

## Numerical Study of the Effect of Adding Cement with Bentonite on Resistance of Pile Friction in Sandy Soils

Dr. Tawfiq Fayyad\*  
Dr. Rami Al-Abdeh\*\*  
Ali Moen Khddour\*\*\*

(Received 6 / 11 / 2022. Accepted 16 / 2 / 2023)

### □ ABSTRACT □

As a result of the increasing population growth, the populations desire to live in tall buildings with deep foundations increased, where piles are used as deep foundations for engineering constructions. Bentonite is used to stabilize walls of excavations when piling is carried out to prevent the collapse of weak soil sides during excavation, due to its high swelling property. When casting the piles, the bentonite rises to the top due to its low density, which is less than the density of the casting concrete, and the concrete settles to the bottom, and a thin and weakly frictional layer of bentonite remains (filter cake) around the body of the pile, this layer causes the piles frictional bearing capacity to drop to about (30%-10%) according to (Ng, 2002), as a result of the viscosity of bentonite used. Which prompted to do a lot of research on the effect of the viscous layer of bentonite on the performance of the pile on friction. This research deals with conducting a numerical study of the effect of a thin bentonite layer treated with different percentages of cement additives, on the performance of the pile on friction. By placing a numerical model of a vertically loaded pile and perforated with treated bentonite within sandy soil, to obtain the best numerically studied addition ratio of sand that improves the piles resistance to friction, reduces the economic cost of using bentonite, and maintains the workability of bentonit.

**Keywords:** Bentonite – cement – Numerical study – pile friction resistance – Filter cake – Viscosity.

---

\*Professor, Department of Geotechnical Engineering, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Latakia, Syria. toufikabdoulahfayad.dio.sy - drtoufik@gmail.com

\* Assistant Professor, Department of Geotechnical Engineering, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Latakia, Syria. ramihashimalabda.dio.sy- ramialabdeh@gmail.com\*

\*\*\* Postgraduate Student (Ph.D.), Department of Geotechnical Engineering, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University. Latakia, Syria. AliMoenKhddour94@gmail.com

## دراسة عددية لتأثير إضافة الاسمنت مع البنتونايت على مقاومة احتكاك الود في الترب الرملية

د. توفيق فياض\*

د. رامي العبد\* \*\*

علي معين خضور\*\*\*

(تاريخ الإيداع 6 / 11 / 2022. قُبِلَ للنشر في 16 / 2 / 2023)

### □ ملخص □

نتيجةً للنمو السكاني المتزايد، زادت رغبة السكان للعيش في الأبنية المرتفعة ذات الأساسات العميقة، حيث تستخدم الأوتاد كأساسات عميقة للمنشآت الهندسية. يستخدم البنتونايت لتثبيت جدران الحفر عند تنفيذ الأوتاد لمنع انهيار جوانب التربة الضعيفة أثناء الحفر، نظراً لخصائصه الانتفاخية العالية. عند صب الأوتاد يرتفع البنتونايت للأعلى بسبب كثافته المنخفضة والتي تكون أقل من كثافة بيتون الصب، ويستقر البيتون في الأسفل، ويبقى طبقة قشرة رقيقة وضعيفة الاحتكاك (filter cake) من البنتونايت حول جسم الود، هذه الطبقة تسبب انخفاض قدرة تحمل الأوتاد على الاحتكاك لحوالي (10%-30%) وفق (Ng, 2002)، نتيجةً للزوجة البنتونايت المستخدم. مما دفع للقيام بالعديد من الأبحاث حول تأثير طبقة البنتونايت للزوجة على أداء الود على الاحتكاك، يتناول هذا البحث إجراء دراسة عددية لتأثير طبقة البنتونايت الرقيقة المعالجة بنسب إضافات مختلفة من الاسمنت على أداء الود على الاحتكاك. من خلال وضع موديل عددي لودت محمل شاقلياً ومنفذ مع البنتونايت المعالج ضمن تربة رملية، للحصول على أفضل نسبة إضافة من الاسمنت مدروسة عددياً تحسن مقاومة الود على الاحتكاك، وتخفض الكلفة الاقتصادية لاستخدام البنتونايت، وتحافظ على قابلية تشغيل البنتونايت.

**الكلمات المفتاحية:** البنتونايت - الاسمنت - دراسة عددية - مقاومة الود على الاحتكاك - كعكة البنتونايت - اللزوجة.

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

drtofufik@gmail.com-oufikabdoulahfayad.dio.sy

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

ramialabdeh@gmail.com -ramihashimalabda.dio.sy

\*\*\*طالب دراسات عليا (دكتوراه) - قسم الهندسة الجيوتكنيكية - كلية الهندسة المدنية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

