

دراسة سلوك جدران التربة المسلحة بالجيوجريد (SRW) بطريقة العناصر المنتهية ومقارنة مع الجدران البيتونية التقليدية

الدكتور مالك حسن*

الدكتور رامي أسطة**

خلود محمود حواط***

(تاريخ الإيداع 5 / 9 / 2013. قُبل للنشر في 22 / 10 / 2013)

▽ ملخص ▽

تزايد استخدام جدران التربة المثبتة ميكانيكياً (MSEW) بشكل كبير في العديد من دول العالم على مدى السنوات الـ 20 الماضية، حيث تعتبر جدران التربة المثبتة ميكانيكياً ذات كفاءة وقابلية للتنفيذ، واقتصادية من حيث التكلفة. ورغم انتشارها الواسع لا يزال هناك ضرورة لإجراء المزيد من الدراسات حول سلوك هذا النوع من الجدران من أجل الحصول على التصميم الأمثل لها وخصوصاً عند تغير الخواص الميكانيكية للمواد المستخدمة والأبعاد الهندسية للجدار. وسيتناول هذا البحث دراسة سلوك الجدران الاستنادية من التربة المسلحة بالجيوجريد باستخدام طريقة العناصر المنتهية (FEM) مع إجراء دراسة لأهم المتغيرات المؤثرة على التصميم (أبعاد الجدار، طول وتباعد وخواص الجيوجريد، خواص تربة الردم والحمولات السطحية خلف الجدار). إضافة إلى ذلك سيتم إجراء مقارنة بين ميزات جدران التربة المسلحة بالجيوجريد والجدران الاستنادية التقليدية البيتونية.

الكلمات المفتاحية : الجدران الاستنادية - جدران التربة المسلحة - الجيوجريد - طريقة العناصر المنتهية - برنامج .Plaxis

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

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

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

Finite Element Analysis on the Behavior of Geogrid Reinforced Earth Retaining Walls (MSE SRW) and Comparison with Traditional Retaining Walls

Dr. Malek Hasan*

Dr. Rami Ousta**

Kholod Hawatt***

(Received 5 / 9 / 2013. Accepted 22 / 10 / 2013)

▽ ABSTRACT ▽

Mechanically Stabilized Earth (MSE SRW) Wall has been increasingly used in many Countries, state and private projects over the last 20 years. MSE walls are reliable, constructible, and cost-effective. Although reinforced earth is widely used in different parts of the world, it is still necessary to make further studies on the behavior of the reinforced earth wall when the mechanical properties and geometry of its composite materials changes for optimum design of the wall.

In this paper the Finite-Element analysis is used to study the behavior of geogrid reinforced earth retaining walls and carries out parametric study on the effective parameters on the design, such as Wall Height and geometry, characteristics length and vertical spacing of geogrid, soil properties and surcharge. In addition, there is a comparison between the advantages of geogrid reinforced earth retaining walls (MSE SRW) vs. traditional concrete retaining walls will be made.

Keywords: Retaining Walls –MSE SRW – Geogrid- FEM- Plaxis

* Assistant Professor, Department of Geotechnical Engineering, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Latakia, Syria.

** Assistant Professor, Department of Geotechnical Engineering, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Latakia, Syria.

*** Postgraduate Student, Department of Geotechnical Engineering, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Latakia, Syria.

مقدمة:

إن التربة المسلحة ميكانيكياً (MSE) هي عبارة عن تقنية بناء تتألف من طبقات التربة مع عناصر التسليح لبناء الجدران الاستنادية والمنحدرات والأساسات ... الخ، وتعتمد بشكل أساسي على الاحتكاك المتولد بين التربة وعناصر التسليح المطبورة فيها بحيث تصبح التربة مع عناصر التسليح قادرة على تحمل إجهادات شد (Alzamora and Barrows, 2007).

