

## Studying the Stability of an Embankment over Clay Soil Supported by Stone Columns

Dr. Toufik Fayad \*

Ali Mahmood \*\*

(Received 25 / 10 / 2022. Accepted 22 / 1 / 2023)

### □ ABSTRACT □

Most of the numerical studies on stone columns are based on the unit cell concept. However, the impact of interactions between adjacent columns and between the columns and the surrounding soil has not been investigated thoroughly. In this study, the finite element software, PLAXIS-2D-V8.2, was used to simulate a stone column as a plane strain model. The key factors that were investigated included the diameter and c/c spacing of the stone columns, friction angle of the stone column material and stone column length. The settlement at ground surface and the settlement improvement factor were the base points of this parametric study since they are essential to the design of stone columns. The main findings of this study were that in the plane strain model, It represents the highest possible value of settlement on Earth 0.205m. the settlement improvement factor ranged between 1.45 and 3.4 at the point A and between 2.54 and 17.2 at the point B.

**Keywords:** Stone columns, plane strain model, settlement, embankment , PLAXIS-2D

---

\* Professor, Department of Geotechnical Engineering, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria. drtoufikf@gmail.com

\*\* Postgraduate Student (Master), Department of Geotechnical Engineering, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria. ali1993mahmood1993@gmail.com

## دراسة استقرار ردمية فوق تربة غضارية مدعمة بالأعمدة الحجرية

د. توفيق فياض\*

علي محمود\*\*

(تاريخ الإيداع 25 / 10 / 2022. قُبِلَ للنشر في 22 / 1 / 2023)

### □ ملخص □

تستند معظم الدراسات المرجعية المتعلقة بهذا البحث بدراسة الأعمدة الحجرية باستخدام الطرائق العددية إلى مفهوم the unit cell. ومع ذلك، لم يتم التحقيق بدقة في تأثير التفاعلات بين الأعمدة المجاورة وبين الأعمدة والتربة المحيطة. في هذه الدراسة، تم استخدام طريقة العناصر المنتهية في برنامج PLAXIS-2D-V8.2، لمحاكاة مجموعة من الأعمدة حجرية بنموذج التشوهات المستوية. تضمنت العوامل الرئيسية التي تم دراستها قطر العمود الحجري والتباعد بين الأعمدة الحجرية وزاوية الاحتكاك لمادة العمود الحجري وطول العمود الحجري. كان تركيز هذه الدراسة البارامترية على الهبوط الحاصل على سطح الأرض وعامل أمان الهبوط، حيث إنها ضرورية لتصميم الأعمدة الحجرية. فكانت النتائج الرئيسية لهذه الدراسة هي أنه في نموذج التشوهات المستوية كان أكبر قيمة للهبوط الحاصل على سطح الأرض 0.205m، تراوح عامل أمان الهبوط بين 1.45 و 3.4 عند النقطة A وبين 2.54 و 17.2 عند النقطة B.

**الكلمات المفتاحية:** الأعمدة الحجرية ، نموذج التشوهات المستوية ، الهبوط، ردمية ، برنامج PLAXIS-2D

\* أستاذ -قسم الهندسة الجيوتكنيكية - كلية الهندسة المدنية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية drtoufikf@gmail.com

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

ali1993mahmood1993@gmail.com

**مقدمة:**

يتناول هذا البحث الردميات المقامة على الغضار التي تتعرض لعمليات نزوح كبيرة عمودياً وأفقياً. وتم تطبيق استخدام الأعمدة الحجرية كطريقة لتحسين التربة الناعمة تحت ردميات الطرق أو السكك الحديدية ، وتم تطوير الطريقة في ألمانيا منذ حوالي أكثر من 60 عاماً [1]. وتحمل الأعمدة الحجرية جزءاً كبيراً من الحمولة المطبقة خاصة أثناء المراحل الأولية من البناء. تلعب الأعمدة الحجرية دوراً هاماً في مجال تحسين منطقة محددة من التربة. حيث أنها تعتبر الأنسب لتدعيم المواقع التي تحتوي على تربة غضارية طرية. تستخدم الأعمدة الحجرية لتحسين التربة تحت الردميات أو الابنية. وبمقاومة أعلى وصلابة ونفاذية أعلى من التربة الطبيعية الناعمة. لذلك، فإنها تعمل على تحسين قدرة التحمل واستقرار الردميات والمنحدرات الطبيعية، ونقل من الهبوطات. إلى جانب ذلك، يقوم تركيب الأعمدة بتعديل خصائص التربة الطبيعية الناعمة المحيطة [2]. تحمل الأعمدة الحجرية جزءاً كبيراً من الحمل المطبق خاصة خلال المراحل الأولية من البناء وتعمل الأعمدة الحجرية أيضاً كمصارف لأنها ذات نفاذية عالية وتزيد من معدل تماسك التربة الغضارية وبالتالي تزيد من معدل مقاومة القص للتربة (3). يعد الهبوط وقدرة تحمل التربة المدعمة بالأعمدة الحجرية تحدياً مهماً في التصميم لمهندسي الهندسة الجيوتكنيكية وتم نشر العديد من المقالات في الماضي على العمود الحجري كأسلوب تقوية للتربة وطور العديد من الباحثين حلولاً نظرية لتقدير قدرة التحمل واستقرار التربة المقواة بواسطة أعمدة حجرية (4). إن دراسة تأثير الأبعاد الهندسية وخواص المواد المستخدمة في الأعمدة الحجرية المدعمة للتربة الغضارية تحت ردمية يتطلب إجراء عدد كبير من التجارب المخبرية ، ونظراً لصعوبة إجراء هذه التجارب ، وللجهد والوقت الكبيرين المطلوبين ، استخدمت طرق التحليل العددي ومنها طريقة العناصر المنتهية في الحياة العملية وفي الأبحاث بشكل فعال وأعطت نتائج مقبولة مقارنة بالقياسات الحقلية والمخبرية ، وخصوصاً مع التطور السريع لطرق النمذجة والبرمجيات المستخدمة لذلك تم في هذا البحث استخدام طريقة العناصر المنتهية FEM برنامج Plaxis 2d. قامت Maryam وآخرون. [5] بدراسة ردمية بارتفاع 10.5m مقامة على تربة غضارية مدعمة بأعمدة حجرية بطول 8m انخفض عامل أمان الهبوط بنسبة 25.9% عندما تم زيادة S/d من 2m الى 3.4m وارتفع بنسبة 37.1% عندما تم زيادة d/S من 0.4 الى 0.6 وارتفع بنسبة 42% عندما تم زيادة زاوية احتكاك مواد العمود الحجري من 30° الى 45°. قامت Maryam وآخرون. [6] لنفس المشروع بدراسة الهبوط على سطح الأرض فكانت أكبر قيمة للهبوط 18.5cm. قامت أيضاً Maryam وآخرون. [7] لنفس المشروع بدراسة التشوه الحاصل للأعمدة الحجرية فتبين أن العمود الوسطي يتشوه منتفخاً في مكانه، في حين أن العمود الموجود على الطرف يتشوه مبتعداً عن الأعمدة المجاورة وأن الانتفاخ لا يحدث على طول عمق العمود وهذا ما أكد عليه GANDHI وAMBILY [8]. ومع ازدياد الضغط الحاصل مع العمق حدث انتفاخ في الجزء العلوي من العمود الحجري كما ذكر MIURA وMADHAV [9]. قام Shaker [10] بدراسة تدعيم تربة غضارية مقام عليها ردمية لسكة حديد ارتفاع الردمية 2m وارتفاع العمود 9.5m فتبين معه أن الهبوط ينخفض مع زيادة زاوية الاحتكاك العمود الحجري وأن أعلى قيمة للهبوط كانت عندما يكون التباعد بين الأعمدة 4m وعندما تكون زاوية احتكاك العمود الحجري 27.5m. قام Norinah وآخرون [11] بدراسة ردمية ارتفاعها 2m مقامة على تربة غير متجانسة ارتفاعها 9.5m انخفض الهبوط بنسبة 43.5% عندما تم تقليل نسبة التباعد من 3.125 إلى 1.875 وانخفض بنسبة 49% بزيادة زاوية احتكاك العمود الحجري من 35° الى 45°. قام Mohammed وآخرون [12] بدراسة ردمية ممر مشاة ارتفاعها 5m وعرض قمة الردمية 10m وقطر العمود 1m