AliMoenKhddour94@gmail.com

**مقدمة:**

تستخدم الأوتاد بشكل شائع كأساسات عميقة للمنشآت الهندسية، ولكن بعض أنواع الترب الضعيفة لا يمكن الحفر فيها لتنفيذ الأوتاد المصبوبة في الموقع، بسبب انهيار جوانب الحفرة وعدم استقرارها، لذلك يتم استخدام البنتونايت أثناء صب الأوتاد، بسبب خصائصه الانتفاخية العالية التي تحافظ على استقرار جوانب الحفرة، وبسبب خواصه الكثيمة حيث يسد الفراغات ويمنع تسرب البيتون المصبوب لخارج الحفرة. عند صب الأوتاد باستخدام البنتونايت، يتبقى طبقة قشرة لزجة من البنتونايت وذات نفاذية منخفضة بسماكة صغيرة على محيط جسم الوند المصبوب، هذه الطبقة تقلل من احتكاك التربة على جوانب الوند [3] (Hashemzadeh and Hajidavalloo, 2016)، مما يقلل مقاومة السطح البيئي بين التربة والوند البيئوني.

**أهمية البحث وأهدافه:**

- العمل على تحسين مقاومة احتكاك الوند الجانبية باستخدام نسب إضافات مختلفة من الاسمنت المحلي مع البنتونايت.  
- تشكيل موديل عددي لتحميل وند مصبوب في المكان ومنفذ مع بنتونايت معالج بالإسمنت ضمن تربة رملية، مما يساهم بإجراء دراسة عددية لتأثير نسبة الإضافات المختلفة من الاسمنت مع البنتونايت على أداء الوند على الاحتكاك.  
- تحليل ومناقشة النتائج والحصول على نسبة الإضافة الأمثل من الاسمنت للبنتونايت، والتي تعطي أفضل احتكاك مدروس عددياً للوند، مما يساهم في تخفيض كمية البنتونايت المستخدم في الحقل، وبالتالي توفير الكلفة الاقتصادية عند استخدام البنتونايت.

**طرائق البحث ومواده:**

يعتمد البحث على المنهج التحليلي المقارن من خلال مراحل البحث التالية:

- 1- تشكيل موديل عددي بطريقة العناصر المنتهية، لتحميل وند مصبوب في المكان ومنفذ مع البنتونايت ضمن تربة رملية، بالاستعانة بأحد الدراسات المرجعية الحقلية، ومعايرة نتائج التحليل العددي مع نتائج دراسة حقلية سابقة.
- 2- إجراء دراسة عددية لتأثير كل نسبة إضافة من الاسمنت للبنتونايت المعالج، على أداء الوند على الاحتكاك.
- 3- تحليل ومناقشة النتائج، والحصول على أفضل نسبة إضافة من الاسمنت مدروسة عددياً تجعل استخدام البنتونايت المعالج حول الأوتاد أكثر فعالية على الاحتكاك، وأقل كلفة اقتصادية.

**1. الدراسة العددية:****1.1. الموديل الحقلي:**

اعتمد موديل وند بيتوني مصبوب في الموقع محمل شاقولياً ومنفذ مع البنتونايت ضمن تربة متطبقة لأحد الدراسات المرجعية الحقلية السابقة للباحث [4] (Hooi, 2010).

**\* مواصفات الوند :**

قطر الوند (Dp=1 m)، طول الوند (Lp=14.18 m)، استخدم السلوك المرن الخطي (Linear Elastic) في نمذجته، استخدم قانون مور كولومب (MC) في نمذجة تربة الموقع والبنتونايت. الأوتاد مستخدمة كأساسات عميقة

لمبنى عالي في (Kuala Lumpur, Malaysia). ركبت حساسات عند قمة رأس الوند جانبياً لقياس هبوط قمة الوند نتيجة التحميل.

الجدول (1) - مواصفات الجدار الوندي في الموديل الحقلي [3].

الرمز	القيمة	الوحدة
معامل مرونة الجدار الوندي البيتونى ( $E_{rc}$ )	25000000	Kpa
معامل بواسون للجدار البيتونى ( $\nu_{ru}$ )	0.3	-
الوزن الحجمي للبيتون المسلح ( $\gamma_b$ )	25	Kpa

\* مواصفات تربة الموديل الحقلي:

