

دراسة عددية لثبات المنحدرات الرملية المحملة على سطحها و المدعمة بالأوتاد

الدكتور توفيق فياض *

الدكتور مهند مهنا **

محرر علي رجب ***

(تاريخ الإيداع 12 / 2 / 2018. قُبل للنشر في 21 / 6 / 2018)

□ ملخص □

تعد مسألة ثبات المنحدرات وتأمين استقرارها من المشاكل الجيوتكنيكية الأساسية نظراً للأضرار الكبيرة (المادية والمعنوية) المرتبطة بالانهيار. يهدف هذا البحث إلى دراسة تأثير وجود الأوتاد على استقرار المنحدر المحمل بحمولة أساس شريطي على سطحه ، ودراسة البارامترات المؤثرة على الاستقرار [البعد عن قمة المنحدر (X) ، التباعد بين الأوتاد (S) ، طول الوتد (L) ، بعد طرف الأساس الشريطي عن قمة المنحدر (b)].

لقد تم إنجاز البحث على مرحلتين : في المرحلة الأولى تم تشكيل نموذج عددي لمنحدر رملي باستخدام (برنامج $FLAC^{3D}$) و حساب هبوط الأساس الموجود على سطح المنحدر قبل التدعيم بالأوتاد وبعده، ومقارنة النتائج مع نتائج مخبرية مرجعية (حالة مرجعية) ، حيث أعطت النتائج العددية تقارباً مقبولاً مع النتائج المخبرية.

أما المرحلة الثانية فتناولت دراسة بارامترية لأهم العوامل المؤثرة على استقرار المنحدر المدعم مثل (طول الأوتاد ، التباعد بين الأوتاد، بعدها عن قمة المنحدر و بعد الأساس عن طرف المنحدر)، حيث أظهرت الدراسة البارامترية أن تنفيذ الأوتاد بالقرب من قمة المنحدر أكثر فعالية في التدعيم حيث لوحظ زيادة عامل استقرار المنحدر المحمل بازدياد قرب الأوتاد من القمة وأعظم قيمة لمعامل الأمان كانت عند النسبة $X=0.7L_x$ ، كما أن استقرار المنحدر يعتمد بشكل ملحوظ على طول الوتد حيث يزداد عامل استقرار المنحدر المحمل بزيادة طول الأوتاد حتى الوصول إلى طول حدي للأوتاد يساوي ارتفاع المنحدر. أظهرت الدراسة الحالية فعالية الأوتاد في زيادة قدرة التحمل الحدية مع زيادة بعد الحمولة عن طرف المنحدر ونلاحظ ثبات قدرة التحمل الحدية عند زيادة بعد الأساس عن طرف المنحدر لمسافة تزيد عن $b=3B$. من جهة أخرى ينخفض عامل الاستقرار بزيادة التباعد بين الأوتاد حيث يبدأ تأثير الأوتاد بالتلاشي تقريباً عند زيادة التباعد عن ستة أضعاف قطر الوتد في حالة المنحدرات المحملة على سطحها ($UBCR<1.1$).

الكلمات المفتاحية: استقرار المنحدر، عامل الأمان، الأساس ، الأوتاد، التحليل العددي.

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

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

*** طالبة ماجستير - قسم الهندسة الجيوتكنيكية - كلية الهندسة المدنية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

Numerical Study of Sand Slope Stability Loaded on its Surface and Supported by Piles

Dr. Tawfiq Fayyad *
Dr. Mohannad Mhanna **
Mahar Rajab ***

(Received 12 / 2 / 2018. Accepted 21 / 6 / 2018)

□ ABSTRACT □

The problem of slope stability is considered as a main geotechnical problem due to the significant damage (material or moral) related to failure. This paper aims to study the influence of piles on the stability of slopes loaded with strip footing and investigating the parameters affected on stability (location of pile row relative to the slope crest X , piles spacing S , piles length L and edge distance of the footing b). This study has been realized in two phases : the first phase consists in establishing a numerical model for sand slope by using finite element analyses program (FLAC^{3D}) and determining the footing settlement at crest of slope before using piles and after reinforcing , after that the numerical results is compared with the experimental ones (reference case). A close agreement between experimental and numerical curves is noticed .The second phase deals with studying the influence of most important parameters such as (piles length ,piles spacing, pile row location relative to the slope crest on stability and edge distance of the footing) on the slope stability. The results of parametric study have shown the piles installed near the slope crest is more efficient in reinforcing where the safety factor is increased by reducing the distance between row of piles and slope crest and the greatest value for safety factor when $X=0.7L_x$. The currently study showed the efficiency of piles to increase the ultimate bearing capacity with increasing edge, after that at $b=3B$ the increase in ultimate bearing capacity decreased. Also the slope stability depends significantly on pile length and it increases even reaching the length equals the height of the slope. At other hand, the safety factor is reduced by increasing the piles spacing, so that the efficiency of pile is disappeared when pile spacing equals to six times pile diameter($UBCR<1.1$).

Keywords: slope stability, safety factor, footing ,piles, numerical analysis.

* Professor at Department of Geotechnical engineering, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University , Lattakia, Syria.

** Assistant Professor at Department of Geotechnical engineering, Faculty of Civil Engineering , Tishreen University , Lattakia , Syria.

*** Master Student in at Department of Geotechnical engineering, Faculty of Civil Engineering , Tishreen University ,Lattakia, Syria

مقدمة:

يحدث انهيار المنحدرات نتيجة فقدان توازنها وذلك عندما تزيد القوى المسببة للانهايار عن مقاومة التربة، وهناك أسباب عديدة تؤدي إلى الانهيار (حدوث زيادة في ميل المنحدرات الطبيعية، الحفر في أسفل المنحدر، الزيادة في ضغط المياه المسامية والذي يؤدي إلى نقص مقاومة القص للتربة غير المتماسكة أو انفخاخ التربة المتماسكة ، وضع حمولات إضافية فوق المنحدر، التأثيرات الديناميكية (الاهتزازات والزلازل الأرضية) والاهتزازات الناجمة عن التفجير). هناك طرق عديدة لتدعيم المنحدرات: (تنشيت قدم المنحدر، الجدران الاستنادية ، تصريف المياه ، الجيوستيل، الأوتاد). إن استخدام الأوتاد في تدعيم المنحدرات أصبح من الطرق المنتشرة بشكل كبير نظراً لفعاليتها والخبرة العملية في تنفيذها.