ويتباعد 2m ينخفض الهبوط بنسبة 55% عند زيادة طول العمود من 4m الى 14m وعندما يكون طول العمود 14m يزداد الهبوط بنسبة 24% عند زيادة التباعد من 2m الى 3m.

### أهمية البحث وأهدافه:

تستخدم الاعمدة الحجرية لتحسين أساس الردميات أو الهياكل في التربة. وبمقاومة أعلى وصلابة ونفاذية أعلى من التربة الطبيعية الناعمة. لذلك، فإنها تعمل على تحسين قدرة التحمل واستقرار الردميات والمنحدرات الطبيعية، ونقل من الهبوطات. إلى جانب ذلك، يقوم تركيب الأعمدة بتعديل خصائص التربة الطبيعية الناعمة المحيطة. يهدف هذا البحث إلى دراسة استقرار ردمية مقامة على تربة غضارية مدعمة بالاعمدة الحجرية باستخدام برنامج (Plaxis 2D)، لإجراء دراسة بارامترية لأهم البارامترات المؤثرة الموجودة بالجدول (3).

### النمذجة بطريقة العناصر المنتهية FEM :

إن دراسة تأثير الأبعاد الهندسية وخواص المواد المستخدمة في الاعمدة الحجرية المدعمة للتربة الغضارية تحت ردمية يتطلب إجراء عدد كبير من التجارب المخبرية، ونظراً لصعوبة إجراء هذه التجارب، وللجهد والوقت الكبيرين المطلوبين، استخدمت طرق التحليل العددي ومنها طريقة العناصر المنتهية في الحياة العملية وفي الأبحاث بشكل فعال وأعطت نتائج مقبولة مقارنة بالقياسات الحقلية والمخبرية، وخصوصاً مع التطور السريع لطرق النمذجة والبرمجيات المستخدمة لذلك تم في هذا البحث استخدام طريقة العناصر المنتهية FEM برنامج Plaxis 2d.

### البرنامج المستخدم Plaxis 2D :

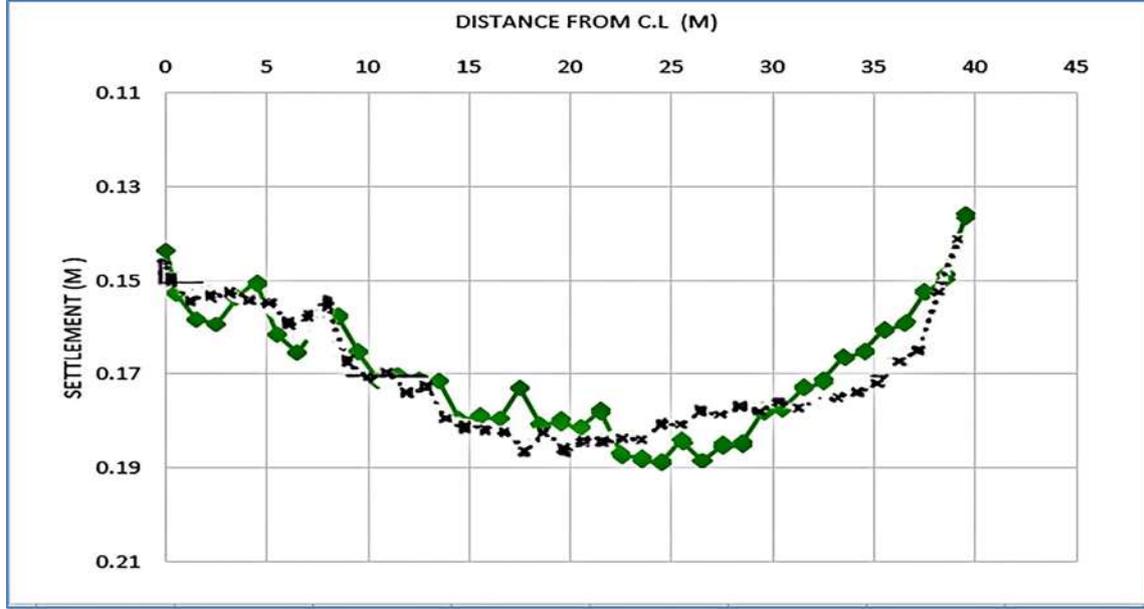
سيتم في هذه الدراسة استخدام برنامج Plaxis هو برنامج يستخدم طريقة العناصر المنتهية من أجل التحليل الثنائي الأبعاد (2D) للمنشآت والمسائل الهندسية الجيوتكنيكية، ويعطي إمكانية استخدام عدد كبير من قوانين المادة الأساسية والمتطورة لنمذجة السلوك الاجهادي - التشوهي الخطي واللاخطي للتربة.

