هذا البحث حقلياً ومخبرياً فعالية أوتاد الكلس الميكروية لتخفيض ضغط الانتفاخ والانتفاخ النسبي وقرينة الانتفاخ وقرينة اللدونة في التربة الغضارية الانتفاخية المدروسة , وأن أثر أوتاد الكلس لتحسين خواص التربة ينتشر لمسافة حوالي (5*D) من السطح الخارجي للوتد الكلسي , ويتركز الأثر الفعال لأوتاد الكلس ضمن مسافة (3*D ) .

### 5-1-2 نتائج الدراسة الحقلية :

- انخفاض انتفاخ التربة الغضارية الانتفاخية المدروسة بعد اكتمال الموسم المطري من (13) mm للبلاطة المستندة على الأرض مباشرة بدون أوتاد كلسية إلى (4) mm للبلاطة المستندة على وتد كلسي وحيد , و إلى (3) mm للبلاطة المستندة على خمسة أوتاد كلسية .

- انخفاض انتفاخ التربة الغضارية الانتفاخية المدروسة في حالة في حالة الهطول المطري الأعظمي بنسبة ( 42 % ) في حالة بلاطة تستند على خمسة أوتاد كلسية , و بنسبة ( 37% ) في حالة بلاطة على تستند على وتد كلسي وحيد .

- العمل الجماعي لأوتاد الكلس يزيد من فعالية هذه التقنية في تحسين خواص التربة نتيجة تداخل مناطق تأثير الأوتاد الكلسية وفي بحثنا زادت الفعالية بنسبة 5% .

### 5-1-3 نتائج الدراسة المخبرية :

- ينخفض حد السيولة مع الاقتراب من الوتد الكلسي , وبلغ الانخفاض الأعظمي عند سطح الوتد الكلسي ( 14.6 % ) , و ينتشر أثر أوتاد الكلس على حد السيولة حتى مسافة (D*5.3 ) من السطح الخارجي للوتد الكلسي .

- يزداد حد اللدونة مع الاقتراب من الوتد الكلسي , بلغت الزيادة العظمى عند سطح الوتد الكلسي ( 13.2 % ) , و ينتشر أثر أوتاد الكلس على حد اللدونة حتى مسافة ( D*4.9 ) من السطح الخارجي للوتد الكلسي .

▪ تنخفض قرينة اللدونة مع الاقتراب من الوتد الكلسي , و بلغ الانخفاض الأعظمي عند سطح الوتد الكلسي بنسبة ( 40 % ) ، و ينتشر أثر أوتاد الكلس على قرينة اللدونة حتى مسافة ( D*5.2 ) من السطح الخارجي للوتد الكلسي .

▪ نتيجة معالجة التربة الغضارية بأوتاد الكلس انخفضت نسبة حبيبات التربة الناعمة و الموافقة لقياس حبيبات الغضار و زادت نسبة حبيبات التربة الموافقة لقياس حبيبات السيلت , , وقد ظهر هذا الأثر من خلال تحول تصنيف التربة من غضار عالي اللدونة ( CH ) الى سيلت منخفض اللدونة (ML ) وفق التصنيف الموحد USCS . وقد تركز هذا الأثر بشكل أساسي ضمن مسافة التأثير الفعال لأوتاد الكلس حتى (D*3) من السطح الخارجي للوتد الكلسي وتناقص تدريجياً بالابتعاد عنه .

▪ ينخفض الانتفاخ النسبي مع الاقتراب من الوتد الكلسي , وبلغ الانخفاض الأعظمي عند سطح الوتد الكلسي بنسبة ( 44 % ) على وهذا يتطابق مع نتائج القياس الحقلي للانتفاخ بحالة غمر التربة و محاكاة حالة الهطول المطري الأعظمي حيث انخفض انتفاخ التربة بتأثير أوتاد الكلس بنسبة ( 42 % ) . و ينتشر أثر أوتاد الكلس على الانتفاخ النسبي للتربة حتى مسافة ( D* 5.7 ) .