هنالك العديد من الطرق التجريبية والعديد لدراسة استقرار المنحدرات المدعمة بالأوتاد ، تصنف هذه الطرق بالعموم إلى نوعين : التحليل غير المشترك باستخدام طريقة التوازن الحدي (Uncoupled analysis by limit) equilibrium method هذه الطريقة تعتمد على تبسيط ضغط تربة المنحدر على الأوتاد وتمثيلها بمسألة أوتاد معرضة إلى ضغط تربة جانبي وذلك باستخدام طرق تجريبية أو تحليلية (Ito and Matsui, 1981; Jeong et al, 2011; Kourkoulis et al, 2003) من المشاكل الأساسية بهذه الطريقة : الصعوبة في تقدير انتقالات التربة الجانبية، الضعف في تمثيل نظام وتد-منحدر حيث اعتبروا الأوتاد صلبة وبطول محدود، كما أنها لا تأخذ بعين الاعتبار العديد من الظواهر مثل تقوس التربة مثلاً، وهنا تبرز أهمية الطريقة الثانية طريقة التحليل المشترك (Coupled analysis by finite element method) هذه الطريقة تعتمد على دراسة التوازن الكلي للمنحدر المدعم بالأوتاد اعتماداً على العناصر المنتهية حيث أنها أمنت حلولاً مشتركة بأخذ استجابة الودت واستقرار المنحدر معاً (Cai, 2000; Won, 2005; Cheng and Wei, 2009; Ashour, 2012 ; Abdelaziz, 2015).

أهمية البحث وأهدافه:

بدأ الاهتمام بمسألة ثبات المنحدرات ومنعها من الانزلاق نظراً للأضرار الكبيرة المرتبطة بالانهيار سواء تلك التي تحدث في المنشآت المقامة على هذه المنحدرات أو الأضرار البشرية و تعريض أرواح الناس للخطر . في بعض من الحالات يكون التدعيم باستخدام الأوتاد هو الحل الأنسب والأقل كلفة بالمقارنة مع حالات التدعيم الأخرى ، بالإضافة إلى إمكانية استخدام هذه الأوتاد لأغراض أخرى (تأسيس وتحمل حمولات شاقولية) . يهدف هذا البحث إلى دراسة استقرار المنحدر المحمل بحمولة أساس شريطي على سطحه والمدعم بصف من الأوتاد باستخدام برنامج (FLAC^{3D}) وهو برنامج للنمذجة العددية واسع الاستخدام لحل المشاكل الجيوتهكنيكية المتقدمة التي تتضمن التأثير المتبادل بين التربة والمنشآت بطريقة ثلاثية الأبعاد، يعتمد هذا البرنامج على منهجية الفروقات المحدودة التي تساعد في نمذجة المسائل المعقدة مثل المشاكل الجيوتهكنيكية المؤلف من عدة مراحل (stages) (حفر، تحسين، التشوهات الكبيرة ومسائل عدم الاستقرار التي تتضمن خضوع وتلدن على مساحات كبيرة وحتى الانهيار التام) . استخدم النموذج العددي بعد معايرته لإجراء دراسة بارامترية لأهم العوامل المؤثرة على الاستقرار وهي:

1- طول الأوتاد (L).

2- التباعد بين الأوتاد في الصف الواحد (S) .

3- موقع تنفيذ الأوتاد بين قمة وقدم المنحدر (بعد الودت عن القمة X).

4- بعد طرف الأساس الشريطي عن قمة المنحدر (b).

هذا البحث سوف يساهم في توضيح إمكانية استخدام الأوتاد لتدعيم المنحدرات و تقديم نتائج يمكن تطبيقها مباشرة في المسائل العملية وتوضيح أهم العوامل المؤثرة على الاستقرار وأخذها بعين الاعتبار.

طرائق البحث ومواده:

إن دراسة استقرار المنحدرات باستخدام الطرق التحليلية وبالأخص طرق التوازن الحدي تحتاج علاقات طويلة معقدة و تتطلب مخططات و جداول ، أي تحتاج وقت وجهد كبيرين في تحديد سطح الانزلاق وبالتالي حساب معامل الأمان. نظراً لذلك استخدمت طرق التحليل العددي ومنها طريقة العناصر المنتهية (FEM) كطريقة أثبتت فعاليتها في مسائل جيوتكنيكية معقدة فهي طريقة شاملة لا تحتاج مدة زمنية طويلة، وتعطي نتائج مقبولة مقارنة بالقياسات الحقلية والمخبرية. تم في هذا البحث استخدام برنامج $FLAC^{3D}$ لنمذجة المنحدر مع الأوتاد وإجراء دراسة موسعة لأهم العوامل المؤثرة على الاستقرار. يتميز هذا البرنامج بمقدرته على محاكاة سلوك المنشآت ثلاثية الأبعاد المقامة على التربة، الصخور والمواد الأخرى والتي تتعرض للتشوهات اللدنة عندما تصل الإجهادات إلى قيم الخضوع. يتم تمثيل المواد بواسطة عناصر متعددة السطوح ضمن شبكة ثلاثية الأبعاد يتم اختيارها ومعايرتها لتمثل الوسط المدروس بشكل جيد، يستجيب كل عنصر للحمولات والشروط الطرفية المطبقة وفقاً لقانون الإجهاد/تشوه (خطي أو لا خطي) المعروف في البرنامج . يستطيع هذا البرنامج تمثيل استجابة المواد في مجال التشوهات الصغيرة إضافة للتشوهات الكبيرة ، حيث عند تعرض المواد الممتلئة إلى تشوهات تصل لمرحلة الخضوع أو حتى السيلان تنشوه عناصر الشبكة و تتحرك مع المواد التي تمثلها.