### معايرة سلوك النموذج (model calibration)

تم اعداد نموذج رياضي لتربة غضارية مدعمة بالاعمدة الحجرية تحت ردمية بنفس الأبعاد الهندسية والشروط الطرفية ومواصفات المواد المستخدمة في النموذج التي قام بها

Maryam Gaber, Anuar Kasa, Norinah Abdul-Rahman and Jamal Alsharef

الذي تم فيه دراسة الحالة الخاصة بالطريق السريع (LPT2) Lebuhraya Pantai Timur Phase2 في ماليزيا. لمعايرة النموذج ستقوم بحساب هبوط قاعدة الردمية عن سطح الارض بعد تحميل المرحلة الأخيرة من الردمية موضح بالشكل (1)



الشكل (1) معايرة النموذج لهبوط قاعدة الردمية عن سطح الأرض

التحليل العددي باستخدام طريقة العناصر المنتهية (FEM) - برنامج Plaxis:  
النموذج المستخدم (FE - Model):

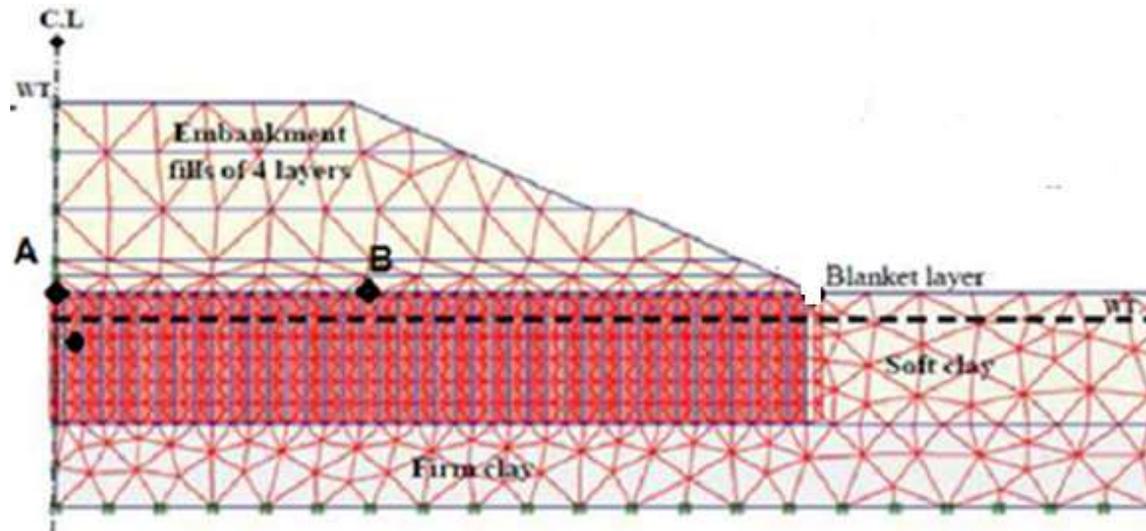
تم اعداد النموذج لتربة غضارية مدعمة بالأعمدة الحجرية تحت ردمية طريق ارتفاعها 10.5 m وعرض قمة الردمية 32 m باستخدام برنامج Plaxis 2D ولغرض تدعيم التربة، تم تثبيت أعمدة حجرية يبلغ قطرها 1 m مع تباعد يبلغ 2 m بين الأعمدة ويبلغ طولها 8 m مخترقة بالكامل واستقرت على طبقة ثابتة. تم استخدام شبكة عناصر منتهية (FE-Mesh) مكونة من عنصر مثلثي (15 عقدة). بسبب تناظر النموذج، تم محاكاة نصف المقطع العرضي فقط لتوفير وقت الحوسبة. تم تعيين مستوى المياه 1 m تحت السطح الارض. تم إغلاق الحدود الجانبية للنموذج، في حين افترض أن الحدود مصرفة على سطح الأرض وفي أسفل النموذج. وتم تطبيق حمولة مرورية موزعة بانتظام على كامل طول الردمية بمقدار 20 kPa. تم بناء الردمية على مراحل للسماح بالتبديد الجزئي لضغط الماء المسامي الزائد أثناء البناء. تم تصميم بناء الردمية على مرحلتين، حيث تم تلخيص مدة وارتفاع الردمية لكل مرحلة في الجدول (1). من أجل النظر في الأداء على المدى الطويل، تم تمديد النمذجة إلى 1000 يوم بعد نهاية البناء.

الجدول (1): مدة وارتفاع الردمية لكل مرحلة.

Stage	Fill height (m)	Time consumed (day)
First	0-1	4
	3	7
	-	42
Second	3.5	3.5
	3	3.5
	-	1000

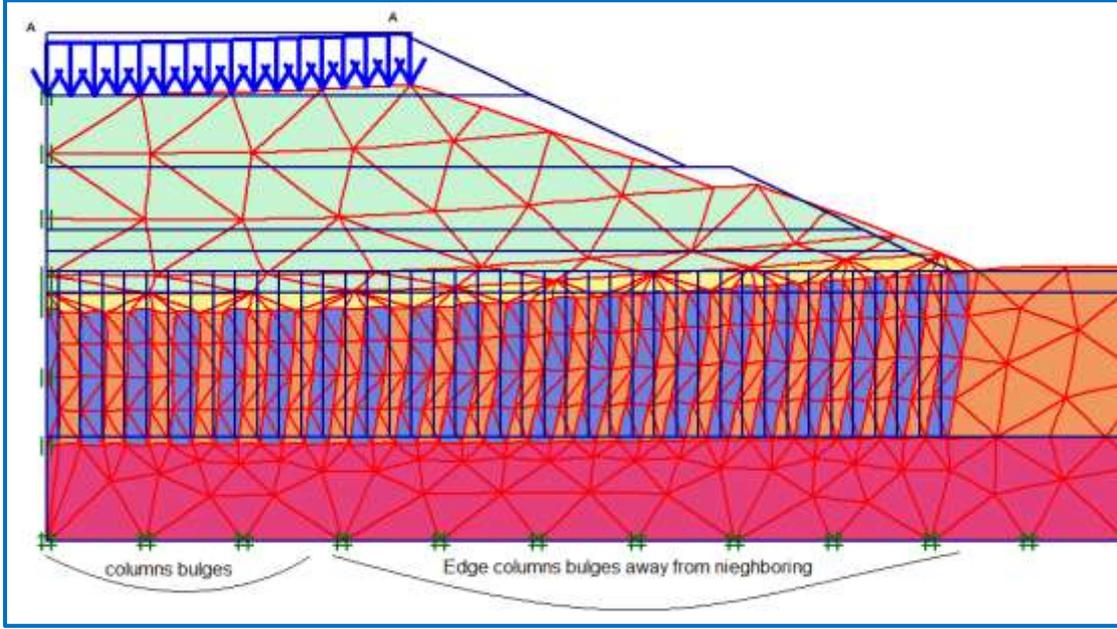
الجدول (2): خواص المواد المستخدمة.