أول استخدام للتربة المسلحة كان لبناء الجدران في الحضارات القديمة، مثل المعابد القديمة (ziggurats) في العراق وسور الصين العظيم. حيث تم تسليح المعبد العراقي (ziggurat) بواسطة حصيرة منسوجة من القصب وضعت أفقياً وبحبال مجدولة من نفس المادة مطبورة في طبقات من الرمل والحصى، في حين أن سور الصين العظيم سلح بواسطة أغصان أشجار طمرت في خليط من الطين والحصى. وحديثاً عرف مفهوم التربة المسلحة عام 1960 من قبل هنري فيدال في فرنسا. حيث كان التركيب يتألف من أشرطة تسليح معدنية مسطحة مطبورة في التربة. وفي عام 1970 تم استخدام شبكة معدنية كعناصر تسليح، لكن مشكلة تآكل معدن التسليح وظهور مواد جيوتكنيكية مصنعة -مثل الجيوتكستيل الجيوغريد الجيونت وغيرها- أدى لاحقاً إلى استخدام هذه المواد الجديدة كعناصر تسليح في بناء جدران التربة المسلحة، يمكن لهذه الجدران أن تحقق العديد من المهام من تدعيم وسند وتوازن، وأشكالها عديدة جداً ولكن لها نفس المبدأ (Elton and Patawaran, 2005).

أهمية البحث وأهدافه:

يهدف هذا البحث إلى دراسة سلوك الجدران الاستنادية للتربة المسلحة ميكانيكياً بشرائح الجيوغريد باستخدام طريقة العناصر المنتهية (FEM) -برنامج (Plaxis) من خلال دراسة أهم المعاملات المؤثرة على توازن و تصميم هذا النوع من الجدران وهي :

1. دراسة تأثير طول شرائح الجيوغريد.
2. دراسة تأثير التباعد الشاقولي بين شرائح الجيوغريد.
3. دراسة تأثير خواص الجيوغريد.
4. دراسة تأثير درجة ترانس تربة الردم.
5. دراسة تأثير الحمولات السطحية خلف الجدار.

إضافة لذلك يهدف البحث إلى إجراء دراسة مقارنة بين الجدران الاستنادية للتربة المسلحة ميكانيكياً بالجيوغريد مع الأنواع التقليدية للجدران الاستنادية البيتونية والبيتونية المسلحة المصبوبة بالمكان (CIP) من خلال معيار الكلفة الاقتصادية لكل منها.

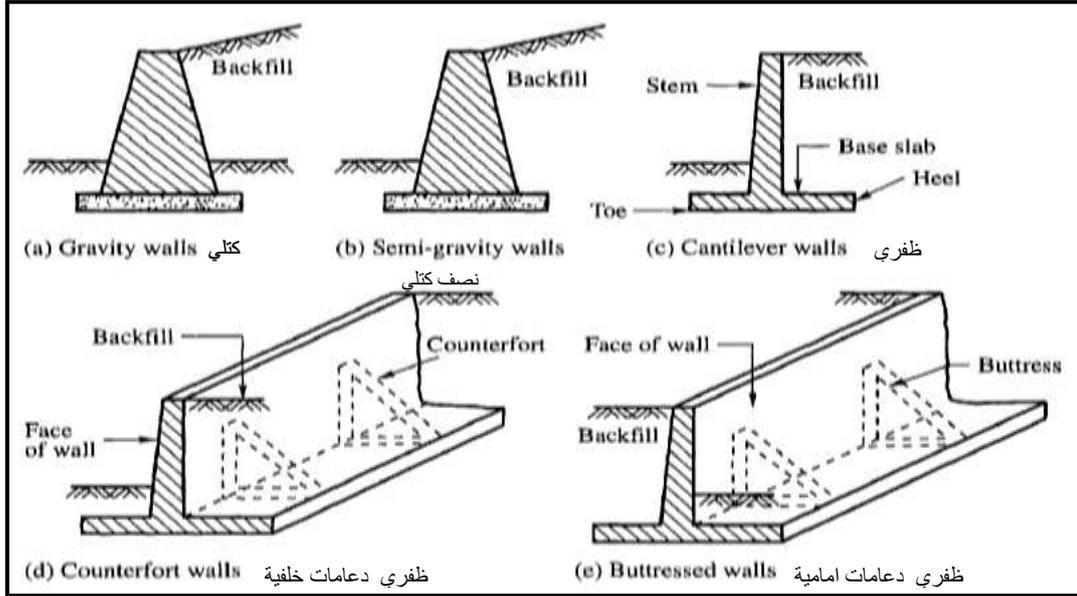
سوف يسهم هذا البحث في إغناء البحث العلمي في الجامعات فيما يتعلق بموضوع البحث وهو دراسة سلوك جدران التربة المسلحة بالجيوغريد و أهم الاعتبارات التصميمية والعوامل المؤثرة على استقرار هذا النوع من الجدران وكذلك إلقاء الضوء على الميزات المتعددة التي يقدمها هذا النوع من الجدران الاستنادية وأهمها الناحية الجمالية وطرق التنفيذ السريعة والبسيطة والديمومة، أضف إلى أنه يقدم بديلاً اقتصادياً مقارنة بالأنواع الأخرى البيتونية التقليدية المصبوبة بالمكان.