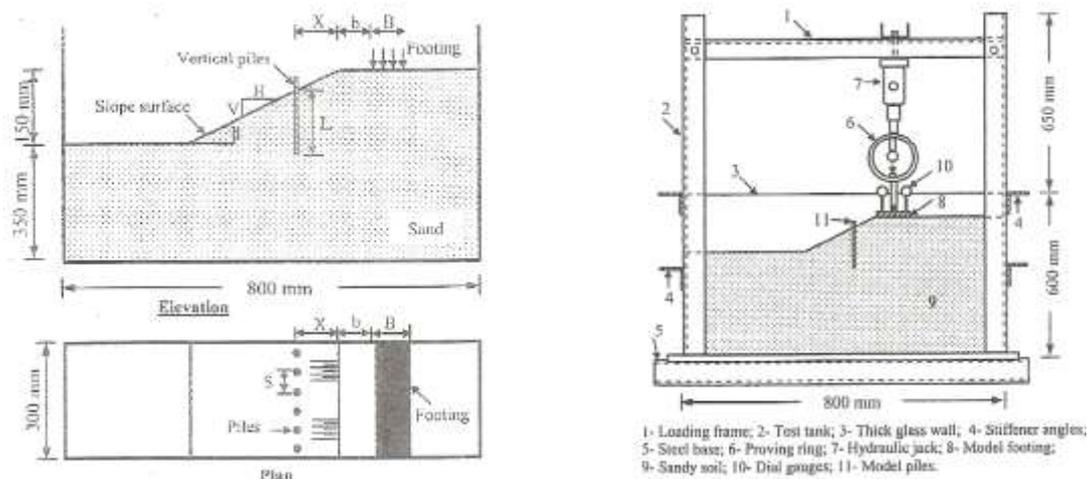
وقد تم إنجاز البحث وفق مرحلتين أساسيتين:

- المرحلة الأولى (حالة مرجعية): تتضمن دراسة منحدر رملي محمل بحمولة أساس شريطي على سطحه تم نمذجته باستخدام برنامج ($FLAC^{3D}$) و مقارنة هبوط الأساس مع حالة مخبرية مرجعية، وذلك في حالتين للمنحدر (مدعم و غير مدعم بالأوتاد).
- المرحلة الثانية: تتضمن دراسة بارامترية لتوضيح أهم العوامل التي تحكم سلوك المنحدرات المدعمة بالأوتاد (أطوال الأوتاد، و تباعداتها ، وبعدها عن قمة المنحدر، ودراسة بعد طرف الأساس عن قمة المنحدر) وبيان تأثيرها على توازن المنحدر واستقراره.

النتائج والمناقشة:

A- معايرة الموديل العددي

يتكون المثال المرجعي من منحدر رملي مدعم بالأوتاد ارتفاعه 150mm، وقد تمت نمذجته باستخدام برنامج $FLAC^{3D}$ بنفس الأبعاد الهندسية والشروط الطرفية ومواصفات المواد المستخدمة في التجربة المخبرية المرجعية (Rao and Nasr,2010) الموضحة بالشكل (1) .



الشكل (1): النموذج العددي للمنحدر وفق معطيات التجربة المخبرية المرجعية (Rao and Nasr,2010)

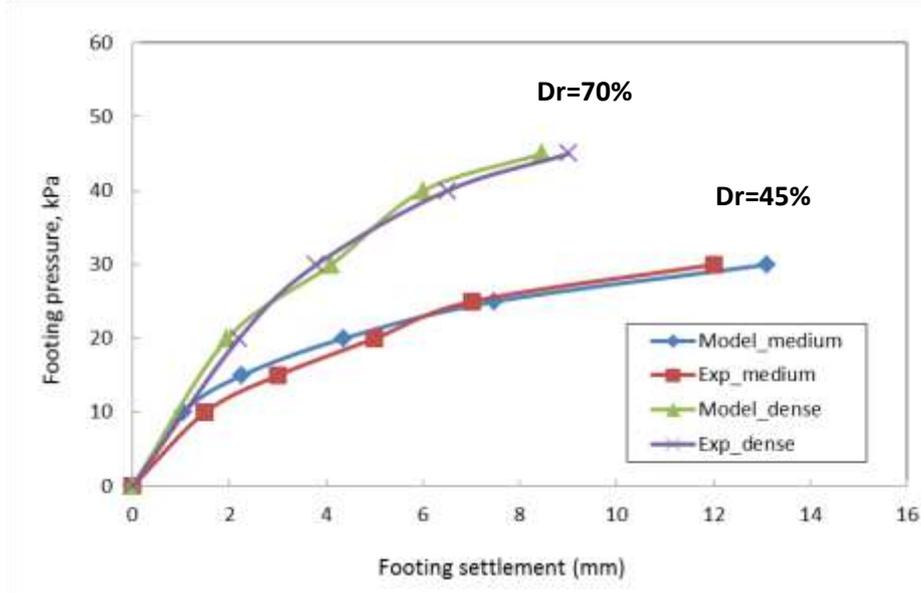
النموذج بارتفاع 500mm وعرض 800mm والمنحدر بارتفاع H=150mm بميل (2H:1V) 26.56° ، محمل بحمولة أساس على سطحه حيث تم استخدام مقطع معدني صندوقي لتمثيل الأساس الشريطي بعرض B=50mm وسماكته t=35mm ، مكون من تربة رملية مواصفاتها هي ذاتها المستخدمة في التجربة المخبرية وموضحة بالجدول (1) ، الأوتاد المستخدمة معدنية بمقطع دائري وقطر D=6mm .

استخدم موديل (Hardening soil) في نمذجة السلوك اللاخطي للرمال ، وهو موديل يستخدم نظرية اللدونة بدلاً من نظرية المرونة وطور عن الموديل القطعي (hyperbolic model (Dunc and Chang, 1970) ، وهذا الموديل يسمح بتمثيل سلوك التقسية والتلين للتربة بالاعتماد على جداول لوصف تغير بارامترات قانون مور كولومب (التماسك، الاحتكاك ، التوسع الحجمي) كتتابع لتشوهات القص اللدن (ϵ_p) ، يقوم البرنامج بدوره بالتحديث الآلي لبارامترات التقسية لجميع العناصر عند الوصول إلى مرحلة الخضوع وذلك دوماً كتابع لتشوهات القص اللدن الحاصلة. أما بالنسبة للشروط الطرفية للنموذج فقد تم الأخذ بعين الاعتبار شروط التجربة المخبرية حيث يمنع الحركة الأفقية و الشاقولية من أسفل النموذج كما منعت الحركة الأفقية للجوانب الشاقولية ، وطبق من الأعلى حمولة أساس موزعة بانتظام ($q=10-20-30-40kPa$).