Mohr-Coulomb		Blanket layer	Fill material	Firm clay	Soft clay	Stone column
Type		Drained	Drained	Undrained	Undrained	Drained
$\gamma_{\text{unsat}}$	[kN/m <sup>3</sup> ]	19	17	16	13	12
$\gamma_{\text{sat}}$	[kN/m <sup>3</sup> ]	22	18	17	14	22
$k_x$	[m/day]	1	1	$7.36 \times 10^{-5}$	$7.36 \times 10^{-5}$	1
$k_y$	[m/day]	1	1	$3.68 \times 10^{-5}$	$3.68 \times 10^{-5}$	1
$E_{\text{ref}}$	[kN/m <sup>2</sup> ]	$20 \times 10^3$	$20 \times 10^3$	$15 \times 10^3$	2000	$20 \times 10^3$
$\nu$	[-]	0.333	0.333	0.4	0.4	0.333
$c_{\text{ref}}$	[kN/m <sup>2</sup> ]	0.1	0.1	23	25	0.1
$\phi$	[°]	35	30	28	1	38
$\psi$	[°]	0	0	0	0	8
$R_{\text{inter}}$	[-]	-	-	-	1	1



الشكل (2): شبكة العناصر المنتهية (FE-Mesh) المستخدمة للنموذج المدروس.

يبين الشكل (3) شكل التشوه في النموذج حيث أن ان تشوه العمود يعتمد على موقعه في المجموعة فيتشوه العمود الوسطي منتفخاً في مكانه، في حين أن العمود الموجود على الطرف يتشوه مبتعداً عن الأعمدة المجاورة.



الشكل (3): شكل التشوه في النموذج بعد مرحلة الحساب الأخيرة.

يبين الشكل (4) الهبوط على سطح الأرض بعد 1000 يوم بعد نهاية البناء حيث أظهر هبوطاً متغيراً بين قيمة صغرى 0.13 m وأعظمية 0.205 m .



الشكل (4): الهبوط على سطح الأرض مع تدعيم بالأعمدة الحجرية.

#### الدراسة البارامترية:

أجريت دراسة بارامترية لتقييم سلوك الأعمدة الحجرية من خلال مقارنة بين عدة قيم للبارمتر الواحد والتحقق في تأثير العديد من العوامل الرئيسية. تم إجراء سلسلة من التحليلات البارامترية لتقييم أداء النموذج، حيث تم تغيير قيم كل بارمتر بينما بقيت البارامترات الأخرى ثابتة، كما هو موضح في الجدول (3).

الجدول (3): البارامترات المستخدمة في هذا البحث.

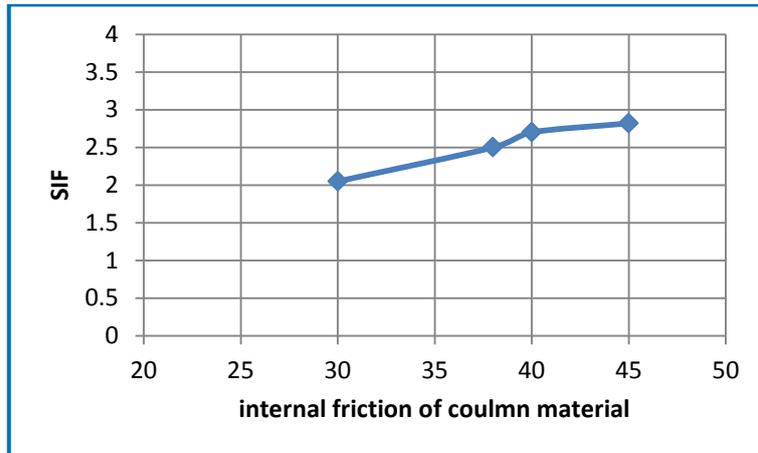
الجدول (3)		
Parameter	Unit	Value range
c/c spacing ratio (S/d)	[-]	2 - 2.5 - 3 - 3.5
Diameter ratio (d/S)	[-]	0.4 - 0.45 - 0.5 - 0.55 - 0.6
Internal friction angle ( $\phi$ )	[°]	30 - 38 - 40 - 45
Stone columns length (L)	[m]	6 - 7 - 8
Undrained cohesion of soft clay (C)	[kN/m <sup>2</sup> ]	15 - 20 - 25 - 30 - 35
Elastic modulus of stone column (E)	[kN/m <sup>2</sup> ]	20000-50000-80000

### النتائج والمناقشة:

#### 1- حساب عامل أمان الهبوط SIF عند النقطة المرجعية (A):

تم قياس الهبوط في هذه الدراسة في نهاية المرحلة الثانية من البناء من أجل النظر في الظروف على المدى الطويل في النقطة المرجعية (A) المبينة في الشكل (2). عامل أمان الهبوط SIF = الهبوط بدون تدعيم / الهبوط مع تدعيم