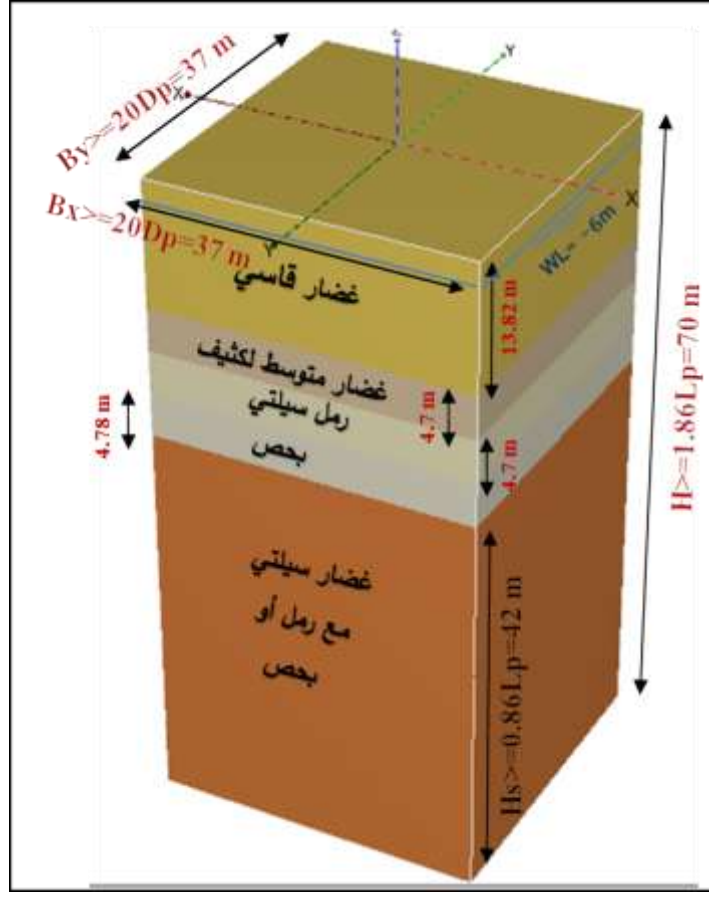
الموقع مؤلف من خمس طبقات يتم الحصول على المواصفات بواسطة سيور محفورة لعمق (50 m) مع مجموعة من الاختبارات الحقلية. طبقات تربة الموقع هي: الطبقة الأولى: غضار قاسي (Hard clay) حتى عمق (13.82 m). الطبقة الثانية: غضار متوسط لكثيف (medium dense to very dense clayey) حتى عمق (15.82 m). الطبقة الثالثة: رمل سيلتي (Silty sand) حتى عمق (23.22 m). الطبقة الرابعة: بحص (gravel) حتى عمق (28 m). الطبقة الخامسة غضار سيلتي مع رمل أو بحص (silty clay with sand or gravel) حتى عمق (50 m). منسوب المياه الجوفية على عمق (6 m)، تم تخفيض منسوب المياه أثناء مراحل الحفر لأسفل قدم الوند.

الجدول (2) - مواصفات تربة الموقع الحقلية [4].

نوع التربة	السمك (m)	قانون المادة المستخدم	$\phi$	$C_{ref}$ (Kpa)	$\gamma_{unsat}$ (Kn/m3)	$\gamma_{sat}$ (Kn/m3)	$E$ (Kpa)	$E_{oed}$ (Kpa)	$\nu$ (nu)	$K_x=K_y$ (m/d)	$K_z$ (m/d)	$R_{inter}$	$k_{0,x}=k_{0,y}$
غضار قاسي	13.82	MC	28	2	18	19	25000	3650	0.3	0	0	0.7	0.5305
غضار متوسط لكثيف	4.7		30	30	15	16	26400	42370	0.35	0	0	0.7	0.5
رمل سيلتي	4.7		31.5	4	19.7	20	1000	1224	0.26	0.786	0.522	0.7	0.4775
بحص	4.78		40	0	21	22	8000	17140	0.4	8.502	0	0.7	0.3572
غضار سيلتي مع رمل أو بحص	42		21	28	20.1	21	1500	2146	0.32	0.864	0.864	0.7	0.6416
البنوتات	-		1.5	2	1.25	1.5	100	214.3	0.4	0	0	0.49	0.1

1.1.1. الأبعاد والشروط الطرفية للموديل الحقلي:

حددت الأبعاد وفق المجالات التي سمح بها [5] (Jeong et al, 2014). توضح الأبعاد في الشكل [2].



الشكل [1] - حدود وأبعاد النموذج الحثلي [5].

- ارتفاع النموذج:  $[H \geq 1.86L_p = 70 \text{ m}]$ : عرض النموذج في الاتجاهين (X and Y):  $[B_x = B_y \geq 20 D_p = 37 \text{ m}]$ : عمق التربة أسفل قدم الوند:  $[H_s \geq 0.86l_p = 42 \text{ m}]$ .

### 2.1.1. نمذجة الموديل الحثلي عددياً:

- تم نمذجة الموديل الحثلي عددياً باستخدام برنامج (Plaxis 3D, 2020)، وأجريت مقارنة بين نتائج النمذجة العددية والنتائج الحثلية لهبوط الوند تحت تأثير التحميل الشاقولي.

- تم نمذجة حفرة الوند المملوءة بالبنتونايت قبل الصب، كأسطوانة شاقولية (Vertical cylinder) مملوءة بتربة بمواصفات البنتونايت وقطرها  $(D_b = 1.05 \text{ m})$ . مع استخدام خيار (Decompose in to surface) في البرنامج، وإعطاء خواص سطح بيني موجب (Positive interface) يفصل بين جوانب حفرة البنتونايت الخارجية والتربة المحيطة، بالإضافة لسطح بيني موجب يفصل بين قدم أسفل حفرة البنتونايت والتربة المحيطة.