الجدول (1) بارامترات تربة المنحدر والأوتاد في التجربة المخبرية المرجعية

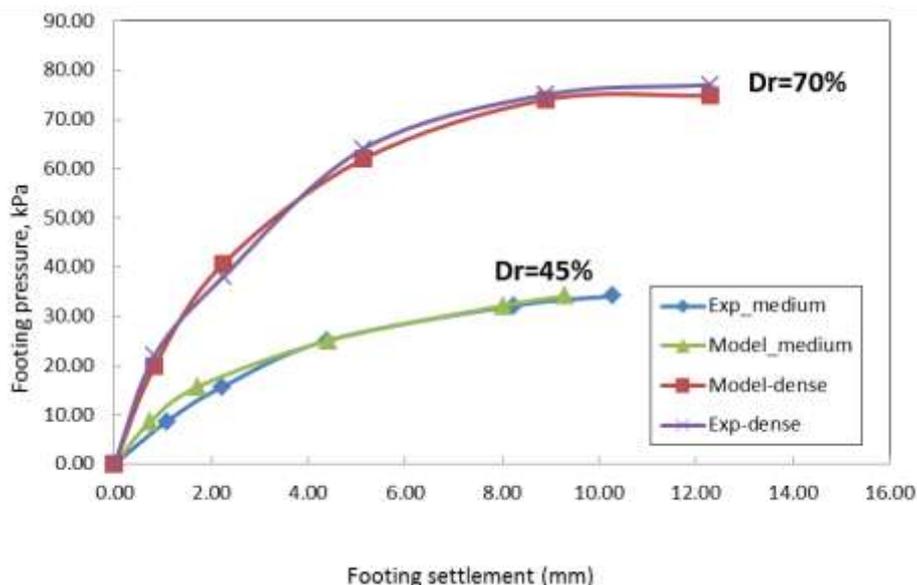
Parameter	Medium Sand	Dense Sand	Footing steel	Piles steel
Material model	Hardening soil model	Hardening soil model	linear	Linear
Young's modulus, E (Kpa)	20000	45000	$21 * 10^7$	$21 * 10^7$
Poisson's ratio, v	0.3	0.3	0.2	0.2
Cohesion, C(Kpa)	0.00	0.00	.....	.....
Friction angle, ϕ (°)	34	37	.....	.....
Dilatancy angle, ψ (°)	4	7	.....	.....
Unit weight, γ (kn/m^3)	18.35	18.94	78	78

تم حساب هبوط الأساس الموجود على سطح المنحدر (قبل وجود الأوتاد) من أجل حمولات سطحية مختلفة $q=(10-20-30-40-50 \text{ kpa})$ ومقارنة النتائج العددية مع القياسات المرجعية للتجربة المخبرية. يوضح الشكل (2) هذه المقارنة وذلك لحالتي رمل مرصوص ومتوسط التراص حيث تعكس نتائج النموذج العددي تقارباً مقبولاً مع النتائج المرجعية للتجربة المخبرية من أجل جميع الحمولات السطحية ولم تتجاوز الفروقات قيمة 7% .



الشكل (2): مقارنة بين نتائج نموذج ال FEM والقياسات المرجعية بالنسبة لهبوط الأساس الموجود على سطح المنحدر قبل التدعيم بالأوتاد

كما تم حساب هبوط الأساس الموجود على سطح المنحدر (المدعم بالأوتاد) وذلك لحالتي رمل مرصوص ومتوسط التراص، حيث أن الأوتاد بطول يساوي ضعفي عرض الحمولة ($L=2B$) و التباعد فيما بينها يساوي عرض الحمولة ($S=B$) ومقارنة النتائج العددية مع القياسات المرجعية المخبرية ، يوضح الشكل (3) أن نتائج النموذج العددي تعكس تقارباً جيداً مع النتائج المرجعية للتجربة المخبرية.



الشكل (3): مقارنة بين نتائج نموذج الـ FEM و القياسات المرجعية بالنسبة لهبوط الأساس الموجود على سطح المنحدر المدعم بالأوتاد

مما سبق نجد أن هناك تقارباً في النتائج التي يعطيها برنامج الـ $FLAC^{3D}$ مع القياسات المرجعية للتجربة المخبرية وبالتالي يمكن استخدامه في دراسة أهم البارامترات المؤثرة على توازن المنحدر.

B- دراسة بارامترية لأهم العوامل المؤثرة على استقرار المنحدر باستخدام برنامج $FLAC^{3D}$:

سنتناول في هذه المرحلة دراسة أهم بارامترات الوتد المؤثرة على استقرار المنحدر وهي:

1- التباعد بين الأوتاد (S)

2- طول الوتد (L)

3- بعد صف الأوتاد عن قمة المنحدر (X).