▪ ينخفض ضغط الانتفاخ مع الاقتراب من الوتد الكلسي , وبلغ الانخفاض الأعظمي عند سطح الوتد الكلسي بنسبة (45 % ) . وينتشر أثر أوتاد الكلس على ضغط الانتفاخ للتربة حتى مسافة (D*5.7 ) من السطح الخارجي للوتد الكلسي .

▪ تنخفض قرينة الانتفاخ مع الاقتراب من الوتد الكلسي , وبلغ الانخفاض الأعظمي عند سطح الوتد الكلسي بنسبة ( 45 % ) . وينتشر أثر أوتاد الكلس على قرينة الانتفاخ للتربة حتى مسافة ( D*5.5 ) من السطح الخارجي للوتد الكلسي.

▪ بينت نتائج التجربة الكيميائية لقياس قيمة ( PH ) و التي تعبر نسبة وجود شوارد الكالسيوم ($Ca^{++}$) في التربة حول الوتد الكلسي , أن قيمة PH تزداد مع الاقتراب من الوتد الكلسي , و قد بلغت نسبة الزيادة العظمى في قيمة ( PH ) عند سطح الوتد الكلسي (46 % ) , و تلاشى أثر أوتاد الكلس على قيمة ( PH )عند مسافة (D*7.2 ) , إلا أن الزيادة بقيمة PH بعد مسافة ( D*5 ) ضئيلة و لا تتعدى ( 1% ) و بالتالي ليس لها تأثير ملحوظ على خواص التربة , و هو ما يؤكد نتائج تجارب ميكانيك التربة التي تم اجراؤها في سياق هذا البحث و التي بينت أن مسافة انتشار أثر أوتاد الكلس هي بحدود (D*5) من السطح الخارجي للوتد الكلسي.

▪ بينت جميع التجارب التي تم اجراؤها في سياق تنفيذ هذ البحث أن فعالية أوتاد الكلس لتحسين خواص التربة تزداد مع زيادة العمق وهو ما يتفق مع نتائج الدراسات السابقة .

▪ إن أثر أوتاد الكلس لتحسين خواص التربة الغضارية الانتفاخية ينتشر لمسافة حوالي ( 5*D ) من السطح الخارجي للوتد الكلسي , وبتحليل شدة هذا الأثر بحسب البعد عن الوتد الكلسي فانه يمكن تقسيم مجال تأثير أوتاد الكلس على الشكل التالي :

( 0 –2)*D نطاق التأثير الأساسي Main Influence Zone

( 2 – 3)*D نطاق التأثير الفعال Effective Influence Zone

( 3 –4 )*D نطاق التأثير المتوسط Medium Influence Zone

( 4 – 5)*D نطاق التأثير الضعيف Low Influence Zone

**5–1–4 نتائج الدراسة الاقتصادية :**

إن استخدام تقنية أوتاد الكلس المكروية لتحسين خواص التربة الغضارية الانتفاخية يحقق توفير بكمية الكلس اللازمة للمعالجة بما لا يقل عن ( 55.2 % ) كحد أدنى بالمقارنة مع طريقة الخلط المباشر للتربة مع الكلس .

**5–1–5 العلاقات الرياضية لتغير المواصفات الأساسية للتربة الغضارية الانتفاخية نتيجة المعالجة بأوتاد الكلس منسوبة إلى قطر الوتد الكلسي ( D ):**

| معادلات تغير الخواص الأساسية للتربة نتيجة معالجتها بأوتاد الكلس منسوبة إلى ( قطر الوتد الكلسي $D$ ) | | | |
|---|---|---|---|
| خواص التربة | العمق | العلاقة الرياضية | درجة الوثوقية $R^2$ |
| الانتفاخ النسبي | 2.5 | $PS = 3*10^{-5}D^2 + 0.00441D + 3.9059$ | 0.9878 |
| ضغط الانتفاخ | 2.5 | $SP = 0.000124D^2 + 0.11564D + 125.4$ | 0.9923 |
| قرينة الانتفاخ | 2.5 | $SI = 0.000042D^2 + 0.00407D + 17501$ | 0.9886 |
| قرينة اللدونة | 2.5 | $PI = -0.000005D^2 - 0.02442D + 16.927$ | 0.9903 |

**جدول رقم (36) العلاقات الرياضية لتغير المواصفات الأساسية للتربة الغضارية المدروسة المعالجة بأوتاد الكلس منسوبة الى قطر الوتد الكلسي (D )**

## 5-2 التوصيات و الآفاق البحثية :

**التوصيات :**

- استخدام تقنية أوتاد الكلس المكروية عند التأسيس على الترب الغضارية الانتفاخية وخاصة في الحالات التي تكون فيها التربة الغضارية تمتد لأعماق كبيرة بعد اجراء مقارنة اقتصادية مع الحلول الأخرى .