منهجية البحث:

- اعتمد هذا البحث على المنهج التحليلي المقارن، حيث اتبعت لإنتاجه المراحل التالية:
- ✓ النمذجة بطريقة العناصر المنتهية: تم نمذجة موديل مخبري لجدار من تربة مسلحة بالجيوريد بطريقة الـ FEM-Plaxis، وبعد التحقق من أن نموذج الـ FEM يعكس السلوك الإجهادي-التشوهي بدقة مقبولة مقارنة مع نتائج القياسات المخبرية، قمنا بإجراء دراسة متغيرات لأهم العوامل المؤثرة على سلوك جدران التربة المسلحة بالجيوريد على ضوء أهداف البحث.
 - ✓ مقارنة بين جدران التربة المسلحة بالجيوريد (MSEW) والجدران البيتونية التقليدية المصبوبة في المكان (CIP) الكتلية والظفرية.
 - ✓ تحليل النتائج ومناقشتها.

1) الجدران الاستنادية ومفهوم تسليح التربة:

إن الجدران الاستنادية هي منشآت تستخدم لحجز منحدرات التربة الشاقولية أو شبه الشاقولية أو أية مادة أخرى، حيث إن التربة المحجوزة قد تكون تربة أصلية أو مردومة. وهناك أنواع متعددة من الجدران الاستنادية أكثرها انتشاراً هي الجدران الاستنادية البيتونية والبيتونية المسلحة و لها أنواع متعددة أهمها مبين بالشكل (1). والمواد الرئيسية المكونة لهذه الجدران هي البيتون أو البيتون المسلح المصبوب في الموقع (CIP: Cast in place).



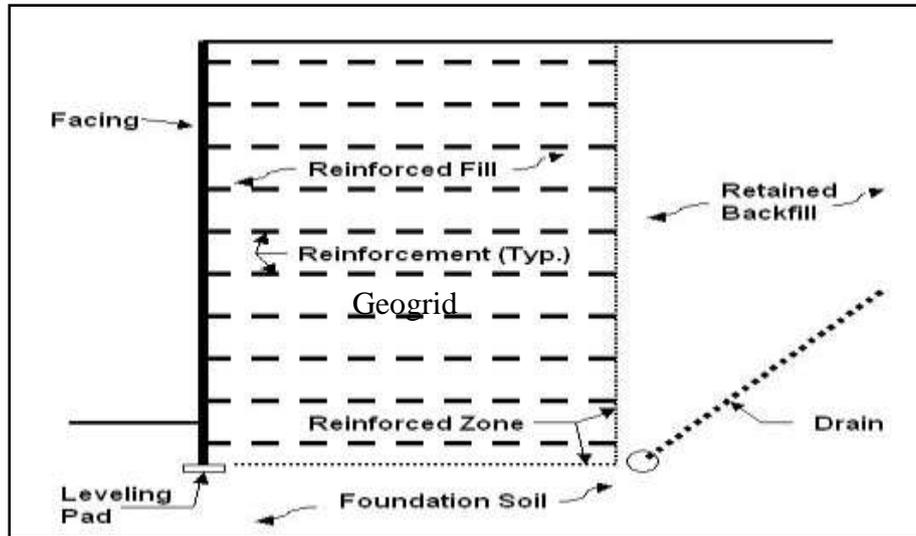
الشكل (1) بعض أنواع الجدران الاستنادية البيتونية التقليدية والبيتونية المسلحة (Murthy, 2002)