- زاوية احتكاك مواد العمود الحجري

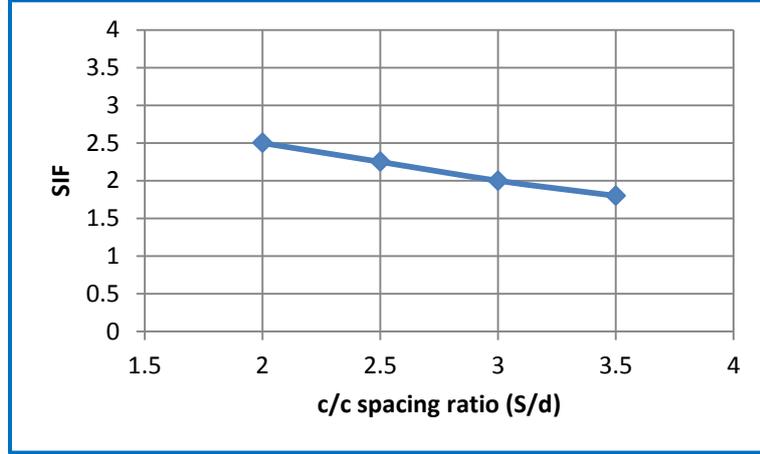


الشكل (5): تأثير زاوية احتكاك مواد العمود الحجري على عامل أمان الهبوط عند النقطة (A)

نلاحظ من الشكل أن هناك ارتفاع تدريجي في عامل أمان الهبوط SIF مع زيادة زاوية احتكاك مواد العمود الحجري. ارتفع SIF بنسبة 41 % عندما تم زيادة زاوية احتكاك مواد العمود الحجري من 30° إلى 45°.

#### • نسبة التباعد بين الأعمدة الحجرية إلى قطر العمود الحجري S/d:

تم تثبيت قطر العمود الحجري d=1 m والتباعد بين الأعمدة S يزداد من 2 m إلى 3.5 m

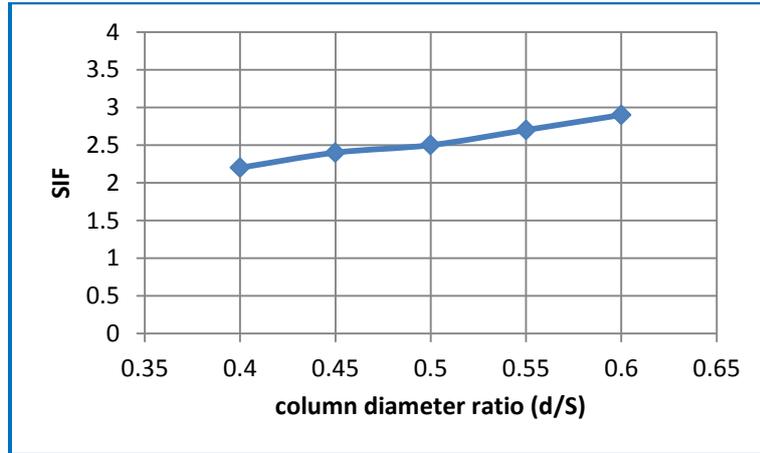


الشكل (6): تأثير S/d على عامل أمان الهبوط عند النقطة (A)

نلاحظ من الشكل أن هناك انخفاض تدريجي في عامل أمان الهبوط SIF مع زيادة نسبة التباعد (S/d). انخفض SIF بنسبة 28 % عندما تم زيادة نسب التباعد الى القطر S/d من 2 إلى 3.5 وذلك بسبب تخفيض نسبة استبدال التربة بالأعمدة الحجرية.

• نسبة قطر العمود الحجري الى التباعد بين الاعمدة الحجرية d/S:

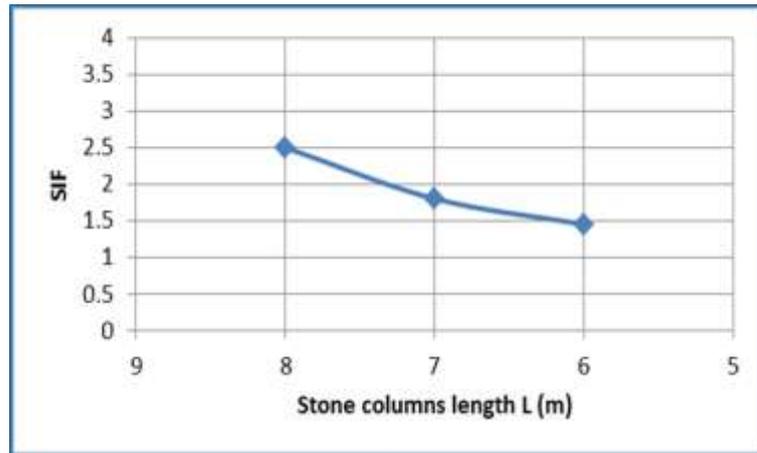
تم تثبيت التباعد بين الأعمدة الحجرية S=2 m وقطر العمود الحجري d يزداد من 0.8 m الى 1.2 m



الشكل (7): تأثير d/S على عامل أمان الهبوط عند النقطة (A)

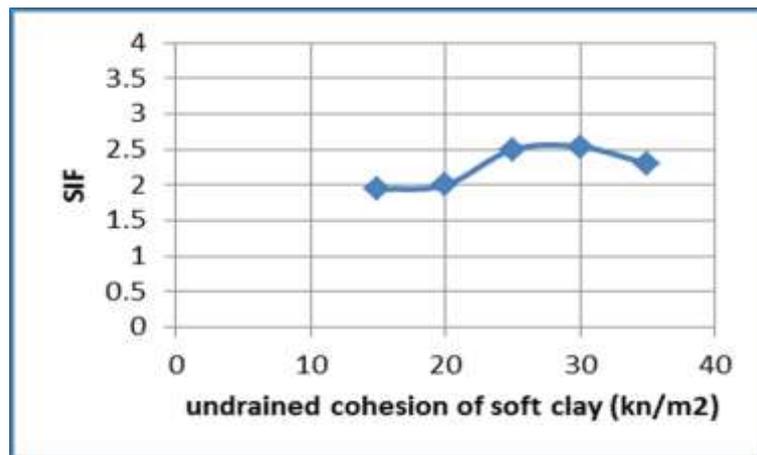
نلاحظ من الشكل أن هناك ارتفاع تدريجي في عامل أمان الهبوط SIF مع زيادة قطر العمود الحجري. ارتفع SIF بنسبة 32 % عندما تم زيادة d/S من 0.4 الى 0.6 وذلك بسبب زيادة نسبة استبدال التربة بالأعمدة الحجرية والتي تعد أكثر صلابة ومقاومة من التربة المحيطة.