- استخدام تقنية أوتاد الكلس المكروية لترميم وتدعيم أساسات المنشآت المتضررة نتيجة وجودها على تربة غضارية انتفاخية وخاصة المنشآت التاريخية والأثرية .

**آفاق بحثية :**

- التوسع في دراسة تقنية أوتاد الكلس المكروية في مجالات ( تثبيت المنحدرات وجدران الحفريات العميقة , التخفيف من الضغوط و التشوهات التي تتعرض لها الجدران الاستنادية في الترب الغضارية الانتفاخية ) حيث يتوقع أن تكون لها نتائج إيجابية .

- التعمق بدراسة موضوع زيادة فعالية أوتاد الكلس لتحسين خواص التربة الغضارية الانتفاخية مع زيادة العمق وفي المنطقة تحت قاعدة الوتد الكلسي .

- التعمق بدراسة موضوع العمل الجماعي لأوتاد الكلس و إيجاد البعد الأمثلي بين الأوتاد وعلاقته بقطر الوتد لتحقيق الجدوى الاقتصادية المنشودة من استخدام هذه التقنية.

- الاستفادة من الأوتاد الكلسية والبلاطات البيتونية المنفذة في الموقع لزوم إجراء هذا البحث لتكون مادة لدراسات لاحقة تتعلق بموضوع ديمومة أثر الكلس على خواص التربة الغضارية الانتفاخية وخاصة أنه مضى على تنفيذها عدة سنوات.

# الفصل السادس

## المراجع References :


[1] Al-RAWAS.A.A and GOOSEN.M.F.A,London, UK (2006), ISBN13 978 - 0 - 415 - 39681 - 3 " Expansive *Soils* – Recent Advances in Characterization and Treatment " .

[2] Day, Robert W. USA , (2006), ISBN13 978 - 0 - 415 - 39681 - 3 " Foundation Engineering Handbook " ISBN 0 - 07-144769 -5

[3] Chen. F.H.USA , (1988), " Foundation on Expansive Soils " ISBN 0- 444 – 43036 - 9 ( Vol . 54 ).

[4] Mitchell .J.K and Kenichi .S ,USA (2005), " Fundamentals of Soil Behavior " Third Edition" ISBN 13 - 978 – 0 -471- 46302 -7.

[5] MUNTOHAR.A.S and LIAO.H.J, Taiwan " Strength Distribution of Soft Clay Surround Lime-Column " .

[6] Wong.P.K،Malaysia (2001) ," Ground Improvement Case Studies Chemical Lime Piles and Dynamic Replacement ".

[7] Zoubir. W, Harichan. K, Ghrici. M,(2013) " Eeffect of Lime and Natural Pozzolana on Dredged Sludge Engineering Properties " , EJGE, Vol. 18, Bund. C

[8] Sarhan.A , (2009), Syria , " Kalk-MikropfahlezurReduzierung des Quell-drucksbeiGrundungen in Stark Quellfahigen Boden " Bodenverbesserung , GeotechnikFachzeitschrift ( 32 (2009) Nr.4 )

[9] Bromwell and Carrier ,Inc . Florida , (1994), " Stabilization of Phosphatic Clay Using Lime Columns " FIPR - 02-088-102 .

[10] Abdelmadjid.L and Muzahim.A, India , (2008), " Effect of Hydrated Lime on the Engineering Behaviour and theMicrostructure of Highly Expansive Clay " The 12th IACMAG , (1- 6 ) October, 2008 Goa, India.

[11] GUETTALA. A , HOUARI . H, MEZGHICHE. B , andCHEBILI. R. ,Algeria , (2002) , " Durability of Lime Stabilized Earth Blocks " Courrier du Savoir – N°02, Juin 2002, pp. 61-66.

