

## استخدام النمذجة الحاسوبية في إجراء الدراسة البارامترية على تجربة تحميل الأوتاد

الدكتور منذر عمران الزاوي\*

الدكتور صفوان عبد الله\*\*

(تاريخ الإيداع 23 / 12 / 2013. قُبل للنشر في 4 / 3 / 2014)

### □ ملخص □

تتطلب الدراسة البارامترية على تجربة تحميل الأوتاد النمذجة العددية لهذه التجربة ، ودراسة تأثيرات بارامترات قانون المادة على شكل منحنيات الحمولة-الهبوط وعلى قيم قدرة التحمل الحدية المستقرأة منها ، وقد جرت نمذجة بعض تجارب التحميل الحقيقية ، وتبين بنتيجة معايرة النماذج على تجارب حقيقية أن موديل تصلب التربة HS يعبر عن السلوك الحقيقي للتربة بشكل أفضل من موديل مور كولومب MC ، حيث تتقارب منحنيات التحميل الحاسوبية الناتجة بشكل افضل مع المنحني الحقيقي ، وبناء عليه تم اعتماد قانون التصلب في توليد النماذج الحاسوبية المدروسة ، وقد بينت النتائج أن العلاقة بين قوة التحمل الحدية المستقرأة من المنحني التحميل وبين بارامترات موديل المادة المستخدم هي علاقة خطية ، وأنه توجد قيمة واحدة فقط لكل بارامتر تتطابق عندها قيمة التحمل الحدية الحاسوبية مع القيمة الكودية .

تتلخص الفائدة الاقتصادية في البحث من إمكانية توليد منحنيات تحميل الأوتاد حاسوبياً وإجراء دراسات بارامترية عليها من دون الحاجة إلى إجراء تجارب التحميل الحقلية ، أما الهدف العملي العلمي فهو مراكمة وتجميع معلومات تصلح كقاعدة للمعطيات عن تجارب التحميل الستاتيكية .

**الكلمات المفتاحية :** الأوتاد - تجربة التحميل الستاتيكية - قوة التحمل الحدية - النمذجة العددية

\* أستاذ - قسم الهندسة الجيوتكنيكية - كلية الهندسة المدنية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية .

\*\* مدرس - قسم الهندسة الجيوتكنيكية - كلية الهندسة المدنية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية .

## Using Numerical Modeling in a Parametric Study of Pile Load Tests

Dr. Mounzer Omran Alzawi\*  
Dr. Safwan Abdulah\*\*

(Received 23 / 12 / 2013. Accepted 4 / 3 / 2014)

### □ ABSTRACT □

A parametric study of pile load test requires a numerical modeling of this test and a study of the effect of each parameter of the material model used on pile load settlement curve shape and on the extrapolated value of pile ultimate bearing capacity. Some real pile load tests are numerically modeled and calibrated using two types of material models: Mohr-coulomb MC and Hardening soil HS. The obtained results from HS are better than those obtained from MC, so material model HS is adopted to generate pile load settlement curves. It is shown that the relation between the extrapolated value of pile ultimate bearing capacity and each parameter of the material model used is linear, and there is only one value for each parameter of HS in which the calculated value of bearing capacity identifies with the normal value in DIN-Code. The main economic benefit obtained from this research is the ability of generating pile load settlement curves in addition to doing a parametric study using a numerical modeling method without any need to do pile load field tests. The practical scientific aim is to accumulate and collect information that can be used as a database for static pile load tests.

**Keywords:** piles, static loading test, ultimate bearing capacity, numerical modeling

---

\*Professor, Department of Geotechnical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

\*\*Assistant Professor, Department of Geotechnical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

**مقدمة :**

ترتبط سلوكية التشوه في التربة المحملة كما هو معروف بنوع التربة وبخواصها الفيزيائية والميكانيكية ، وهذا ما يجعل التأثير المتبادل بينها وبين الأوتاد المنفذة فيها معقداً ومحكوماً بمجموعة من المؤثرات المختلفة والبارامترات ، ولاتزال هذه العلاقة المتبادلة المعقدة بين الوتد والتربة المحيطة به غير واضحة تماماً ، وهو ما يفسر وجود هذا العدد الكبير من الطرائق المتبعة في حساب قدرة تحمل الأوتاد الحدية لاسيما منها تلك التي تعتمد على الجداول والعلاقات التقريبية الجاهزة والثابت التجريبية وعوامل الأمان الجزئية والكلية ، وغير ذلك لهذا السبب لازالت **تجربة تحميل الأوتاد الستاتيكية** هي التي تحكم على صحة أو خطأ القيم المحسوبة بالطرق الحسابية التقريبية ، ولازالت الأبحاث العلمية مستمرة في سعيها إلى إيجاد علاقات وصيغ رياضية تعتمد على نتائج تجارب التحميل الستاتيكية بهدف تحسين وتطوير الطرائق الحسابية الموجودة .

إن تجربة التحميل الستاتيكية لوتد مضغوط هي بالمعنى المبسط **عبارة عن وتد محمل شاقولياً** في اتجاه محوره، وإن قيم الهبوط المقابلة للحمولات المطبقة في كل طور من أطوار التجربة تشكل معاً منحنى التحميل الخاص بالتجربة الذي تستقرأ منه قيمة قدرة التحمل الحدية للوتد المجرب .

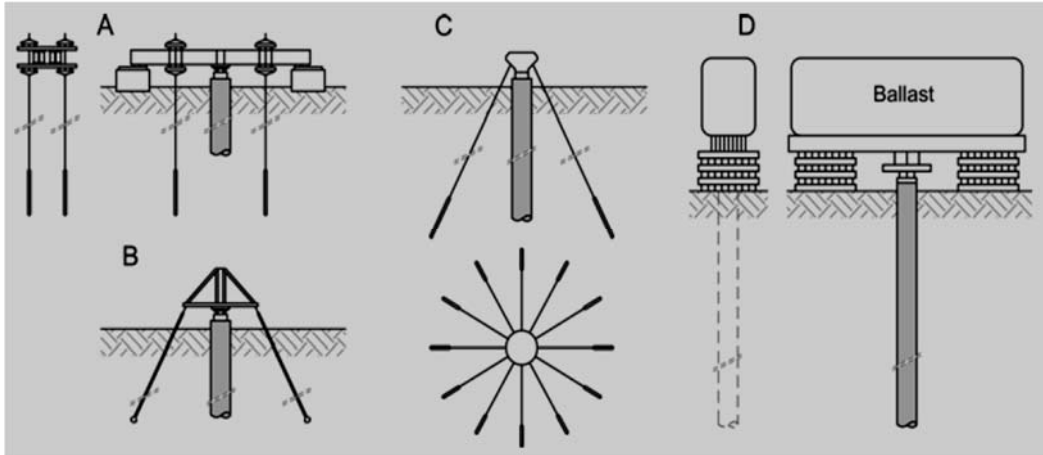
**أهمية البحث وأهدافه :**

تتطلب الدراسة البارامترية الصحيحة لتجارب تحميل الأوتاد تقييم نتائج تجربة التحميل نفسها في حالات وشروط وتأثيرات متنوعة مثل (تغيير طول الوتد المجرب - تغيير درجة ارتصاص التربة في الموقع - تغيير خواص التربة - تغيير منسوب الماء الجوفي ..الخ) ، وهو ما يتعذر استنتاجه من تجربة تحميل حقلية واحدة مجراة في ظروف موقع معين لذلك اعتمد البحث من أجل تنفيذ هذه الدراسة البارامترية على النمذجة العددية لتجربة التحميل المعنية الحقيقية باستخدام طريقة العناصر المحددة FEM ، بعد معايرة البرنامج الحاسوبي المستخدم على النتائج الحقيقية لتجربة التحميل الحقلية واختيار قانون المادة المناسب في النمذجة ، ويهدف البحث إلى دراسة تأثير بارامترات قانون المادة المعتمد على نتائج تجربة التحميل .