• طول العمود الحجري :



الشكل (8): تأثير طول العمود الحجري على عامل أمان الهبوط عند النقطة (A)

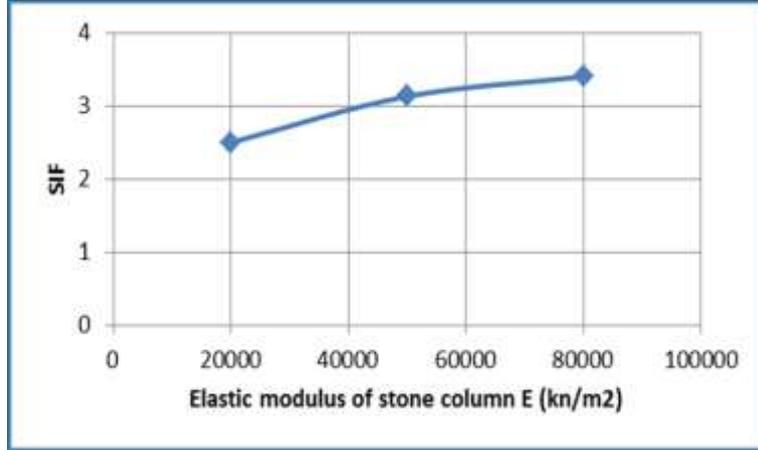
نلاحظ من الشكل أنه ينقص عامل الأمان SIF بنسبة 45% عند تخفيض طول العمود الحجري من 8m الى 6m. • تماسك التربة الغضارية :



الشكل (9): تأثير تماسك التربة الغضارية على عامل أمان الهبوط عند النقطة (A)

نلاحظ أن استخدام الأعمدة الحجرية للتربة ذات التماسك المنخفض غير المصروف كان له تأثير أكبر على الهبوط وزاد عامل الأمان بنسبة 25% عند زيادة التماسك من 15 الى 25  $\text{kn/m}^2$ . وعلاوة على ذلك، بالنسبة للتربة ذات التماسك الذي كان أكبر أو يساوي 25  $\text{kn/m}^2$ ، كان عامل أمان الهبوط SIF شبه ثابت لان تركيز الاجهادات على العمود أصبح اكبر.

- معامل مرونة الأعمدة الحجرية :



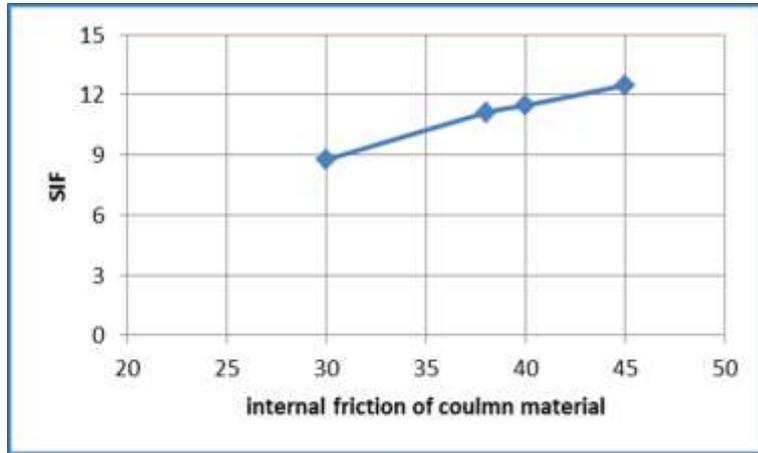
الشكل (10): تأثير معامل مرونة الأعمدة الحجرية على عامل أمان الهبوط عند النقطة (A)

يزداد عامل أمان الهبوط بشكل ملحوظ مع زيادة معامل مرونة الأعمدة الحجرية حيث يزداد بنسبة 36% عند زيادة E من 20000 الى 80000 kn/m<sup>2</sup> وبنسبة 8.5% عند زيادة E من 50000 الى 80000 kn/m<sup>2</sup>.

- حساب عامل أمان الهبوط SIF عند النقطة المرجعية (B):

تم قياس الهبوط في هذه الدراسة في نهاية المرحلة الثانية من البناء من أجل النظر في الظروف على المدى الطويل في النقطة المرجعية (B) المبينة في الشكل (2).

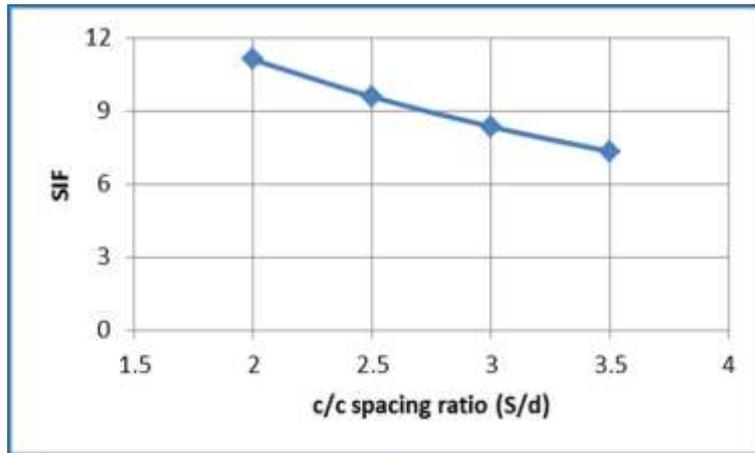
- زاوية احتكاك مواد العمود الحجري



الشكل (11): تأثير زاوية احتكاك مواد العمود الحجري على عامل أمان الهبوط عند النقطة (B)

نلاحظ من المخطط زيادة عامل أمان الهبوط بنسبة 42.3% عندما تم زيادة زاوية احتكاك مواد العمود الحجري من 30° الى 45°.

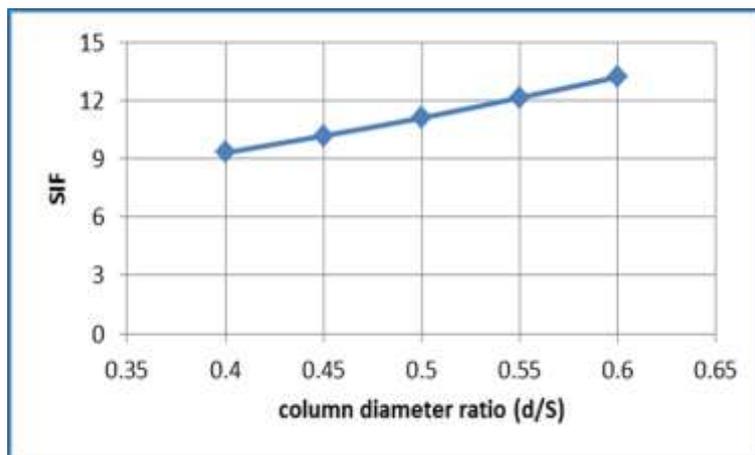
● نسبة التباعد بين الاعمدة الحجرية الى قطر العمود الحجري S/d:



الشكل (12): تأثير S/d على عامل أمان الهبوط عند النقطة (B)

نلاحظ من المخطط ينقص عامل أمان الهبوط بنسبة 34% عندما زادت S/d من 2 الى 3.5 وذلك بسبب تخفيض نسبة استبدال التربة بالأعمدة الحجرية.