[12] PUPPALA . A.J. , Madhyannapu.R.S, Nazarian .S , Yuan.D , Hoyos.L.R ,Texas (2008) , " Deep Soil Mixing Technology for Mitigation of Pavement Roughness " .

[13] PULLING. N.J, Malaysia (2005), " Determination of Optimum Concentration of Lime Solution for Soil Stabilization " .

[14] DAS.M.Braja , Clifornia State University, (2006). " Principles of Geotechnical Engineering " Fifth Edition , , ISBN 0-534-55144-0

[15] DAS.M.Braja , USA , (2006). " Fundamentals of Geotechnical Engineering " Fourth Edition , ISBN-13: 978-1-111-57675-2

[16] Russell L. Buhlerand Amy B. Cerato2007 " Stabilization of Oklahoma Expansive Soils Using Lime and Class C FlyAsh " GeoDenver: New Peaks in Geotechnics. GSP 162: Problematic Soils and Rocks and In Situ Characterization. Denver,CO, Feb. 18 - 21, 2007. CD

[17] Nelson, J.D. and Miller, D.J. (1992). " Expansive soils: problems and practice in foundation and pavement engineering " . John Wiley & Sons, inc. New York, 1992.

[18] Okasha.T.M. and Abduljauwad.S.N. (1992) " Expansive soil in A1-Madinah, Saudi Arabia. Applied Clay Science " . 7 (1992) 271-289 271 Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam

[19] Abdullah A. S., D.J. (2005). " Geotechnical properties of expansive clay shale in Tabuk, Saudi Arabia " . Journal of Asian Earth Sciences 25 (2005) 747–757.

[20] SAPZ .B. and Erol .O , turkey , (2004). " Lateral Versus Vertical Swell Pressures in Expansive Soil " Fourth Edition , , ISBN-13: 978-1-111-57675-2

[21] National lime Association (2004), Lime-Treated Soil Construction Manual , Lime Stabilization and Lime Modification, National lime Association, USA

[22] National lime Association (2001) , Using Lime for Soil Stabilization and Modification a proven Solution, National lime Association, USA

[23] Robert L. Parsons , Chad P. Johnson , Stephen A. Cross, University of Kansas , (2001) . " Evaluation of Soil Modification Mixing Procedures " Report No. K-TRAN: KU-00-6 , Final Report .

[24] يني . حنا , (1989) ميكانيك التربة, جامعة دمشق .

[25] براجام . داس , هندسة الأساسات , الفصل العاشر ( الأساسات على ترب قابلة للانتفاخ ) , ترجمة م . لمى و فائيمراجعة د . م . عمار كعدان .

[26] سليم . باسل و المنصوري عبد الرحمن (٢٠٠٣) " دراسة مواصفات التربة الانتفاخية في محافظة درعا " مجلة جامعة دمشق – المجلد التاسع – العدد الثاني .

[27] عبود . نزيه راشد ( ٢٠٠٦ ) " الصعوبات العملية في استخدام الترب الغضارية ذات الانتفاخ الشديد كمواد إنشاء للأجزاء الكتيمة من السدودالترابية " , مجلة باسل الأسد للعلوم الهندسية العدد رقم ( 22 ) لعام 2006 .

[28] المهيدب . عبد الله بن إبراهيم( 2002 ) " خواص التربة القابلة للانتفاخ في المملكة العربية السعودية " .

[29] المؤسسة العامة للجيولوجيا – دليل الخامات المعدنية - 2010

# ABSTRACT

# Effectiveness of Micro Lime Piles to Reduce Swelling Potential and Pressure of Expansive Clay.

**Eng. Mohammad ALHAJ [*], Dr. Talal AWWAD[**]**

**ABSTRACT:**

Clayey expansive soils are widespread in Syria. It has the ability to change its volume because of a change in its water content.
Due to the negative effects of this soils on Structures , which built by using this soil as construction material such as dams , or structures which laid on it, furthermore the high cost of current solution used to found the structures on such type of problematic soils, we believe that it is suitable to study a new technique for improving the expansive characteristics of the soil by using the technique of micro lime piles.