**تجارب التحميل الستاتيكية :**

تتفد تجارب تحميل الأوتاد الستاتيكية من أجل رصد العلاقة بين الحمولة والهبوط في ظروف التربة التي نفذ فيها الوتد ، ومن أجل إجراء التجربة يجب أن يكون معلوماً مسبقاً طول ومقطع الوتد المجرب .  
ينفذ الوتد المجرب إلى العمق التصميمي المطلوب ويترك بارزا فوق الأرض بمقدار 1,0 م على الأقل ، ومن ثم يكسر رأس الوتد بمقدار 0,5م وتصب فوقه بلاطة بيتونية مربعة قليلة السماكة توضع فوقها صفيحة معدنية لتوزيع الحمولة . يدق في التربة على جانبي الوتد كما في الشكل (1-a,b,c) **أوتاد تثبيت اضافية** (أوتاد رد فعل) أو شدادات معاكسة وتعمل هذه الأوتاد أو الشدادات على الاحتكاك حيث تربط مع العنصر الناقل للحمولة على الوتد الذي يطبق حمولة المكبس الهيدروليكي على الوتد المختبر . يبين الشكل (1-d) أيضاً نمطا آخر من تجارب التحميل على الأوتاد حيث تقوم حمولة مكونة من (مكعبات بيتونية أو أكياس رملية) بتطبيق الحمولة المعاكسة على المكبس الهيدروليكي ، وعلى العموم فإن مبدأ تجربة التجميل لا يختلف كثيراً باختلاف تقنية إجراء التجربة [1] .

عند إجراء التجربة تطبق الحمولة ، ويستمر التحميل حتى بلوغ حمولة الاختبار الإجمالية التي تساوي 2,2 مرة من حمولة التشغيل ، ويتم التحميل على ثماني أو عشر مراحل بحيث لا يقل مقدار الحمولة في كل مرحلة تحميل عن تعادل ربع حمولة الاستئثار المقترحة ويترك الوند كي يستقر بعد كل مرحلة تحميل . تقاس قيم هبوط رأس الوند مع الزمن لكل مرحلة من المراحل باستخدام ساعات قياس مربوطة بجائز مرجعي ثابت ، بعد الوصول إلى الحمولة الكلية على الوند يجري نزع الحمولة تدريجياً على أربع أو خمس مراحل وتؤخذ قراءات الرجوع (الانزياح المعاكس) بعد استقرار كل مرحلة من مراحل نزع التحميل .



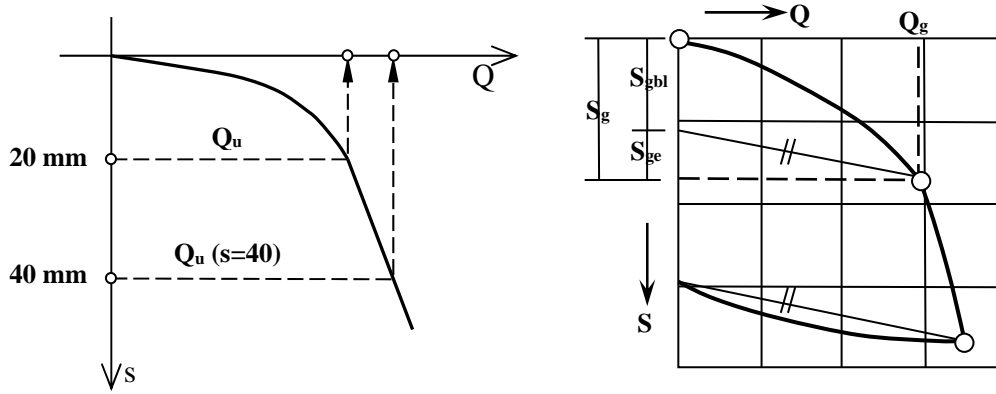
الشكل 1 : تجربة تحميل الأوتاد

#### 4 - تحديد قوة التحمل الحديدية من منحنى التحميل :

إن قوة التحمل الحديدية للوند هي عبارة تابع بالنسبة إلى الهبوط  $s$  يعبر عنه بالعلاقة التالية :

$$Q_u = f(s) \quad (1)$$

تعرف الحمولة الحديدية بأنها الحمولة التي تجعل الوند يهبط هبوطاً ملحوظاً ، وتؤخذ قيمتها من مخطط تجربة تحميل الوند حيث تؤخذ القيمة المقابلة للنقطة التي يلتقي فيها الجزء المنحني من المخطط مع الجزء المستقيم ، وعندما لا يحقق شكل مخطط التجربة هذا الاعتبار فإن الحمولة الحديدية للأوتاد المحفورة تؤخذ من مخطط التحميل وفق الكود الألماني DIN-1054 عند قيمة هبوط مساوية إلى 2سم ، أما بالنسبة إلى الأوتاد المدقوقة المسبقة الصنع فإن الحمولة الحديدية تؤخذ عند قيمة للهبوط المتبقي مساوية إلى  $s_{gbl} = 0,025.D$  حيث  $D$  قطر الوند . [2] . انظر الشكل (2) .



الشكل 2 : تحديد الحمولة الحدية كتابع لقيمة الهبوط المسموح وفق الكود الألماني

بالنسبة إلى الأوتاد المحفورة ذات القطر الكبير فإن التجربة قد لا يمكن المتابعة فيها حتى الوصول إلى حمولة الكود المنصوص عنها سابقا لذلك تعتمد قيمة الحمولة الحدية بحسب الخبرة . وهي القيمة المقابلة للهبوط المسموح (بين 2,0 و 4,0سم)، ثم يُتابع عمليا في التجربة حتى تتوقف عند وصول الهبوط إلى أربعة أمثال الهبوط المسموح [3] إن القيمة الدقيقة للهبوط التي تستنفذ عندها قوة تحمل الوتد بالكامل أي تصل إلى قيمتها الحدية لاتزال موضع جدال علمي لم يحل حتى الآن بشكل قاطع لكن بعض الكودات العالمية تتصح لحل هذه المشكلة باختيار قيمة تقريبية مقبولة لقوة التحمل الحدية توافق قيمة معينة للهبوط وهي إما 2سم أو 4سم كما يبين الشكل (2) ، لكن تبقى قيمة قدرة التحمل الحدية الموافقة لهبوط مقداره 2سم أقرب إلى المنطق من القيمة المأخوذة عند هبوط 4سم ، ورغم أن هذا الاعتبار يبقى في خانة الاعتبارات التقريبية لأنه لا يأخذ شكل المنحني بعين الاعتبار إلا أن توصيات الكود الألماني DIN-1054 [3] على سبيل المثال تعتمد نظراً إلى :