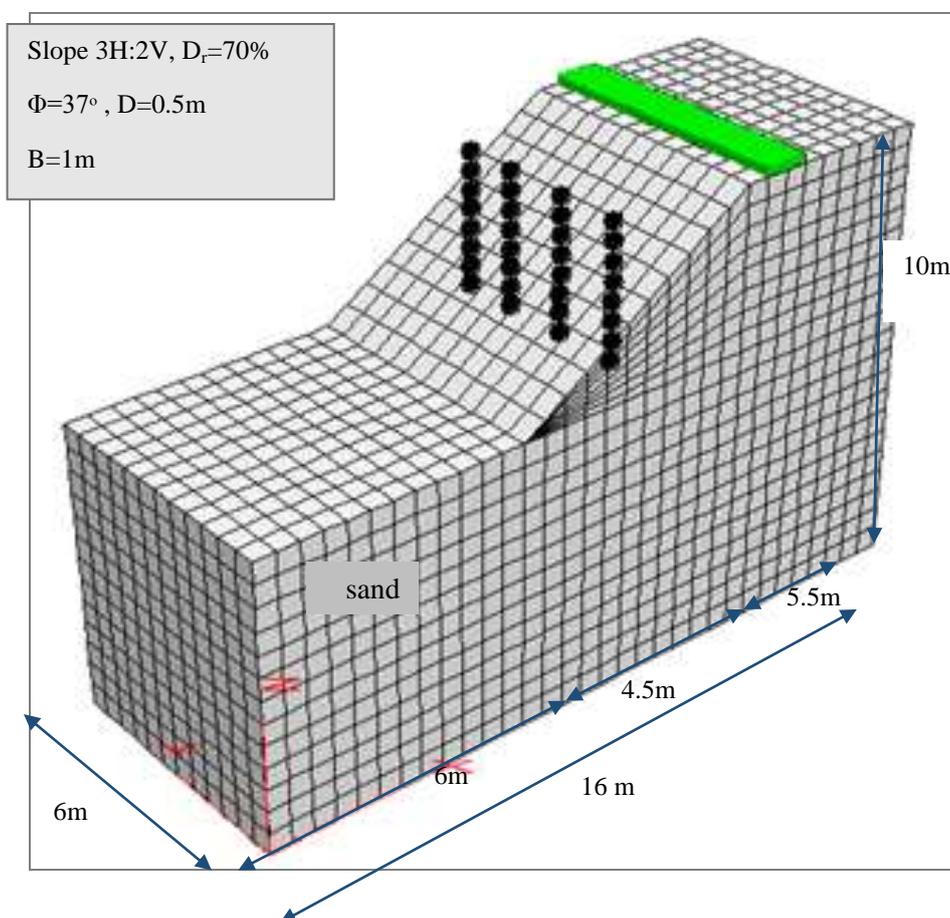
4- بعد طرف الأساس الشريطي عن قمة المنحدر (b).

تم التحليل العددي باستخدام برنامج $FLAC^{3D}$ حيث يعتمد تحليل التوازن في برنامج $FLAC$ على طريقة تخفيض مقاومة القص للمواد المشكلة للمنحدر، حيث يتم إنقاص المقاومة بالتدرج إلى أن يحدث الانهيار، وذلك بتخفيض قيمتي عامل التماسك وزاوية الاحتكاك الداخلي معاً بعامل تخفيض واحد، وزيادة قيمة هذا العامل بالتدرج حتى يحصل الانهيار، وبالتالي فإن قيمة عامل التخفيض الأخيرة (أي الموافقة لحدوث الانهيار) والقيمة التي تسبقها مباشرة تشكلان حدين يحصران قيمة عامل استقرار المنحدر.

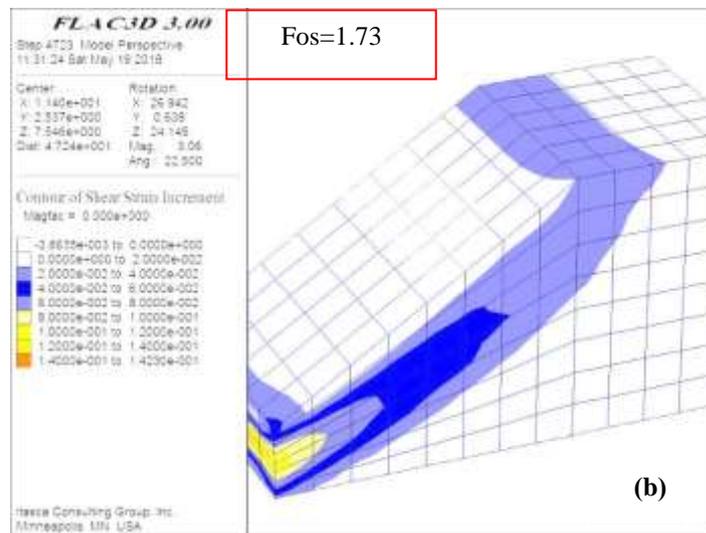
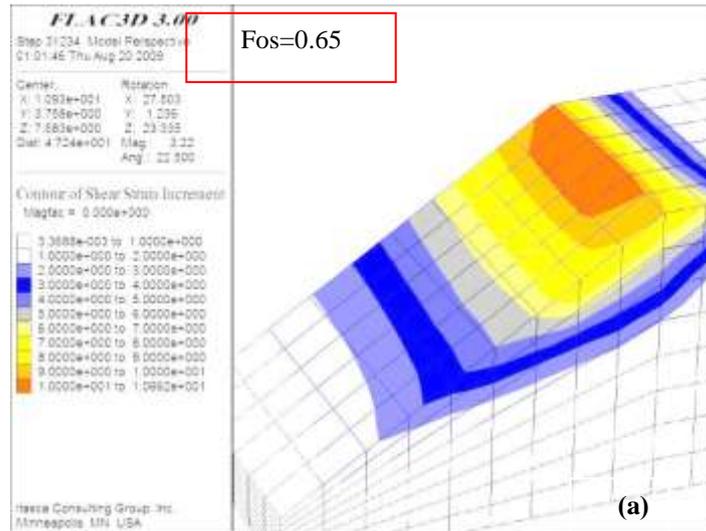
المنحدر المدروس مكون من تربة رملية بالخصائص الموضحة بالجدول (2)، ارتفاعه الكلي (H=10m) وميله $3H:2V$ (33.69°)، مدعم بصف من الأوتاد الشاقولية برأس حر وقطر (D=0.5m)، ومحمل على سطحه كأساس شريطي عرضه B=1m، أبعاد النموذج موضحة بالشكل (4).