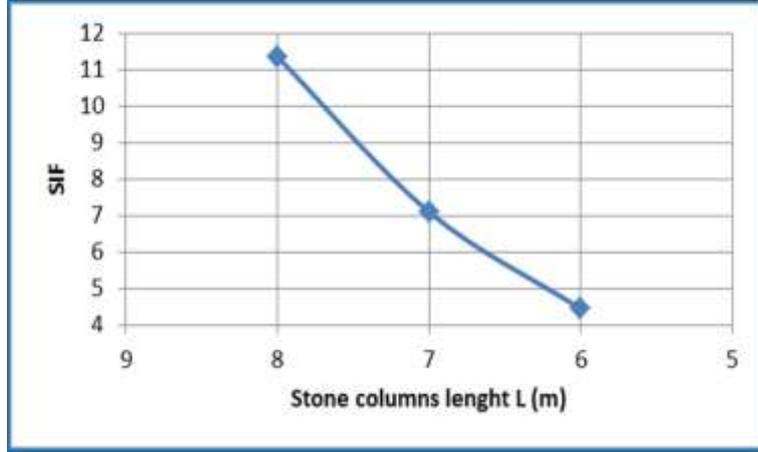
● نسبة قطر العمود الحجري الى التباعد بين الاعمدة الحجرية d/S:



الشكل (13): تأثير d/S على عامل أمان الهبوط عند النقطة (B)

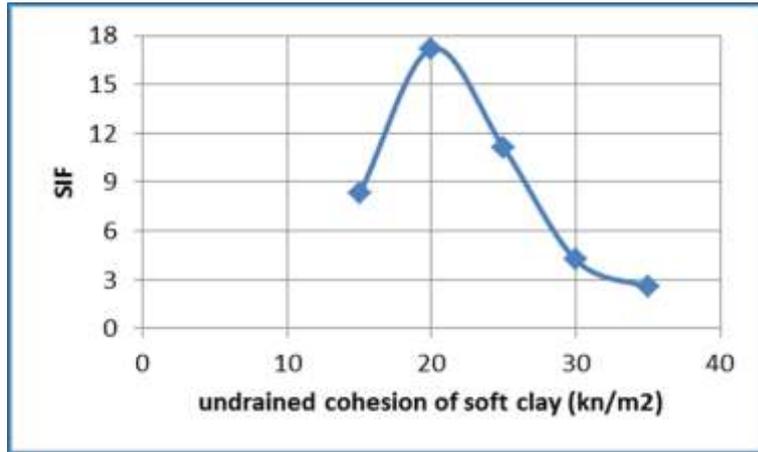
نلاحظ من المخطط زيادة عامل أمان الهبوط بنسبة 41.8% عندما زادت d/S من 0.4 الى 0.6 وذلك بسبب زيادة نسبة استبدال التربة بالأعمدة الحجرية والتي تعد أكثر صلابة ومقاومة من التربة المحيطة.

## • طول العمود الحجري:



الشكل (14): تأثير طول العمود الحجري على عامل أمان الهبوط عند النقطة (A)

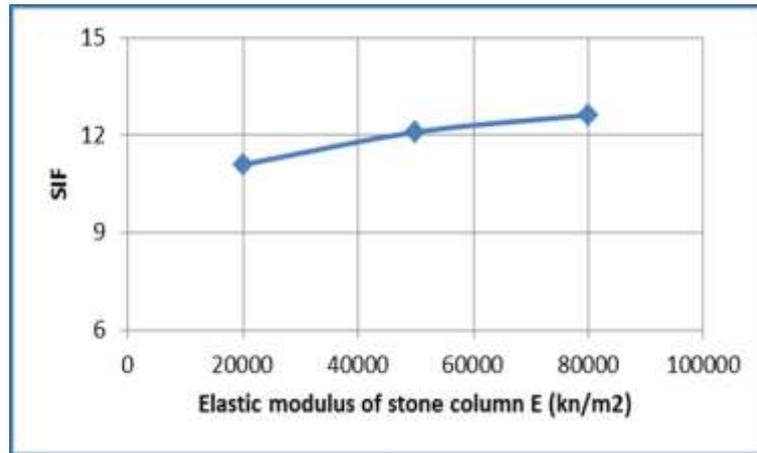
نلاحظ من الشكل أنه ينقص عامل الأمان SIF بنسبة 60.8% عندما تم تخفيض طول العمود الحجري من 8 m إلى 6 m. • تماسك التربة الغضارية :



الشكل (15): تأثير تماسك التربة الغضارية على عامل أمان الهبوط عند النقطة (B)

نلاحظ أنه عندما كان تماسك التربة الغضارية  $C=15 \text{ kN/m}^2$  كان الهبوط قبل التدعيم وبعد التدعيم كبير حيث زاد عامل أمان الهبوط عندما  $C=20 \text{ kN/m}^2$  بنسبة 108.54% وبعدها نقص عامل أمان الهبوط بسبب انخفاض الهبوط قبل التدعيم مع زيادة التماسك.