- تم نمذجة الوند المصبوب في المكان كـ (Embedded pile) وقطره  $(D_p = 1 \text{ m})$  (Xuan ming et al, 2021)، يتم وضع الوند ضمن حفرة البنتونايت أثناء مراحل الحساب، إن الفرق بين قطر حفرة البنتونايت وقطر الوند  $(t_b = D_b - D_p = 5 \text{ cm})$  يمثل سماكة طبقة كعكة البنتونايت المفترض (filter cake) والتي تشكل حلقة أسطوانية وفق [2] (Darveshi et al, 2019)، بعد تنفيذ الوند تتبقى هذه الطبقة وتكون خواصها نفس خواص البنتونايت.

تم وضع سطح بيني سالب (negative interface) يفصل بين جوانب الوتد البيتوني المحمل شاقولياً والجوانب الداخلية لكعكة البنتونايت، بالإضافة لسطح بيني سالب يفصل بين أسفل قدم الوتد البيتوني والقاعدة الداخلية لكعكة البنتونايت، ويظهر ذلك في الشكل التالي:



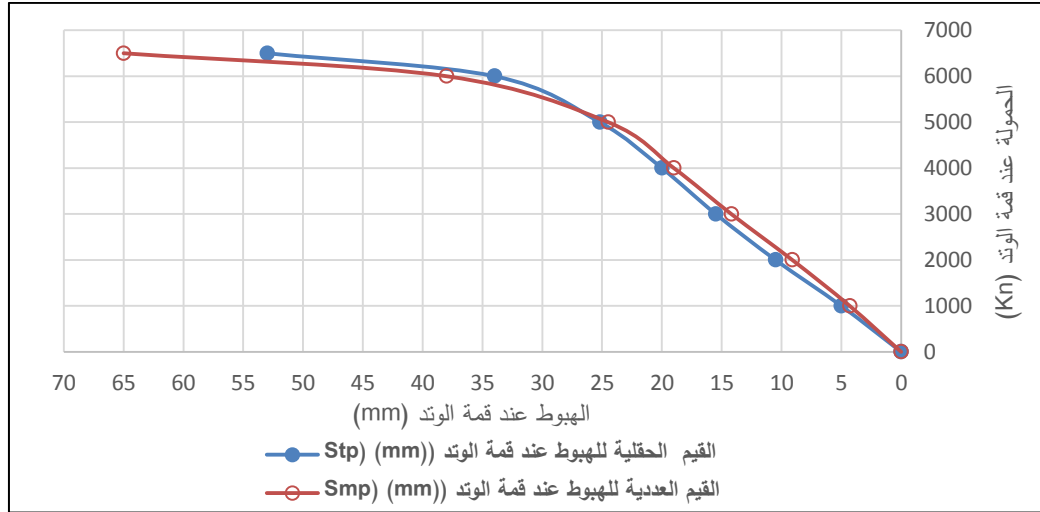
الشكل [2] - طريقة نمذجة الوتد البيتوني وحفرة البنتونايت مع السطوح البينية.

الجدول (3) - مراحل الحفر والحساب العددي.

رقم مرحلة الحساب	مراحل الحفر
1	تفعيل كامل طبقات التربة والإجهادات الفعالة.
2	الحفر في الغضار القاسي حتى منسوب (13.82 m) عند قمة الوتد
3	تنفيذ البنتونايت ضمن الحفرة وتفعيل السطح البيني بين التربة والبنتونايت
4	تنفيذ الوتد ضمن حفرة البنتونايت وتفعيل جميع السطوح البينية
5	تفعيل قيمة الحمولة الشاقولية عند كل حالة تحميل حتى الوصول للحمولة التي تنهار فيها التربة ويكون هبوط الوتد (>7cm)

### 3.1.1. تحقيق الموديل (المعايرة):

أجريت مقارنة بين منحنى قيم الهبوطات الشاقولية الحلقية للباحث [4] مع منحنى قيم الهبوطات الشاقولية المحسوبة عددياً بـ(Plaxis, 3D) عند جانب قمة الوتد، ويظهر ذلك في الشكل التالي:



الشكل [3] - المقارنة بين منحنى الهبوط الحقلي والهبوط العددي تحت تأثير الحمولة الشاقولية.

الجدول (4) - قيم الهبوطات الحقلية والعددية تحت تأثير التحميل الشاقولي.

الحمولة عند قمة الوند (Kn)	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000	6500
القيم الحقلية للهبوط عند قمة الوند (Stp) (mm)	0	5	11	16	20	26	34	53
القيم العددية للهبوط عند قمة الوند (Smp) (mm)	0	4.3	8	14	19	24	38	69
النسبة المئوية للفرق بين الهبوط الحقلي والهبوط العددي (% $\Delta S$ )	0	14	27.27	12.5	5	7.69	10.53	23.19

مما سبق نلاحظ أن:

-منحنى القيم المحسوبة عددياً يعطي هبوطات أكبر من منحنى القيم المقاسة حقلياً، مما يحقق ناحية أمان عند النمذجة العددية.

-أكبر نسبة مئوية للفرق بين الهبوطات المقاسة والمحسوبة ( $\Delta S \max = 27.5$ ) وهي نسبة لا تتجاوز (30%) مما يجعل الفروقات مقبولة، وبالتالي يكون الموديل العددي المقترح محقق.