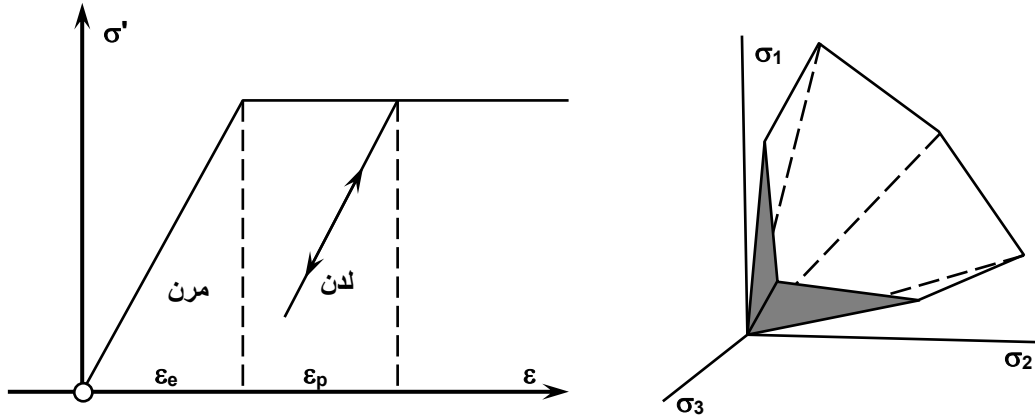
- 1 - مقارنته للأغراض العملية وهو ما برهنه كثير من اختبارات التحميل .
- 2 - قابليته للمقارنة .

#### موديلات المادة - موديل مور - كولومب :

موديل مور - كولومب هو من قوانين المادة التي توصف سلوك المرونة الخطية واللدونة المثالية حيث تُقرب العلاقات غير الخطية بين الإجهاد والتشوه والتشوه الحجمي إلى علاقات شبه خطية أي تتألف من قسمين قسم مرن وقسم لدن ، ويتمثل شرط السيالان بسطح حدي على شكل هرم له مقطع سداسي الأضلاع يحيط بالمنطقة المرنة - شكل (3) .

يحدّد شرط السيالان الحالات الإجهادية التي تظهر فيها التشوهات اللدنة إلى جانب التشوهات المرنة ، وبما أن شرط السيالان في حالة موديل مور - كولومب هو نفسه شرط الانهيار فإن التصلب لا يؤخذ بالحسبان ، وإذا لم يتم الوصول إلى شرط الانهيار فمعنى ذلك أن التشوهات المرنة هي التي تحصل فقط [4] .

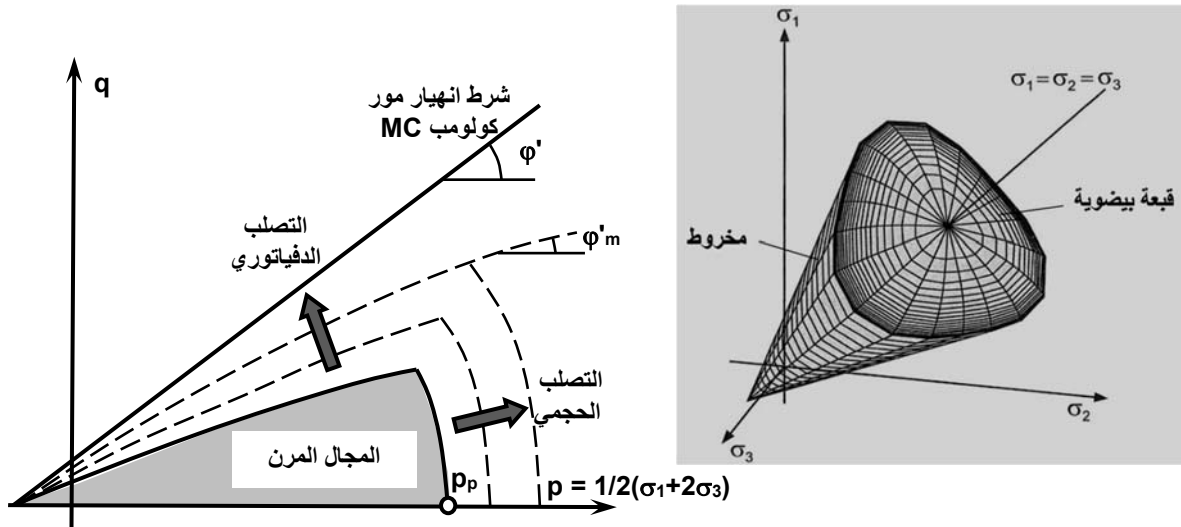
يمكن توصيف المادة وفق هذا القانون اعتمادا على بارامترات خمسة هي : معامل المرونة E ، معامل بواسون  $\nu$  ، زاوية الاحتكاك الداخلي  $\rho$  ، تماسك التربة C ، نسبة الفراغ e ، أو زاوية التوسع  $\Psi$  (للترب المفككة) .



الشكل 3 : موديل مور - كولومب

### موديلات المادة - موديل تصلب التربة :

قانون تصلب التربة هو قانون مادة يعبر عن المادة في طورها (المرن واللدن) بمصاحبة التصلب المتجانس على اعتبار أن الطور اللدن يبدأ قبل الوصول إلى شرط الانهيار وأن التشوه اللدن يرتبط بسطح سيلان يحيط بمنطقة التشوه المرن (مخروط + قبة) . [5] . انظر الشكل (4) .



الشكل 4 : العلاقة بين الإجهاد الديياتوري والتشوه المحوري في موديل تصلب التربة HS

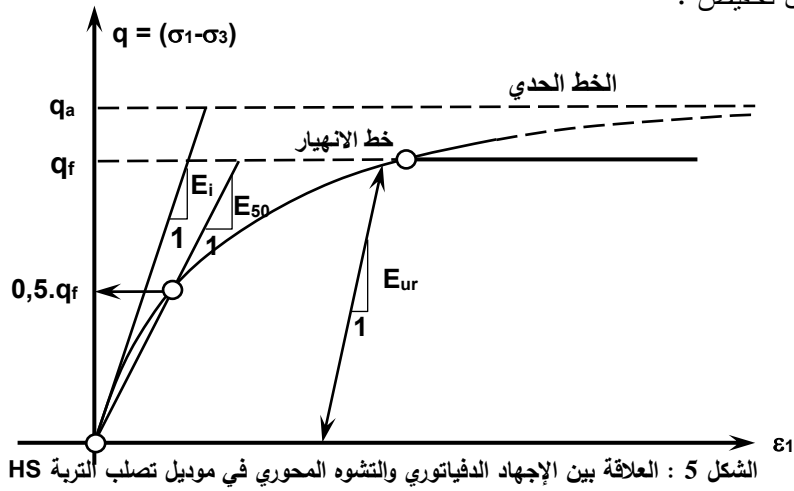
عند ازدياد التشوه اللدن يتوسع سطح السيلان في كافة الجهات بشكل منتظم (تصلب متجانس) ويستمر حتى بلوغ شرط الانهيار ويبين الشكل (5) العلاقة بين الإجهاد الديياتوري q والتشوه المحوري  $\epsilon_1$  ، والتي يمكن التعبير عنها بالعلاقات التالية [6] كما هو موضح في الشكل :

$$q = \sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\varepsilon_1}{a + b \cdot \varepsilon_1}$$

$$(2) \quad a = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{E_{50}} ; \quad b = \frac{1}{q_a} = \frac{R_f}{q_f}$$