• معامل مرونة الأعمدة الحجرية :



الشكل (16): تأثير معامل مرونة الأعمدة الحجرية على عامل أمان الهبوط عند النقطة (B)

نلاحظ زيادة عامل أمان الهبوط بنسبة 14% عند زيادة معامل مرونة الأعمدة الحجرية من 20000 إلى 80000 kN/m<sup>2</sup>

**الاستنتاجات والتوصيات:**

قدمت المقالة التحقق من عامل أمان الهبوط SIF لحالة تدعيم التربة الغضارية تحت الردميات باستخدام الأعمدة الحجرية وتم التوصل الى الاستنتاجات التالية:

- عند زيادة قطر العمود الحجري حصلنا على زيادة في عامل أمان الهبوط بنسبة 32% عند النقطة A وبنسبة 41.8% عند النقطة B عند زيادة قطر العمود من 0.8 m الى 1.2 m ونستنتج أن القطر الأفضل هو 1m.
- الزيادة في زاوية احتكاك مواد العمود الحجري من 30° الى 45° حصلنا على زيادة في عامل أمان الهبوط بنسبة 41% عند النقطة A وبنسبة 42.3% عند النقطة B ويجب أن لا تنقص زاوية الاحتكاك عن 38°.
- الزيادة في التباعد بين الأعمدة الحجرية من 2 m الى 3.5 m أدت الى انخفاض عامل أمان الهبوط بنسبة 28% عند النقطة A وبنسبة 34% عند النقطة B وتبين لنا أنه لا يجوز زيادة التباعد عن 3m.
- نلاحظ أن عند تخفيض طول العمود الحجري من 8 m الى 6 m ينقص عامل الأمان SIF بنسبة 45% عند النقطة A وبنسبة 60.8% عند النقطة B وتبين لنا أنه لا يجوز أن ينقص طول العمود عن 8 m.
- نستنتج أن تماسك التربة الغضارية يجب أن لا يقل عن 20 kN/m<sup>2</sup> وزيادة تماسك التربة الغضارية أكثر من 25 Kn/m<sup>2</sup> كان له تأثير طفيف على الهبوط بعد التدعيم وكان لتغيير تماسك التربة تأثير أكبر على الهبوط قبل التدعيم من بعده وهذا ما يفسر انخفاض عامل الأمان عند النقطة B مع زيادة التماسك
- بزيادة معامل مرونة الأعمدة الحجرية من 20000 kN/m<sup>2</sup> الى 80000 kN/m<sup>2</sup> يزداد عامل أمان الهبوط عند النقطة A بنسبة 36% وعند النقطة B بنسبة 14% وزيادة معامل المرونة أكثر من 50000 kN/m<sup>2</sup> لم يكن له تأثير كبير على عامل أمان الهبوط.

**References:**

- [1]- MOHAMMED, Q, AI-ASSADY, F. *ANALYSIS OF EMBANKMENT SUPPORTED BY STONE COLUMNS ENCASED WITH GEOSYNTHETIC MATERIAL*. ResearchGate, 10/ 2015, 97-107.
- [2]- CASTRO, J, KAESTUNEN, M, SIVASITHAMPARAM, N, SAGASETA, C. *Numerical analyses of stone column installation in Bothkennar clay* . ResearchGate, 3/2013, 1-7.
- [3]- MOHAMEDZEIN, Y, AI-SHIBANI, I. *Performance of an embankment supported on soft soil reinforced by stone columns*. ICE Publishing journals, Volume 164 Issue GI4, 09/12/2010, 213-224.
- [4]- CHOORBASTI, A. J. ZAHMATKESH, A, NOORZAD, R. *Performance of Stone Columns in Soft Clay: Numerical Evaluation*. Geotechnical and Geological Engineering, 29, 5/2011, 675-684.
- [5]- GABER, M, KASA, A, ABDULI-RAHMAN, N, ALSHAREF, J. *Simulation of Stone Column Ground Improvement (Comparison between Axisymmetric and Plane Strain)*. American Journal of Engineering and Applied Sciences, 15-01-2018, 130-137.
- [6]- GABER, M, KASA, A, ABDULI-RAHMAN, N, ALSHAREF, J. *Simulation of Sequential Construction of Embankments on Reinforced Soft Clay Foundation*. Indian Geotechnical Journal, 6/2018,2224-2231.
- [7]- GABER, M, KASA, A, ABDULI-RAHMAN, N, ALSHAREF, J. *Comparison between unit cell and plane strain models of stone column ground improvement*. International Journal of Engineering & Technology, 7/2/2018, 263-269.
- [8]-AMBILY, A. P, GANDHI, S. R. *Behavior of Stone Columns Based on Experimental and FEM Analysis*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 133(4), 2007, 405-415.
- [9]-MADHAV, M. R, MIURA, N. *Soil improvement. Panel report on stone columns*, Proceedings of the 13th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, New Delhi, India, 1994, 163-164.
- [10]- MOHAMMED, S. M. *The Effect of Granular Material on Behaviour of Stone Columns in Soft Clay under Embankment*. Engineering and Technology Journal IRAQ, Vol.33,Part (A), 2015,2212-2219.
- [11]- GABER, M, KASA, A, ABDULI-RAHMAN, N. *IMPROVING THE STRENGTH OF NON-HOMOGENOUS SOILS USING THE STONE COLUMN TECHNIQUE*. Journal of GeoEngineering Taiwan, Vol. 12, NO. 4, 12/2017, 157-166.
- [12]- FATTAH, M. Y, AL-JAMAILY, N. S, SALMAN, F. A. *IMPROVEMENT OF THE BEHAVIOUR OF EMBANKMENT ON SOFT SOIL BY STONE COLUMNS*. ResearchGate, 1/2012, 677-683.
- [13]- CASTRO, J, KAESTUNEN, M. *Numerical simulations of stone column installation*. Canadian Science Publishing, Volume 47. Number 10, 10/2010, 1127-1138.
- [14]- ABUSHARAR, S, HAN, J. *Two-dimensional deep-seated slope stability analysis of embankments over stone column-improved soft clay*. Engineering Geology, Volume 120, Issues 1–4, 10/6/2011, 103-110.
- [15]- KAHYAOGLY, M. *Settlement Behavior of Reinforced Embankments Supported by Encased Columns*. International Journal of New Technology and Research (IJNTR), ISSN:2454-4116, Volume-3, Issue-4, 4/ 2017 , 22-25.
- [16]- ALKHORSHID, N. *Numerical Analysis of Soft Clay Reinforced with Stone Columns*. Eastern Mediterranean University, Gazimağusa, North Cyprus, 1/2012, 1-114.

- [17]- SEXTON, B, MCCABE, B. A. *A method of modelling stone column installation for use in conjunction with unit cell analyses*. ResearchGate, 3/2013, 1-7.
- [18]- KADHIM, S. T, FOUAD, Z. B. *Stability analysis of roadway embankments supported by stone columns with the presence of water table under short-term and long-term conditions*. EDP Sciences Journals, Volume 162, 2018, 1-7.