## 2.1. الموديل العددي المقترح:

### 1.2.1. مواصفات الموديل المقترح:

استخدمت نفس الأبعاد والحدود الطرفية لموديل الباحث [5]، ونفس خواص وقانون المادة لنمذجة الوند ونفس مراحل الحفر. استخدم البنتونايت المصري نوع (4 - Bentonite OCMA - DFCEP)، بنسبة خمس أضعاف البنتونايت وفق [2] للبنتونايت الحقلي.

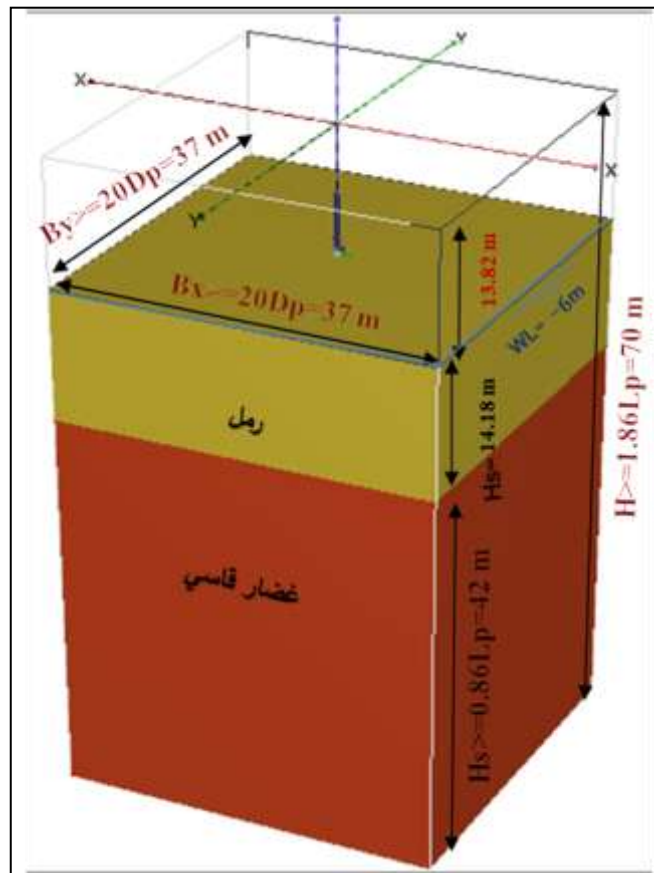
تم استخدام قانون (Hardening soil) [HS] لنمذجة طبقات التربة.

\*مواصفات تربة الموديل المقترح: الموقع مؤلف من ثلاث طبقات أخذت خواصها وفق (Nossan, 2008). طبقات تربة الموقع هي: الطبقة الأولى: غضار قاسي (Hard clay) حتى عمق (13.82 m). الطبقة الثانية: رملية (sand) حتى عمق (28 m). الطبقة الثالثة: غضار قاسي (Hard clay) حتى عمق (50 m). منسوب المياه الجوفية على

عمق (7 m)، تم تخفيض منسوب المياه أثناء مراحل الحفر لأسفل قدم الوند. تظهر مواصفات تربة الموقع والبنتنوايت في الجدول (5) التالي:

الجدول (5) - مواصفات تربة الموديل المدروس عددياً.

البنتنوايت	غضار قاسي	رمل	الواحدة	الرمز	البارامتر
Mc	HSS	HSS	-	موديل	موديل المادة
Drained	Drained	Drained	-	النوع	نوع المادة
1.25	21	17	kN/m3	yunsat	الكثافة غير المشبعة (فوق منسوب المياه)
1.5	21	20	kN/m3	ysat	الكثافة المشبعة
50.92	-	-	kN/m4	E=y Ebed	معامل المرونة
0	0.0001	0.5	m/day	KX	النفاذية في الاتجاه الأفقي
0	0.0001	0.5	m/day	KY	النفاذية في الاتجاه الشاقولي
-	100000	43000	kPa	E50ref	معامل المرونة القاطع عند 50% من الإجهاد الكلي
-	100000	43000	kPa	Eoedref	معامل المرونة الأوتومي
-	300000	129000	kPa	Eurref=3 E50ref	معامل مرونة التحميل والتفريغ
1.72	25	1	kPa	Oref	التماسك الفعال
1.1	30	34	0	Θ	زاوية الاحتكاك الفعالة
0	0	4	0	Ψ	زاوية التوسع الحجمي
0.11	0.87	0.441	-	K0,x=K0,y	معامل ضغط التربة الفعال
-	3	1	-	OCR	نسبة التشديد المسبق
0.1	0.2	0.2	-	vur	معامل بواسون المرن
-	0.9	0.9	-	Rf	نسبة الانتهاء
-	100	100	kPa	Pref	الإجهاد المرجعي
0.49	0.7	0.7	-	Rinter=tan(2*Θ/3)/tan(Θ)	معامل صلابة السطح البيني



الشكل [4] - حدود وأبعاد الموديل المقترح المدروس [5].