حيث :

- $E_{50}$  : معامل المرونة القاطع عند 50% من إجهاد انهيار مور كولومب .
- $q_a$  : الإجهاد الحدي من أجل تشوه مستمر (الخط المقارب للجزء المنحني من المخطط).
- $q_f$  : إجهاد الانهيار وفق شرط مور كولومب.
- $R_f$  : عامل تخفيض .



يمكن مما سبق استنتاج معادلة التشوه المحوري في الحالة الفراغية :

$$(3) \quad \varepsilon_1 = \frac{q_a}{2E_{50}} \cdot \frac{q}{q_a - q}$$

يستخدم في حالة التحميل - نزع التحميل معامل التشوه  $E_{ur}$  ، ومعامل التشوه العرضي  $v_{ur}$  ، وذلك من أجل التعبير عن الصلابة التي تشكل الجزء الثاني المهم من موديل تصلب :

$$(4) \quad E_{ur} = E_{ur}^{ref} \left( \frac{\sigma_3 + c \cdot \cot \varphi}{p^{ref} + c \cdot \cot \varphi} \right)^m = E_{ur}^{ref} \left( \frac{c \cdot \cos \varphi - \sigma_3 \cdot \sin \varphi}{c \cdot \cos \varphi + p^{ref} \cdot \sin \varphi} \right)^m$$

حيث  $m$  (القيمة الأسية) - وهي رقم يتعلق بمواصفات التربة المعنية ويحدد وفق SOOS [7] .  
أما  $E_{50}$  - معامل المرونة القاطع فنحصل عليه من علاقة مشابهة ، ويمكن بتقريب مقبول اعتبار أن :

$$(5) \quad E_{ur} = 3 \cdot E_{50}$$

أما معامل التشوه الأدمتري فإن له أيضا علاقة مشابهة لكن بدلالة الإجهاد الناظمي  $\sigma_1$  :

$$(6) \quad E_{oed} = E_{oed}^{ref} \left( \frac{\sigma_1 + c \cdot \cot \varphi}{p^{ref} + c \cdot \cot \varphi} \right)^m = E_{oed}^{ref} \left( \frac{c \cdot \cos \varphi - \sigma_1 \cdot \sin \varphi}{c \cdot \cos \varphi + p^{ref} \cdot \sin \varphi} \right)^m$$

يصلح موديل تصلب لكل الترب تقريبا بما فيها الصلبة والرخوة .

## طرائق البحث ومواده:

استخدم في البحث برنامج **PLAXIS 2D v.11** وهو برنامج جيوتقني يعتمد على طريقة العناصر المحددة قادر على تحليل المسائل الجيوتقنية المتنوعة وحساب مسارات الإجهاد للحالات الإجهادية المختلفة في المستوى  $p'$ - $q$  حيث  $p'$  الإجهاد الوسطي الفعال ، و  $q$  الإجهاد الدفياتيوري .

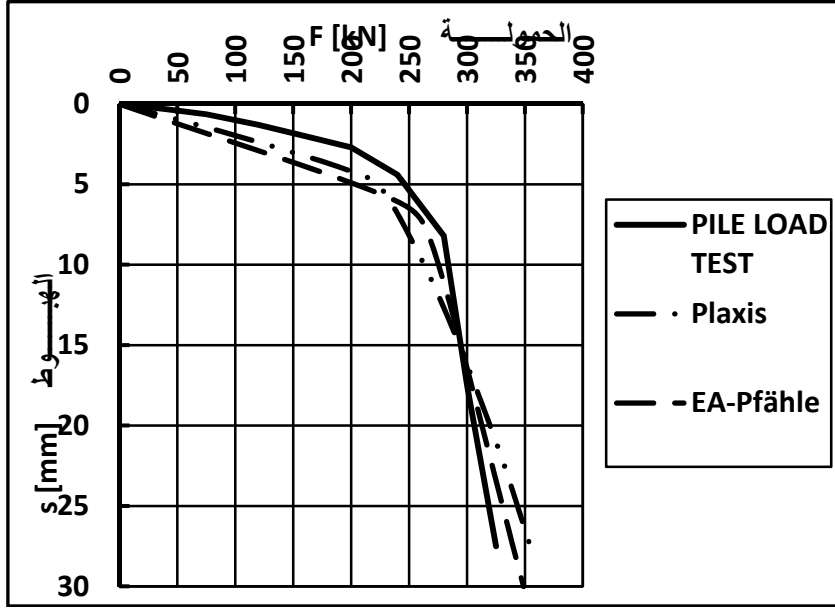
حتى يكون ممكناً إجراء دراسة بارامترية موثوقة فإن الشرط الأول الذي يجب التقيد به كمرحلة أولى من العمل هو معايرة البرنامج المستخدم على تجارب تحميل حقيقية أي المقارنة بين نتائج الحساب العددي للبرنامج مع نتائج التجربة الحقلية ، وقد قمنا من أجل التأكد من موثوقية النمذجة بإجراء هذه النمذجة ليس فقط على وتد محدد ضمن تربة محددة بل على عدد من تجارب التحميل الحقيقية التي تمتلك كل منها شروطاً طرفية تختلف عن الأخرى (أبعاد وتد التجربة ، ونوع وتطبيق التربة) ، وكانت فيها نتيجة التقارب بين الحساب العددي والنتائج الحقلية الحقيقية لتجربة التحميل مرضية ومقبولة .

نعرض فيما يلي نتائج نمذجة تجربتي تحميل مختلفتين  $A$  ,  $B$  ، النموذج الأول (التجربة  $A$ ) هو تجربة تحميل حقلية أجريت بالتعاون بين جامعتي برازيليا وجامعة براغ في حقل الاختبارات الحقلية التابع لجامعة برازيليا في البرازيل [8] على وتد حقيقي محمل طوله 8,0م وقطره 0,3م منفذ بالحفر في تربة متطبقة مواصفاتها مبينة في الجدول (1) . من أجل المقارنة مع منحنى التحميل الحقيقي قمنا بنمذجة التجربة أعلاه وأجري حساب أولي للتجربة بطريقة العناصر المحددة ببرنامج **PLAXIS-2D** (باعتقاد موديل تصلب التربة **HS**) ، ورسم منحنى التحميل الخاص بها كما تم حساب ورسم منحنى الحمولة - الهبوط وفق نظام (EA-Pfähle) [9] ، وهو نظام التوصيات الالمانى الخاص بالأوتاد ، ويبين الشكل (6) مقارنة بين منحنى التحميل الثلاث ، حيث يظهر التقارب واضحاً فيما بينها مما يدل على صلاحية البرنامج العددي المعتمد لإجراء الدراسة البارامترية المرغوبة .