A lot of researches studied the topic of chemical improvement by adding lime especially through direct mixing soil with lime, while researches which deal with lime piles are very few, even those which did, they did it in the laboratory on a laboratory scale model .

Taking all these causes in consideration , and being the way of direct mixing lime with soil is impossible in the case of thick and deep expansive clayey soils, all the referred reasons make studying this topic of " effectiveness of micro lime piles to reduce swelling potential and pressure of expansive clay " is worth doing .

This research was done on expansive clayey soil , which makes negative effects on most of structures in the area such as cracks in the walls and ceilings.
This study is consisting of two parts, the first one is in the field , it aims to check and know actually the effectiveness of micro lime piles technique to improve the swelling characteristics of this expansive clayey soils. In the field part of the research, seven micro lime piles with diameter of (10) cm and length of (6) m were installed in the research site, and three concrete slabs were done. The first slab was laid on five micro lime piles, while the second one was laid on only one micro lime pile; the third slab was directly laid on the ground without micro lime piles. The elevation of these concrete slabs was observed by an accurate (Nevo ) while the total rainfall was increasing .

It was concluded that , the technique of micro lime piles is effective to reduce the percent swell, swelling pressure, expansion index and plasticity index of this soil. The expansion of soil was reduced by the effect of micro lime pile to 37% in the case of concrete slab laid on one lime pile , while it was reduced to 42% in the case of concrete slab laid on five lime piles, because of the overlap effect of micro lime piles when they work as a group.

The second part of this research aims to know the spreading distance of the calcium ions ( $Ca^{++}$) i.e. the ions migration distance, and the effectiveness of lime horizontally around the lime piles. It was digging and removing the soil around the lime pile and showing it after about one and half year from the date of installation, it was taken undisturbed samples on deferent distances of lime piles and on the depth of ( 0.75) m and ( 2.5) m , in addition to one unaffected sample in these two depths at a distance of (3) m from the lime pile .

It was done all the laboratory tests especially swelling pressure , percent swell , expansion index and plasticity index , and compare the results of the lime affected samples and unaffected ones .

It was concluded that, this technique is effective to improve the swelling characteristics of this soil . Also it was found that the effect of lime column / pile on the soil properties especially swelling characteristics spread to about ( 5*D ) , where ( D ) represent the diameter of the lime pile , while the effective zone of lime migration was found to be only up to ( 3*D ) .

The equations which correlate the values of swelling pressure , percent swell, swelling index and plasticity index with the distance of samples from the outside surface of lime pile were concluded . The equation of changes in the main properties of clayey soils (include percent swell, swelling pressure, swelling index and plasticity index) because of lime treatment are shown in the Following Table.

*Mathematical Equation of Changes ( improvements) occurred on the main Soil Properties because of Lime Pile treatment , the changes are correlated with distance from the outside surface of lime pile which expressed with the lime pile Diameter (D ) cm*

| *Reliability ( $R^2$ )* | *Formula of changes in the main soil properties because of Lime pile treatment* | *Depth* | *Soil Properties* |
|---|---|---|---|
| 0.9867 | $PI = 0.000002D^2 - 0.02036D + 23.817$ | 0.75 | Plasticity Index |
| 0.9903 | $PI = -0.000005D^2 - 0.02442D + 16.927$ | 2.5 | |
| 0.9843 | $PS = 5 * 10^{-7}D^2 - 0.00333D + 2.21348$ | 0.75 | Percent Swell |
| 0.9878 | $PS = 3 * 10^{-5}D^2 + 0.00441D + 3.9059$ | 2.5 | |
| 0.9869 | $SP = 0.000213D^2 + 0.006549D + 100.27$ | 0.75 | Swelling Pressure |
| 0.9923 | $SP = 0.000124D^2 + 0.11564D + 125.4$ | 2.5 | |
| 0.9878 | $SI = 0.000057D^2 + 0.00231D + 17.947$ | 0.75 | Swelling Index |
| 0.9886 | $SI = 0.000042D^2 + 0.00407D + 17501$ | 2.5 | |

**Keywords :**

**Micro lime Pile , Clayey Soil , Expansive Soil , Swelling Pressure , Percent Swell , Expansion Index , Swelling Potential .**

**THE END**