الجدول (2) يبين خصائص تربة المنحدر والأوتاد للنمذجة العددية

Parameter	Dense Sand	Footing	Piles
Material model	Hardening soil model	Linear	Linear
Young's modulus ,E (Kpa)	45000	$2 \cdot 10^7$	$2 \cdot 10^7$
Poisson's ratio, ν	0.3	0.2	0.2
Cohesion ,C(Kpa)	0.00	.....	.....
Friction angle, ϕ (°)	37	.....	.....
Dilatancy angle, ψ (°)	7	.....	.....
Unit weight, γ (kn/m^3)	18.94	25	25
Diameter of pile,D (m)	.....	.....	0.5



الشكل (4) أبعاد النموذج العددي لمنحدر مدعم بالأوتاد ومحمل بأساس على سطحه



الشكل (5) سطوح انزلاق المنحدر المحمل بحمولة 100Kpa: (5a) قبل استخدام الأوتاد، (5b) بعد التدعيم بالأوتاد

قمنا بحساب معامل أمان المنحدر باستخدام برنامج $FLAC^{3D}$ قبل استخدام الأوتاد وفي حالة المنحدر محمل بحمولة $(q=100KPa)$ للتأكد من حالة التوازن فكانت قيمة معامل الأمان $(Fos=0.65 < 1.2)$ أي المنحدر غير مستقر، و يعرف عامل الأمان للمنحدرات بأنه النسبة بين مقاومة القص الفعلية إلى مقاومة القص الدنيا المطلوبة لمنع الانهيار، كما تم حساب معامل الأمان بعد إضافة صف من الأوتاد للمنحدر المحمل بالحمولة نفسها $(q=100kpa)$ [بعده عن قمة المنحدر $(X=1m)$ ، وبطول للأوتاد يساوي ارتفاع المنحدر $(L=H=3m)$ ، وتباعدات بين الأوتاد $(I(S=2D=1m))$ باستخدام برنامج $FLAC^{3D}$ ، فكانت قيمة معامل الأمان هي $(Fos=1.73)$ أي أن الأوتاد أمنت زيادة في عامل الأمان وبالتالي زيادة في استقرار المنحدر. يبين الشكل (5) خطوط كونتور تزايد تشوه القص المعبرة عن سطوح الانزلاق .

-1 دراسة التباعد بين الأوتاد:

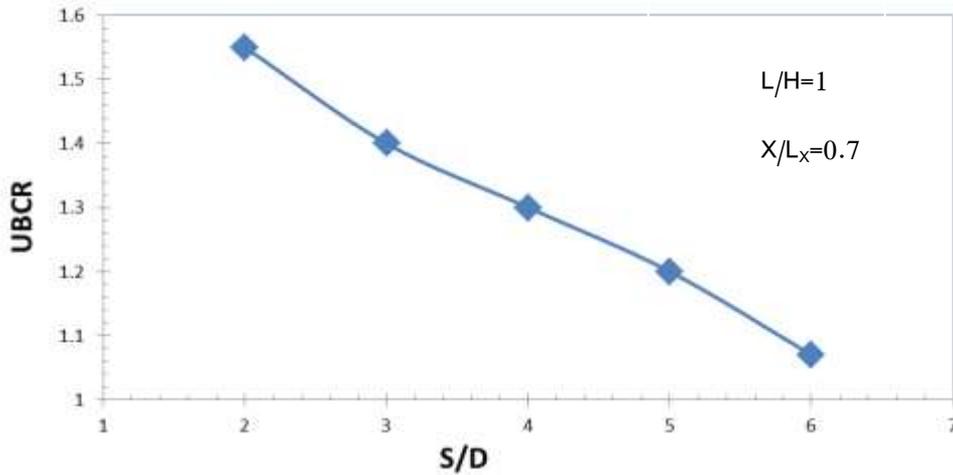
تم أخذ أوتاد بعدة تباعدات ($S=1, 1.5, 2, 2.5, 3m$) ، طول الأوتاد ثابت ($L=3m$) ، وقطر الأوتاد ($D=0.5m$) وبعد صف الأوتاد عن قمة المنحدر ($X=0.7L_x=3.5m$) .

في حالة المنحدرات المحملة على سطحها كثيراً ما يعبر عن عامل استقرار المنحدر بالنسبة UBCR و التي تمثل النسبة بين قدرة التحمل الحديدية مع الأوتاد q_{ur} و قدرة التحمل الحديدية قبل التدعيم بالأوتاد ($UBCR=q_r/q_{ur}$ where) q_r and q_{ur} are the ultimate bearing capacity values for the reinforced and the unreinforced (cases, respectively). لتحديد قدرة التحمل الحديدية تم اعتماد الحمولة الموافقة لنسبة هبوط مقدارها 10% عرض الأساس B ($q_{ur}=120kpa$ من التحليل العددي للنموذج).

يوضح الجدول (3) قيم قدرة التحمل الحديدية للمنحدر المدعم بالأوتاد بالإضافة إلى قيم معامل استقرار المنحدر المحمل وذلك من أجل قيم مختلفة للتباعد بين الأوتاد في الصف الواحد بالنسبة لقطر الوتد، كما يبين الشكل (6) تأثير التباعد بين الأوتاد على أمان المنحدر ومن الملاحظ زيادة هذه النسبة أي زيادة استقرار المنحدر بنقصان التباعد بين الأوتاد وبشكل خاص حتى قيمة $S=6D$.

الجدول (3) يبين معامل استقرار المنحدر المحمل بحمولة الأساس والمدعم بالأوتاد من أجل قيم مختلفة للتباعد S بالنسبة للقطر D

	S/D				
	2	3	4	5	6
$q_r(kpa)$	186	168	156	144	132
UBCR	1.55	1.4	1.3	1.2	1.1



الشكل (6) تأثير التباعد بين الأوتاد S على المنحدر لحالة $L=H, X=0.7L_x$

-2 تأثير طول الأوتاد (L):