الجدول 1 : مواصفات طبقات التربة التي يخترقها الوتد المحرب [6]

العمق (م)	$\varphi$	$c'$	$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\nu$	E (MPa)
2-0	36.6	4	13.5	0.29	23
6-2	29.8	10	14.4	0.33	20
8-6	31.4	9	15	0.32	22
9-8	33.1	7	18	0.31	23
12-9	33.2	7	17.8	0.31	24
15-12	37.1	3	18.5	28.	35





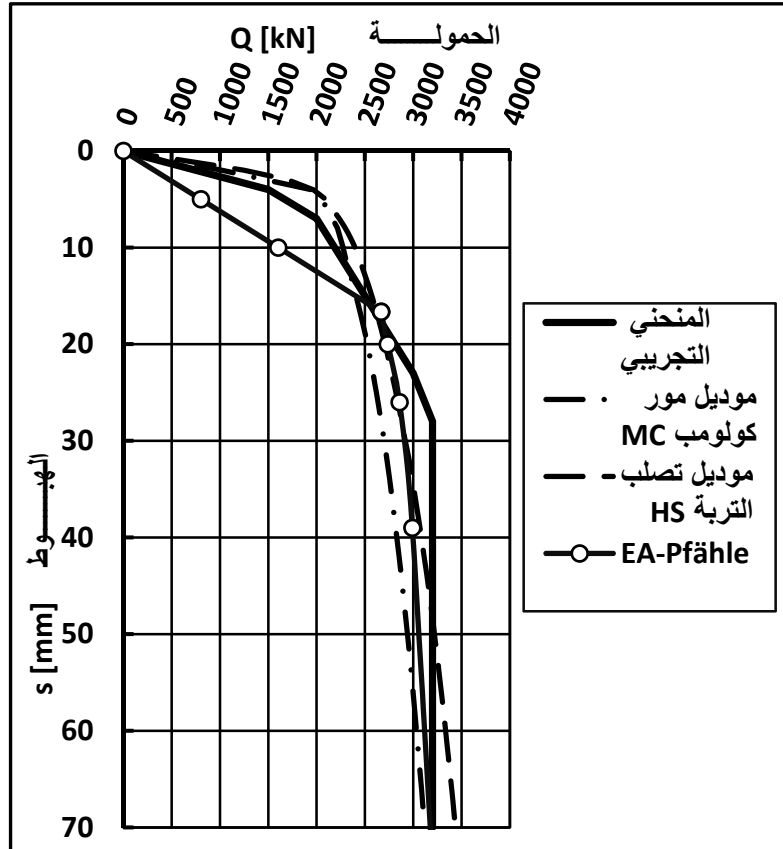
الشكل 6 : التجربة A (معايرة البرنامج) : المقارنة بين منحنى التجربة الفعلي وبين المنحنى المحسوب بالبرنامج

أما التجربة B (النموذج الثاني) فقد أجراها SOMMER & HAMMBACH [10] على أحد الأوتاد المستخدمة في تأسيس جسر Alzey في ألمانيا القائم على الاوتوستراد رقم A14 .  
الوتد المجرب بطول 9,5م وقطر 1,3م يخترق طبقة من الغضار القاسي مستمرة في العمق (نسبة رطوبتها 22% - حد السيولة 80% - حد اللدونة 20%) . منسوب الماء الجوفي على عمق 3,5م بينما مواصفات التربة الأخرى ومواصفات الوتد المجرب مدرجة في الجدول (2) . [11] .

الجدول 2 : مواصفات التربة والوتد في النموذج الثاني B

$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$c'$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\phi$	$\nu_{ur}/\nu$	$E_{50}^{ref} / E$ (Mpa)	$E_s^{ref}$ (Mpa)	$E_{ur}^{ref}$ (Mpa)	m	R	
20	20	20	0,2/0,3	45/60	33	90	0,5	1	التربة
25	-	-	0,15	30000	-	-	-	-	الوتد

من أجل المقارنة مع منحنى التحميل الحقيقي قمنا بنمذجة التجربة أعلاه بطريقة العناصر المحددة باعتماد (موديل مور-كولومب MC)، ثم (موديل تصلب التربة HS)، وبينت النتائج وجود تقارب بين المنحنيات الحاسوبية ومنحنى التحميل التجريبي إلا أن منحنى التحميل وفق موديل تصلب التربة HS أكثر دقة وتقاربا مع المنحنى التجريبي، ويبرهن ذلك على صلاحية البرنامج الحاسوبي المستخدم لإجراء الدراسة البارامترية كما طبق أيضاً .  
يهدف المقارنة . نظام التوصيات الالمانى الخاص بالأوتاد (EA-Pfähle) في حساب ورسم منحنى الحمولة-الهبوط .  
(شكل 7) .



الشكل 7 : التجربة B (معايرة البرنامج) : المقارنة بين منحنى التجربة الفعلي وبين المنحني المحسوب بالبرنامج

### النتائج والمناقشة :

أجريت الدراسة البارامترية في هذا البحث على النموذج الثاني وتم الانطلاق من مواصفات التربة الغضارية المذكورة في الجدول (2) لتغيير البارامترات . اعتمدت حالة التناظر المحوري لتحليل المسألة بطريقة العناصر المحددة مع اختيار عناصر تقسيم مثلثية بـ 15 عقدة ، ودراسة سلوكية التربة وفق موديلات المادة المذكورة سابقاً ، وبما أن نتائج المعايرة السابقة أبدت بعض الفروقات بين المنحني التجريبي والمنحني الحسابي الذي قمنا بتوليده بمساعدة البرنامج ولاسيما في منطقة الهبوطات الصغيرة في بداية التجربة ، فإن هذا ما أكد أهمية إجراء هذه الدراسة البارامترية التي تهدف من خلال دراسة تغير قيم بارامترات التربة في موديل مور كولومب (MC) ، وبارامترات التربة في موديل تصلب التربة (HS) إلى رصد التغييرات المحتملة على دقة نتائج الحساب ، وشكل منحني التحميل .