## 2.2.1. دراسة تأثير إضافة الاسمنت مع البنتونايت على مقاومة احتكاك الوند:

- إضافة الاسمنت إلى البنتونايت بنسب مختلفة وإجراء عدة تجارب مخبرية لتحديد خواص البنتونايت المعالج، ومن بين هذه التجارب تجربة الانتفاخ الحر واللزوجة لتحديد قابلية تشغيل البنتونايت المعالج بالإسمنت.

- تم نمذجة حفرة الوند المملوءة بالبنتونايت قبل الصب، كأسطوانة شاقولية مملوءة بترية بمواصفات البنتونايت المعالج بنسب الإضافات المختلفة من الاسمنت، مع إعطاء خواص سطحيين بينيين موجبين، وسطحين بينيين سالبين لهما نفس خواص السطوح البينية لموديل المعايير السابق، مع تغيير قيم معامل المرونة للأسطح البينية ليصبح نفس خواص معامل مرونة البنتونايت المعالج بالإسمنت.

- كما حسبت مقاومة احتكاك الوند الحديدية عددياً من خلال طريقة منحنى (هبوط- حمولة) الذي تم الحصول عليه باستخدام برنامج (Plaxis 3D, 2020)، حيث تكون قيمة الحمولة الحديدية هي النقطة التي يبدأ المنحنى فيها بالتحول إلى خط مستقيم.

- بينما تم حساب مقاومة الاحتكاك الحديدية للوند حسابياً باستخدام العلاقة التالية:

$$Q_{sc} = \sum_{i=1}^n P_i * L_i * f_i \quad (1)$$

حيث i: رقما للطبقة، عدد الطبقات n:، P<sub>i</sub>: محيط مقطع الوند، L<sub>i</sub>: سماكة الطبقة المخترقة، f: إجهاد الاحتكاك الواحد الجدي بين التربة و سطح الوند الجانبي ويحسب بالعلاقة:

$$f = K * \sigma_v * \tan \phi \quad (2)$$

K=1-sinØ: معامل دفع التربة، σ<sub>v</sub>: الإجهاد الشاقولي الفعال عند العمق المعتبر، وأقصى حد له عند العمق

(15\*D<sub>p</sub>) الذي يدعى بالعمق الحرج ويصبح بعد ذلك ثابتاً، (Ø=2/3\*Ø): زاوية الاحتكاك بين الوند والتربة.

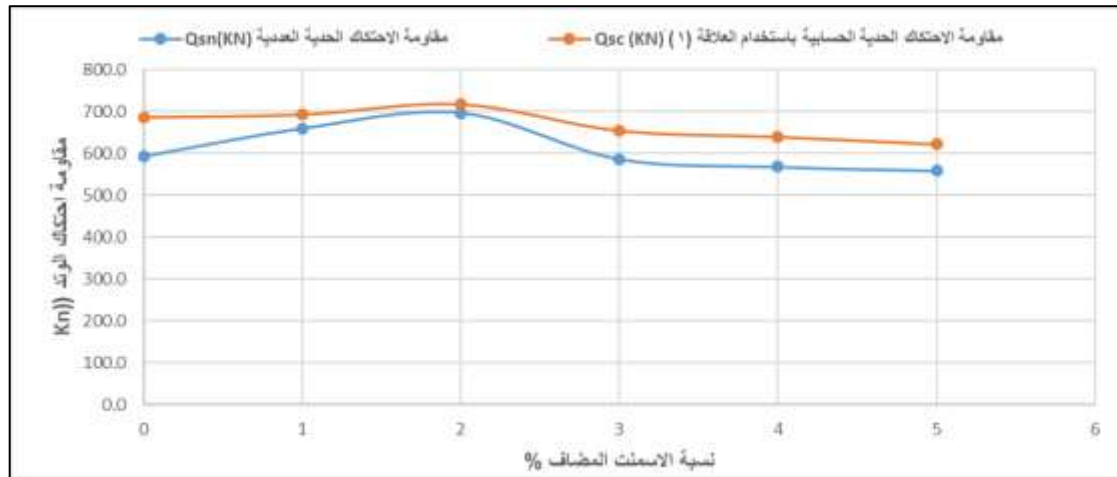
تظهر مواصفات البنتونايت قبل وبعد إضافة الاسمنت، والسطوح البينية لجميع الحالات المدروسة وفق الجدول التالي:

الجدول (6) - مواصفات البنتونايت المعالج بالإسمنت والسطوح البينية لجميع نسب الإضافات المدروسة عددياً.