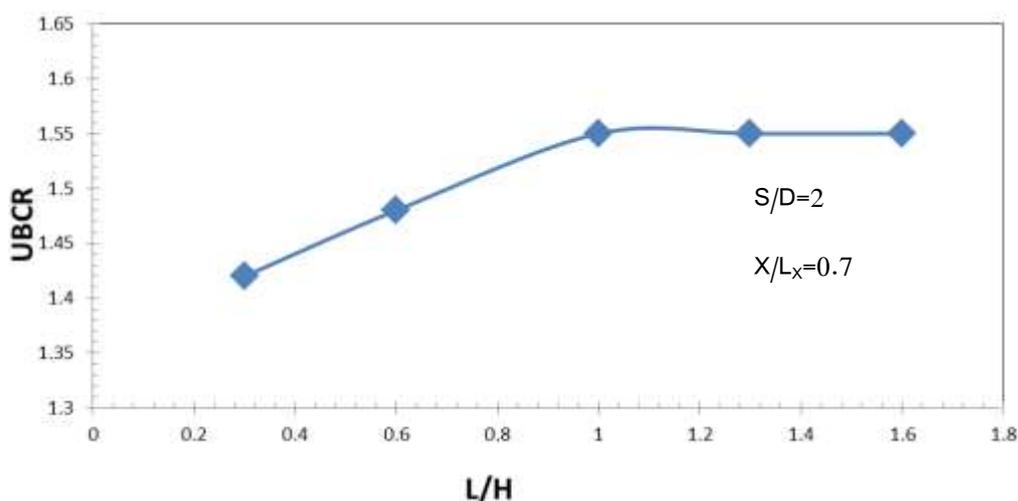
تم أخذ أوتاد بعدة أطوال ($L=1, 2, 3, 4, 5, 6m$) ، تباعد الأوتاد ثابت ($S=2D$) ، وقطر الأوتاد ($D=0.5m$) بحيث يقع صف الأوتاد أقرب إلى قمة المنحدر ($X=0.7L_x=3.5m$) ، يوضح الجدول (4) قيم قدرة التحمل الحديدية للمنحدر المدعم بالأوتاد بالإضافة إلى قيم معامل استقرار المنحدر المحمل وذلك من أجل قيم مختلفة لطول الأوتاد

بالنسبة لارتفاع المنحدر. يبين الشكل (7) تأثير طول الأوتاد على عامل استقرار المنحدر المحمل، من الملاحظ زيادة عامل الاستقرار بزيادة طول الوتد، مع زيادة الطول المظمو للوتد بالتربة ينتج زيادة في مقاومة الحركة الجانبية للتربة الواقعة بين الأساس والوتد وبالتالي زيادة في استقرار المنحدر .

تزداد قدرة التحمل بزيادة طول الأوتاد حتى الوصول إلى قيمة حدية $L=H$ حيث H ارتفاع المنحدر، ولكن بعد هذا الحد نلاحظ ثبات قيمة عامل الأمان مع زيادة طول الأوتاد وهذا ما يوافق نتيجة (Kourkoulis,2011) لحالة المنحدرات الرملية.

الجدول (4) يبين معامل استقرار المنحدر المحمل بحمولة الأساس والمدعم بالأوتاد من أجل قيم مختلفة لطول الأوتاد L بالنسبة لارتفاع المنحدر H

	L/H				
	0.3	0.6	1	1.3	1.6
q_r (kpa)	170	178	186	186	186
UBCR	1.42	1.48	1.55	1.55	1.55



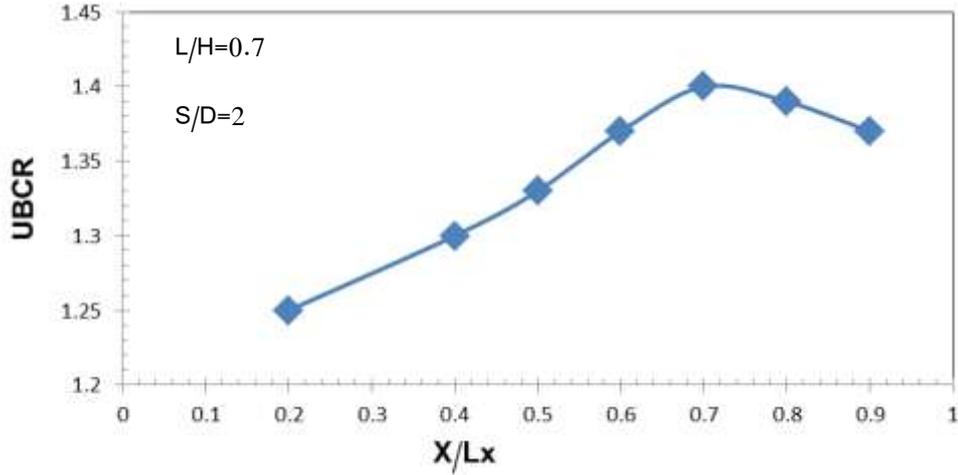
الشكل (7) تأثير طول الأوتاد L على المنحدر لحالة $S=2D, X=0.7L_x$

3- تأثير بعد صف الأوتاد عن قمة المنحدر (X):

تم أخذ عدة مواقع لصف الأوتاد وذلك لدراسة البعد الأمثل عن قمة المنحدر عند تنفيذ الأوتاد الداعمة للاستقرار (0.2, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7m) حيث L_x عرض المنحدر أي المسافة الأفقية بين قدم المنحدر وقمة المنحدر، تباعد الأوتاد ثابت ($S=2D$)، وقطر الأوتاد ($D=0.5m$) وطول الأوتاد ثابت ($L=2m$)، يوضح الجدول (5) قيم قدرة التحمل الحدية للمنحدر المدعم بالأوتاد بالإضافة إلى قيم معامل استقرار المنحدر المحمل وذلك من أجل قيم مختلفة لموقع صف الأوتاد بالنسبة لعرض المنحدر. يبين الشكل (8) تأثير بعد صف الأوتاد عن قمة المنحدر على استقرار المنحدر، من الملاحظ زيادة الاستقرار بزيادة قرب الأوتاد من القمة حيث وجود حمولة الأساس، وأعظم قيمة لمعامل الأمان عند النسبة $X=0.7L_x$ وهذه النتيجة هي نفسها التي توصلت لها طرق التوازن الحدي (Bishop Method).

الجدول (5) يبين معامل استقرار المنحدر المحمل بحمولة الأساس والمدعم بالأوتاد من أجل قيم مختلفة لبعدها عن قمة المنحدر X بالنسبة لعرض المنحدر L_x