#### أولاً - تأثير بارامترات موديل مور كولومب (MC)

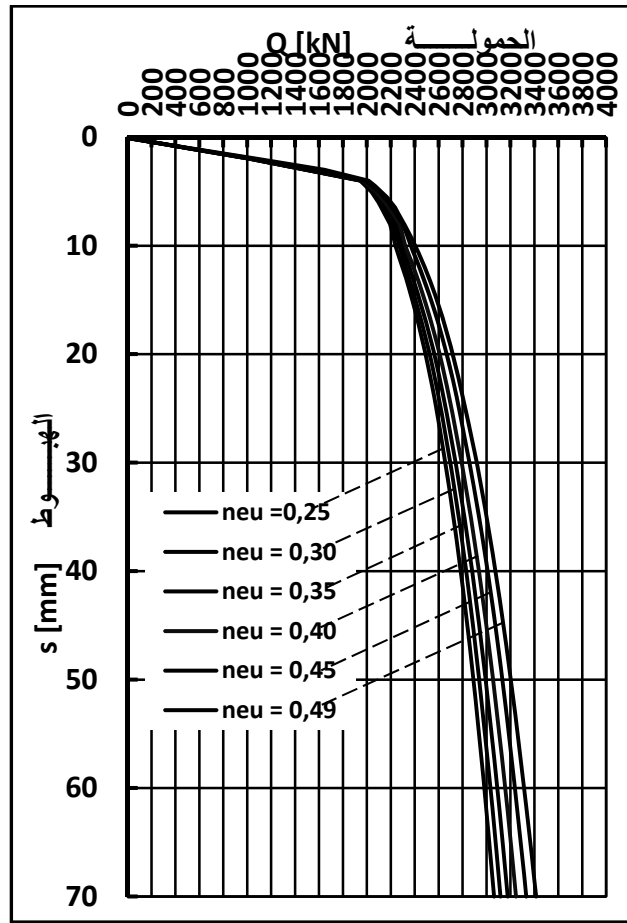
البارامترات المقصودة في الموديل المذكور هي بارامترات مرونة التربة  $E_{ref}$  ،  $\nu$  (معامل يونغ ، ومعامل بواسون) حيث تثبتت قيمة  $E_{ref}$  واعطيت لمعامل بواسون قيم متعددة :  $0,25 - 0,30 - 0,35 - 0,40$  -  $0,45 - 0,49$  كما هو مبين في الجدول (1) مع ملاحظة أن معامل التشوه الأدمتري  $E_{oed}$  وفق ماهو معروف سوف يتغير أيضاً تلقائياً مع معامل بواسون .

الجدول 3 : بارامترات موديل مور كولومب MC (تغير قيم معامل بواسون)

موديل مور كولومب MC						الحالة البارامتر
F	E	D	C	B	A	$E_{ref}$ (Mpa)
60	60	60	60	60	60	$E_{ref}$ (Mpa)
0,49	0,45	0,40	0,35	0,30	0,25	$\nu$
1027	227,6	128,6	96,3	80,77	72,00	$E_{oed}$ (Mpa)

حسبت الحالات الست السابقة باستخدام برنامج Plaxis ورسمت منحنيات التحميل الحاسوبية الناتجة لكل قيمة

من قيم معامل بواسون (الشكل 8) .



الشكل 8 : منحنيات التحميل المحسوبة بطريقة العناصر المحددة بحسب قيمة معامل بواسون

ثانياً - تأثير بارامترات موديل تصلب التربة (HS)

حسب النموذج السابق في اتجاهين :

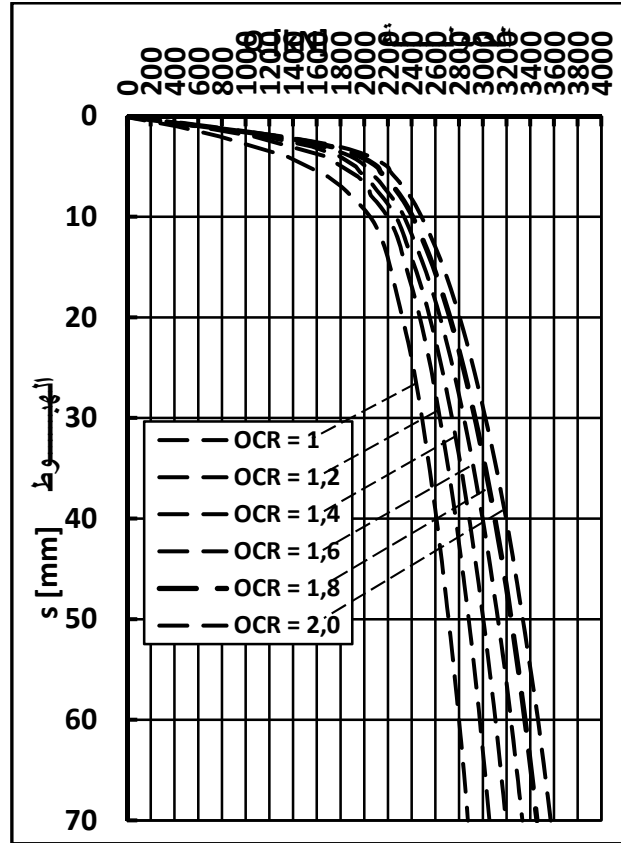
**أولهما :** تأثير النسبة فوق المشددة OCR على نتائج الحساب وشكل المنحي حيث غيرت قيم OCR

والبارامترات المتعلقة بها لست حالات مختلفة من A إلى F ، وفق الجدول (4) ، وتم الإبقاء على ثوابت الموديل الأخرى .

الجدول 4 : تغير البارامتر OCR في موديل تصلب التربة HS

موديل مور كولومب MC						الحالة البارامتر
F	E	D	C	B	A	
45	45	45	45	45	45	$E_{50}^{ref}$
33	33	33	33	33	33	$E_s^{ref}$ or $E_{oed}^{ref}$
90	90	90	90	90	90	$E_{ur}^{ref}$
2	1,8	1,6	1,4	1,2	1	OCR
0,871	0,809	0,747	0,685	0,623	0,561	$K_c$
0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	$\nu_{ur}$

يبين الشكل (9) تأثير تغير قيمة النسبة فوق المشددة على مسار وشكل منحنى التحميل وكما هو واضح فإن القيمة الحدية لقدرة التحمل سوف تتغير بتغير شكل المنحني ، وإن تحمل الوتد يزداد مع تزايد قيمة OCR .



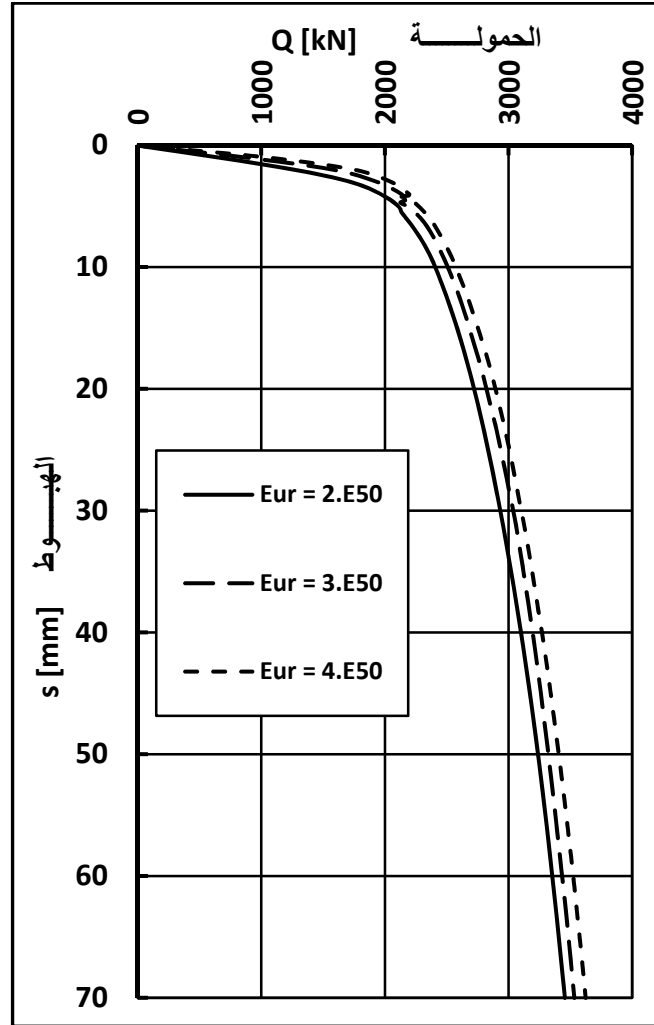
الشكل 9 : منحنيات التحميل بدلالة النسبة فوق المشددة OCR