نسبة الاسمنت المضاف للبنتونايت %	نوع التربة	قانون المادة المستخدم م	Ø	Cref (Kpa)	γsat (Kn/m3)	E (Kpa)	ν	Rinter السالب بين البنتونايت وجادب أسفل الوند	Rinter الموجب بين التربة المحيطة وحفرة البنتونايت	Rinter الموجب بين التربة أسفل الوند والبنتونايت	Rinter لحفرة البنتونايت	K0,x=K0,y
0	البنتونايت	MC	1.1	1.72	1.04	50.92	0.1	0.66	0.6	0.5	0.49	0.11
1	السطوح		5.11	1.75	1.04	138.2	0.1				0.27	0.11
2	البينية		5.1	1.76	1.04	153.3	0.1				0.26	0.11
3	الموجبة		4.9	1.78	1.03	187.2	0.1				0.13	0.11
4	و، السالبة		4.7	2	1.06	92.1	0.1				0.1	0.11
5	والبنتونايت		4.51	3.6	1	75.49	0.1				0.1	0.11

الجدول (7) - قيم اللزوجة ونسبة الانتفاخ والهبوط المنسوب إلى عرض الأساس ومقاومة الاحتكاك العددية والحسابية للوتد عند نسب الإضافات المختلفة من الاسمنت.

نسبة الانتفاخ %	191.7	151.3	146	140	134.8	116.3
اللزوجة $\mu$	45.3	33.2	32	31.6	19	17
الهبوط العددي (mm)	10.3	13	17	16	22.5	11
الحمولة الحديدية للوتد المحسوبة عددياً من منحنى (هبوط - حمولة) $Q_u(KN)$	750	900	930	810	775	700
مقاومة الاحتكاك الحديدية العددية $Q_{sn}(KN)$	593.8	659.6	696.6	587.2	568.4	559.2
مقاومة الاحتكاك الحديدية الحسابية باستخدام العلاقة $Q_{sc}(KN)$ (1)	687.1	693.5	718.4	654.7	639.7	621.9
نسبة الاسمنت المضاف %	0	1	2	3	4	5
النسبة المئوية للفرق بين مقاومة احتكاك اوتد الحسابية والعددية %	13.58	4.89	3.03	10.31	11.14	10.08



الشكل [5] - مقاومة الاحتكاك الحديدية للوتد عند نسب الإضافات المختلفة للإسمنت.

مما سبق نلاحظ أنه:

- 1- مع إضافة الاسمنت إلى البنتونايت تزداد مقاومة الاحتكاك الحديدية للوتد المنفذ مع البنتونايت، حيث تزداد مقاومة احتكاك الوتد المحسوبة عددياً ( $Q_{sn}$ ) بمقدار (9.98%) عند إضافة (1%) اسمنت للبنتونايت، و(14.8%) عند إضافة (2%) اسمنت للبنتونايت، وبعد هذه القيمة تعود قيمة ( $Q_{sn}$ ) للانخفاض عند نسب الإضافات المتبقية لتصبح أقل من مقاومة احتكاك البنتونايت دون إضافات، ويفسر ذلك بأن تماسك الاسمنت يحسن خواص التماسك الجانبي للبنتونايت حول الوتد مما يرفع الاحتكاك، بينما يفسر انخفاض الاحتكاك بعد نسبة (2%) اسمنت بسبب التفاعل الكيميائي الحاصل بين الاسمنت والبنتونايت عند النسبة (3%) وما فوق (Santhoshkumar et al, 2016).
- 2- تزداد مقاومة الاحتكاك الحديدية الحسابية ( $Q_{sc}$ ) بمقدار (0.9%) عند إضافة (1%) اسمنت للبنتونايت، و(4.4%) عند إضافة (2%) اسمنت للبنتونايت، وبعد هذه القيمة تعود قيمة ( $Q_{sc}$ ) للانخفاض عند نسب الإضافات المتبقية لتصبح أقل من مقاومة احتكاك البنتونايت دون إضافات.

- 3- نلاحظ مما سبق انخفاض نسبة انتفاخ البنتونايت مع زيادة نسبة الاسمنت، وتكون جميع النسب محققة لمعيار التشغيل الأول للبنتونايت (  $100\% >$  نسبة الانتفاخ).
- 4- تتخفف لزوجة البنتونايت مع زيادة نسبة الاسمنت، ويصبح البنتونايت غير قابل للتشغيل عند النسبة (3%) وما فوق اسمنت وتكون فعالية زيادة الاسمنت للبنتونايت بعد هذه النسبة قليلة جداً، حيث تكون قابلية التشغيل منخفضة جداً بعد هذه النسبة (32 < للزوج) (AASHTO, 2010).
- 5- مما سبق تم اعتماد نسبة الاسمنت المضاف للبنتونايت (2%) كنسبة مثالية كونها تعطي أكبر زيادة لمقاومة احتكاك الوند المنفذ مع بنتونايت، وتحافظ على قابلية تشغيل البنتونايت ضمن الحدود المسموحة ومن أجل الناحية الاقتصادية لتوفير كلفة استخدام البنتونايت.