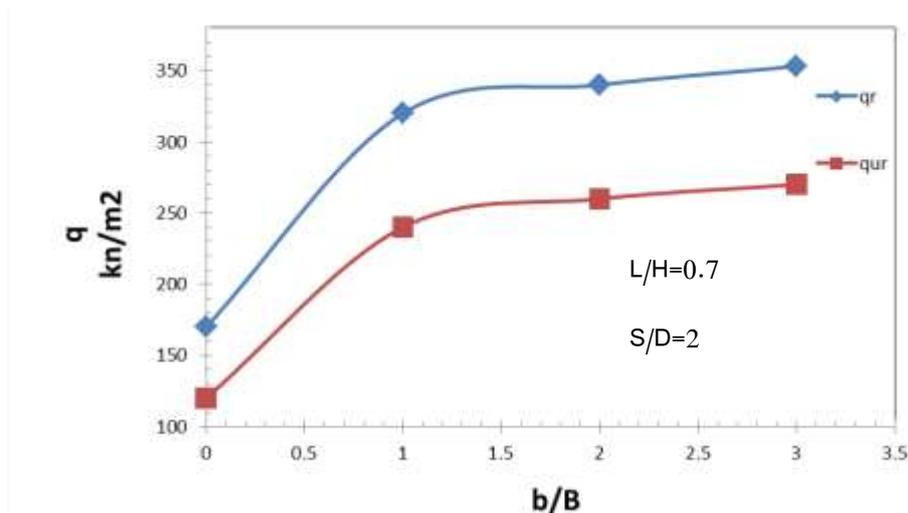
	X/L_x						
	0.2	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
q_r (kpa)	150	156	160	164	168	167	164
UBCR	1.25	1.3	1.33	1.37	1.4	1.39	1.37



الشكل (8) تأثير بعد صف الأوتاد عن قمة المنحدر X على المنحدر لحالة $L=0.7H, S=2D$

4- تأثير بعد طرف الأساس الشريطي عن قمة المنحدر (b):

تم أخذ عدة مواقع للأساس الشريطي عن طرف المنحدر وذلك لبيان تأثير المسافة بين الأساس وقمة المنحدر على الاستقرار (b/B=0,1,2,3m) حيث عرض الأساس الشريطي (B=1m)، تباعد الأوتاد ثابت (S=2D)، وقطر الأوتاد (D=0.5m) وطول الأوتاد ثابت (L=2m). يبين الشكل (9) تأثير البعد بين طرف الأساس الشريطي وقمة المنحدر على استقرار المنحدر، يوضح الشكل فعالية الأوتاد في زيادة قدرة التحمل الحدية مع زيادة بعد الحمولة عن طرف المنحدر حيث ازدادت قدرة التحمل الحدية q_r من 170KPa حتى 320KPa عند ابتعاد الحمولة عن طرف الأساس إلى مسافة تساوي عرض الأساس (b=B)، كما نلاحظ ثبات قدرة التحمل الحدية عند زيادة بعد الأساس عن طرف المنحدر لمسافة تزيد عن 3B.



الشكل (9) تأثير بعد طرف الأساس الشريطي عن قمة المنحدر b على المنحدر لحالة $L=0.7H, S=2D$

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

يمكن تلخيص أهم النتائج التي توصلت لها الدراسة:

- 1- يمكن حساب معامل أمان المنحدر باستخدام برنامج $FLAC^{3D}$ مباشرة دون الحاجة إلى اختيار سطح الانزلاق الأخطر والقيام بعدة فرضيات كما في الطرق التقليدية.
- 2- للتباعد بين الأوتاد التأثير الكبير على أمان المنحدر، حيث ينخفض معامل الاستقرار بزيادة التباعد بين الأوتاد حتى الوصول إلى قيمة $S/D=6$ حيث D قطر الوتد.
- 3- يزداد استقرار المنحدر بزيادة طول الأوتاد حتى قيمة حدية بعدها يثبت عامل الأمان بالرغم من زيادة طول الوتد، (هذه القيمة تكون في حالة طول الوتد يساوي ارتفاع المنحدر "المنحدرات الرملية").
- 4- تختلف فعالية الأوتاد في تأمين استقرار المنحدرات وتوازنها وذلك بحسب موقعها بالنسبة لقمة المنحدر، حيث وجد التحليل العددي أن النسبة $X/L_x=0.7$ تعطي القيمة الأعظمية لمعامل الأمان.
- 5- أظهرت الدراسة فعالية الأوتاد في زيادة قدرة التحمل الحدية مع زيادة بعد الحمولة عن طرف المنحدر، كما نلاحظ ثبات قدرة التحمل الحدية عند زيادة بعد الأساس عن طرف المنحدر لمسافة تزيد عن $3B$.

التوصيات:

- 1- تم إجراء البحث على المنحدرات المكونة من تربة رملية ويوصى بإجراء مزيد من الدراسات على أنواع أخرى من التربة.
- 2- من أجل المنحدرات الرملية المحملة على سطحها بحمولة أساس شريطي يوصى باستخدام أوتاد بطول يساوي ارتفاع المنحدر، وبتباعدات تساوي أربعة أضعاف قطر الوتد حيث تبين أن هذه النسبة تؤمن زيادة في الاستقرار، وأن يكون صف الأوتاد على مسافة تساوي 0.7 من عرض المنحدر حيث أنه الموقع المثالي لتأمين المنحدر.

المراجع:

1. Abdelaziz.A , Hafez.D , Hussien.A , *The effect of pile parameters on the factor of safety of piled –slopes using 3D numerical analysis.J* ,HBRC Journal.(2015)
2. Ashour.M, Ardalan.H, *Analysis of piled stabilized slopes based on soil-pile interaction*, Journal of Computer and Geotechnics,39 (2012);85-97.
3. Cheng Y.M ,Wei WB, *Strength reduction analysis for slope reinforced with one row of piles*, Computer and Geotechnics 36 (2009); 1176–1185.
4. Jeong. S, Kim. B, Won. J, Lee. J, *Uncoupled analysis of stabilizing piles in weathered slopes'*. Computers and Geotechnics, 30(8) (2003): 671-682.
5. Ito.T , Matsui.T , Hong W.P, *Design method for stabilizing piles against landslide one row of piles*. Soils Found (1981). 21 (1) 21–37.
6. Kourkoulis, R., Gelagoti, F., Anastasopoulos, I., and Gazetas, G. ,*Slopes stabilizing piles and pile –Groups: Parametric Study and Design Insights*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 137, No. 7.(2011)
7. Rao.k, Nasr.A.M, *Experimental and Theoretical Studies of Vertical Piles Reinforced Sand Slopes Loaded with Strip Footing*. Geotechnical Testing;vol.33,no.5 (2010)
8. Won.J ,You.k, Jeong.S ,kim.S, *Coupled effects in stability analysis of pile-slope systems*. Computer and Geotichnics32 (2005);304-1185 .