**ثانيهما :** تثبيت قيمة النسبة فوق المشددة OCR وثوابت الموديل الأخرى ، وتغيير قيم معامل التشوه  $E_{ur}^{ref}$  بإعطائه القيم التالية :  $4.E_{50}^{ref}$  ;  $3.E_{50}^{ref}$  ;  $2.E_{50}^{ref}$  . وهي الحالات المسماة A,B,C في الجدول (5) وذلك من أجل دراسة تأثير الصلابة التي تشكل الجزء الثاني من موديل تصلب (ارجع إلى الشكل 5) .

الجدول 5 : البارامتر  $E_{ur}^{ref}$  في موديل تصلب التربة HS

			الحالة البارامتر
C	B	A	$E_{50}^{ref}$
45	45	45	$E_s^{ref}$ or $E_{oed}^{ref}$
33	33	33	$E_{ur}^{ref}$
$4.E_{50}^{ref} = 180$	$3.E_{50}^{ref} = 135$	$2.E_{50}^{ref} = 90$	OCR
1,8	1,8	1,8	$K_c$
0,809	0,809	0,809	$\nu_{ur}$
0,20	0,20	0,20	

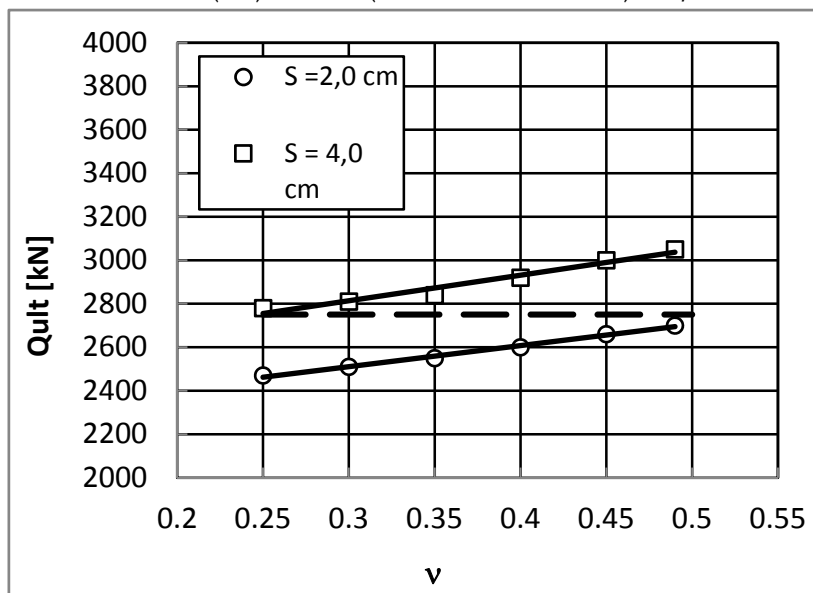
تبين مقارنة النتائج الممثلة في الشكل (10) أن تأثير تغيير قيمة  $E_{ur}^{ref}$  على النتائج الحاصلة ليس جوهريا ويبقى أقل من تأثير البارامترات الأخرى .

الشكل 10 : منحنيات التحميل بدلالة تغير معامل التشوه  $E_{ur}^{ref}$ 

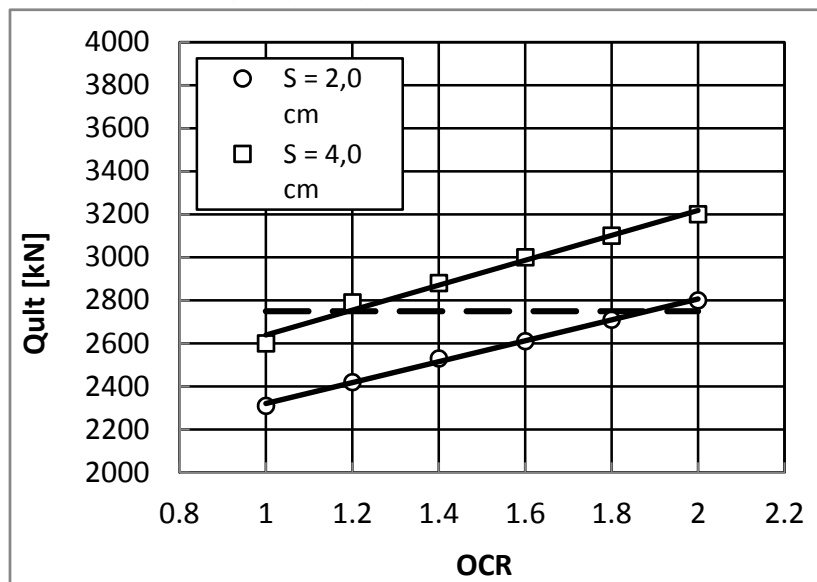
ثالثاً - مناقشة النتائج :

من أجل الحصول على تقييم مفيد لنتائج الحساب العددي أعلاه فقد استخدمت الطريقة المنوه عنها في الفقرة 4 (طريقة الكود الالمانى) في استقراء قيم قوة التحمل الحديدية للوتد  $Q_{ult}$  من مخططات التحميل الحاسوبية في لكل حالة من الحالات السابقة حيث أخذت  $Q_{ult}$  التي تقابل قيمة للهبوط المسموح مساوية إلى 2,0 سم ثم التي تقابل قيمة للهبوط المسموح تساوي 4,0 سم باعتبار أن الكود الالمانى يحدد مجاله في الأوتاد بين 2,0-4,0 سم ، ورسمت بيانيا العلاقات بين قيمة قدرة التحمل الحديدية للوتد وبين تغير قيم البارامترات التالية :