### الاستنتاجات والتوصيات:

#### الاستنتاجات:

- 1- تزداد مقاومة الاحتكاك الحديدية للوند المنفذ مع بنتونايت (QS) مع زيادة نسبة الاسمنت المضاف للبنتونايت حتى النسبة (2%)، لتعود (QS) للانخفاض بعدها وتصبح أقل من (QS) الأصلية.
- 2- تزداد مقاومة احتكاك الوند المحسوبة عددياً (Qsn) بمقدار (9.98 %) عند إضافة (1%) اسمنت للبنتونايت، و(14.8%) عند إضافة (2%) اسمنت للبنتونايت، كما تزداد مقاومة الاحتكاك الحديدية الحسابية (Qsc) بمقدار (0.9%) عند إضافة (1%) اسمنت للبنتونايت، و(4.4%) عند إضافة (2%) اسمنت للبنتونايت.
- 3- تقل لزوجة البنتونايت عند إضافة (2% و 1%) اسمنت للبنتونايت، وتتخفف للزوج بعد هذه النسبتين فتكون فعالية زيادة الاسمنت بعد النسبة (2%) للبنتونايت معدومة.
- 4- يحافظ البنتونايت على قابلية تشغيله عند إضافة النسبتين (2% و 1%) من الاسمنت، وتكون نسبة إضافة (2%) من الرمل البحري هي النسبة المثالية بسبب زيادة مقاومة احتكاك الوند ومن أجل الناحية الاقتصادية لتوفير كلفة استخدام البنتونايت.

#### التوصيات:

- 1- يوصى بإعطاء أكبر اهتمام لتحسين مواصفات البنتونايت والطبقة الرقيقة من البنتونايت المتشكلة حول الوند، من خلال استخدام إضافات أخرى تحسن مواصفات القص وتحافظ على قابلية التشغيل للبنتونايت.
- 2- يوصى بإجراء تجارب حقلية على تحميل الأوتاد المنفذة مع بنتونايت معالج بنسبة الإضافة المثالية (2%) اسمنت، من أجل تدعيم النتائج العددية حقلياً.
- 3- يوصى بإجراء دراسة بارامترية لسلوك الأوتاد على الاحتكاك عند تغيير مواصفات طبقة (Filter cake) من البنتونايت المتشكلة حول الأوتاد (سماكة الطبقة، صلابة السطح البيئي الفاصل بين هذه الطبقة والوند والترية المجاورة، تماسك واحتكاك ومرونة هذه الطبقة)، بسبب قلت الدراسات المرجعية المتضمنة هذه البارامترات باستخدام نمذجة (3D).

## References:

1. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), LRFD, 2010 Bridge Design specifications 5<sup>th</sup> Ed.
2. Darvishi. A., Vosoughifar. H., Saeidijam. S., Torabi. M and Rahmani. A, " *An experimental and prediction study on the compaction and swell–expansion behavior of bentonite clay containing various percentages of two different synthetic fibers*", (2019), Geotechnical Engineer, Istanbul Technical University, ITU, Ayazağa Campus, Maslak, Istanbul 34469, Turkey.
3. Hashemzadeh. M, S and Hajidavalloo. E, "*Numerical investigation of filter cake formation during concentric eccentric drilling*", (2016). Department of Mechanical Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz 61355, Iran, Journal of Petroleum Science and Engineering 145 (2016) 161–167.
4. Hooi. S, T, "*EFFECTS OF BENTONITE ON SKIN FRICTION OF BORED PILES* ", (January, 2010). A project dissertation submitted to the Civil Engineering Programme Universiti Teknologi PETRONAS in partial fulfilment of the requirement for the Bachelor of Engineering (lions) (Civil Engineering).
5. Jeong. S., Junyoung. K., Lee. C b & Kim. J, "*Response of Single Piles in Marine Deposits to Negative Skin Friction from Long-term Field Monitoring*", (July, 2014). Department of Civil Engineering, Yonsei University, Seoul, Korea b Department of Civil Engineering, Kangwon University, Chuncheon.
6. Ng, W. L. Sean. "*Effects of Construction on the Performance of Lcufe Excavated Piles Supported by Bentonite*". Hong Kong University of Science & Technology, (2002).
7. Nossan. S. A, (2008), "*Advances and uncertainties in design of anchored retaining walls by numerical modelling*". University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering, Ka i eva 26, HR-10 000 Zagreb, Croatia.
8. Santhoshkumar, G. T., B. M. Abraham, M. B., Sridharan. A and Jose, T. B, "Role of Bentonite in Improving the Efficiency of Cement Grouting in Coarse Sand", Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA Vol. 47 No. 3 September 2016 ISSN 0046-5828 Principal, JBCMET, JB Campus, Kochi-683556, 2Prof. of Civil Engineering, CUSAT Kochi – 22, 3 Sr .
9. Xuan. B. M., Wei-tingc. D., Yuc. P., Hanga. Z and Chun-yanc. W, " *Bearing Behavior of Cast-in-Place Expansive Concrete Pile in Coral Sand Under Vertical Loading* ", (22, March, 2022). National Joint Engineering Research Center of Geohazards Prevention in the Reservoir Areas Department, Chongqing University, Chongqing 400045, China c, China Ocean Eng., 2021, Vol. 35, No. 3, P. 352–360