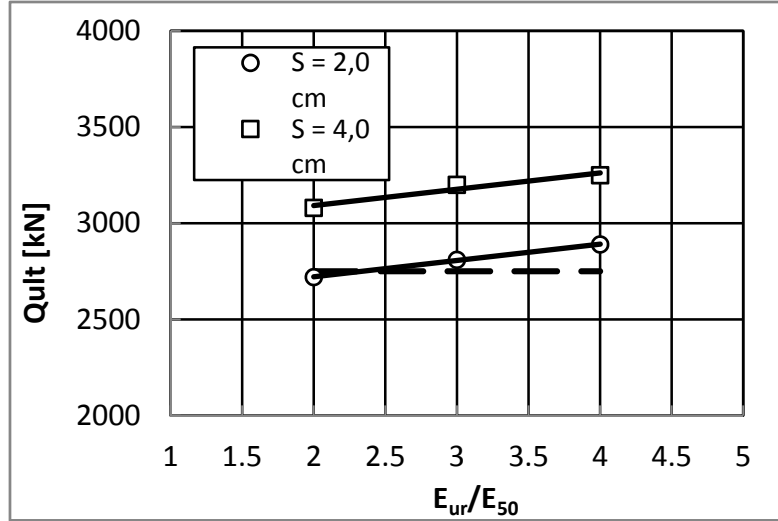
- ♣ معامل بواسون (موديل مور كولومب MC) . الشكل (11) .
- ♣ النسبة فوق المشددة OCR (موديل تصلب التربة HS) . الشكل (12) .
- ♣ النسبة  $E_{ur}/E_{50}$  (موديل تصلب التربة HS) . الشكل (13) .



الشكل 11 : علاقة قوة التحمل الحديدية للوتد بعامل بواسون



الشكل 12 : علاقة قوة التحمل الحديدية للوتد بالنسبة فوق المشددة OCR

الشكل 13 : علاقة قوة التحمل الحدية للوتد بالنسبة  $E_{ur}/E_{50}$ 

مثلت في المخططات أيضاً (بخط منقط) قيمة قدرة التحمل الحدية للوتد المجرى المحسوبة وفق طريقة الكود الألماني DIN-1054 [3] بهدف استكمال المقارنة ومناقشة النتائج .  
يتبين من خلال الأشكال أن علاقة قيمة قوة التحمل الحدية مع البارامترات المدروسة عموماً هي علاقة خطية ، وأن قيم البارامترات التي تتطابق فيها قوة التحمل الحدية للوتد مع قيمة الكود عند الهبوط المسموح 4,0 سم أقل منها عند الهبوط المسموح 2,0 سم . انظر الجدول (6) .

الجدول 6 : البارامتر الذي عنده قوة التحمل الحدية الحاسوبية تساوي القيمة الكودية

قيم البارامترات التي عندها تتطابق النتيجة الحاسوبية لقدرة التحمل الحدية مع نتيجة الكود الألماني DIN 1054			
موديل HS		موديل MC	البارامتر الهبوط المسموح
Eur/E50	OCR	v	
2,25	1,9	0,49	S = 2,0 cm
-	1,2	0,25	S = 4,0 cm

### الاستنتاجات والتوصيات:

يتبين لنا بوضوح من خلال النتائج التي حصلنا عليها من البحث :  
• أن أهمية النمذجة العددية والحساب العددي لتجارب تحميل الأوتاد الستاتيكية تكمن في إمكانية إجراء تجارب الحميل حاسوبياً وإمكانية إجراء دراسات بارامترية عليها وهذا ما لا تسمح به تجربة تحميل واحدة في الموقع ، ويمكن اتباع نفس الأسلوب في إجراء الدراسة البارامترية المطلوبة على أية تجربة تحميل حقلية في الموقع .

- أن موديل تصلب التربة يعبر بشكل أفضل من موديل مور كولومب عن السلوك الحقيقي للتربة واعتماد هذا الموديل يولد منحنيات تحميل حاسوبية أقرب إلى المنحني الحقيقي للتجربة .
  - العلاقة بين قيمة قدرة التحمل الحدية للوتد وبين بارامترات موديل المادة هي علاقة خطية .
  - توجد قيمة واحدة لكل بارامتر تتطابق عندها قيمة التحمل الحدية الحاسوبية مع القيمة الكودية مثلما توضح الأشكال السابقة 11,12,13 فالنسبة فوق المشددة OCR المقبولة تساوي 1,9 عند الهبوط المسموح 2,0سم ، وإن النسبة  $E_{ur}/E_{50}$  المقبولة الموافقة لهبوط 2,0سم تساوي 2,25 وهي أصح من القيمة التي يعتمدها قانون تصلب التربة والمساوية إلى 3 (انظر الفقرة 6) .
  - تشكل النتائج السابقة أساسا لقاعدة معطيات ينبغي العمل عليها وتجديدها باستمرار .
- إن تجربة تحميل حقلية واحدة فقط قد تكون كافية جنبا إلى جنب مع النمذجة والحساب العددي لتوليد تجارب تحميل حاسوبية كثيرة وإجراء دراسة بارامترية وافية بطريقة العناصر المحددة FEM ، وتبقى تجربة تحميل حقلية واحدة ضرورية من أجل معايرة نتائج الحساب بالبرنامج الحاسوبي المستخدم .
- إن الحساب العددي والنمذجة قد يكون بديلا دقيقا مقبولا عن كثير من تجارب التحميل فهو يسعى في النهاية إلى تشكيل قاعد معلومات عن سلوكية الأوتاد المنفذة بالتربة وعلاقة هذه السلوكية بمواصفات التربة المعنية ، والاكتفاء في نهاية المطاف بأقل عدد ممكن من تجارب التحميل .



## المراجع:

1. KEMPFERT H. G., REITHEL M. "Geotechnik nach Eurocode-Band2:Grundbau" ,3.Auflage , 2012 , S. 88-91.
2. FRANK,H. : "Grundbau I" , FH Gießen-Friedberg , 1991, 68.
3. Anhang C zur DIN 1054:2005-01. "Charackteristische axial Pfahleiderstände aus Erfahrungswerten für gerammte Verdrängungspfähle" .2005, 103-106 .
4. WITT K.J. , RÜTZ D. , SCHANZ T. "Wissensspeicher Geotechnik" , 14. Auflage, Bauhaus-Universität Weimar, Weimar ,2003 .
5. PLAXIS 2D – Version 9.0 , "Material Models Munual" .
6. PLAXIS 2D – Version 8.4 , "Manuals".
7. VON SOOS P., in SMOLTCZYK U. , "Grundbautaschenbuch" , Teil 1 , Geotechnische Grundlagen ,6. Auflage , Ernst & Sohn 2001 .
8. ANJOS G.J M. , CUNHA R.P. , KUKLIK P. , MIROSLAV B., "Numerical evaluation of bored piles in tropical soils by means of the geo technical engineering "GEO4" Fine Software" , Portugal-Lisabon ,2006, S. 8.
9. EA-PFÄHLE , "Empfehlungen des Arbeitskreises Pfähle" , Verlag Ernst&Sohn , 2007 , S. 89-96.
10. SOMMER H. , HAMMBACH P. "Großpfahlversuche im Ton für die Gründung der Talbrücke Alzey" . Der Bauingenieur , Vol. 49 ,1974 , S. 310-317.
11. WEHNERT M. , VERMEER P.A. , "Numerische Simulation von Probepfahlbelastungen an Großbohrpfählen" , proceedings of the 4th Kolloquium Bauen im Boden und Fels ,Ostfildern , 2004 , S 555-565 .