أما جدران التربة المسلحة بالجيوريد فتتألف كما يوضح الشكل (2) : من ثلاثة مكونات أساسية، تعمل فيما بينها بتأثير متبادل لتكوين نظام مشترك يقوم بتأمين توازن الجدار وهذه المكونات هي:

1. تربة الردم المسلحة (Reinforced fill): وتختار عادة من المواد الحبيبية خشنة نسبياً ($F_{200} < 15\%$) تتوضع ضمنها عناصر التسليح (Geogrid) التي تنفذ ضمن التربة بشكل شرائح بتباعدات وأطوال محددة وتكون مثبتة في واجهة الجدار، حيث إن الآلية الأساسية في تسليح التربة تتضمن توليد قوى احتكاك بين التربة

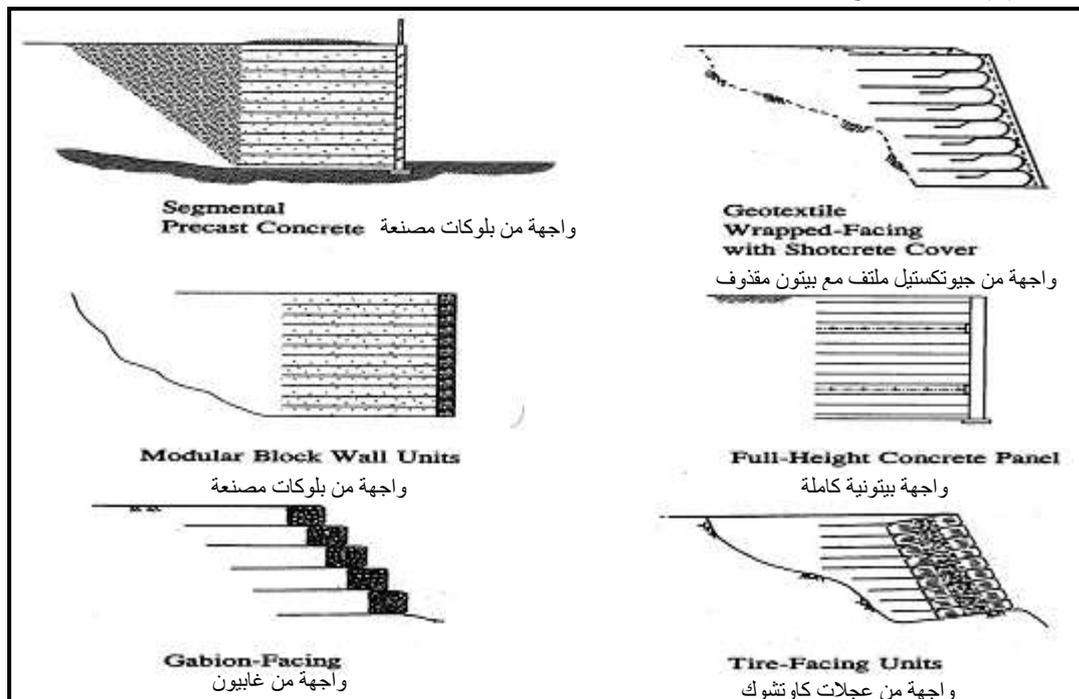
وعناصر التسليح. هذه القوى تساعد في زيادة مقاومة النظام المشترك (تربة-تسليح) و بالتالي في زيادة استقرار الجدار.

2. الواجهة (Facing): تكون عادة من البيتون أو الحجر المصنع أو تسليح ملتف وغيرها، وهي غير ضرورية ولكنها تستخدم عادة للحفاظ على المظهر وتجنب تآكل التربة بين عناصر التسليح (Bowles,1997).



الشكل(2) مقطع عرضي عام لجدار استنادي من تربة مثبتة ميكانيكياً (FHWA,2009).

ويبين الشكل(3) بعض أنواع هذه الجدران حسب الواجهات المستخدمة فيها.



الشكل(3) أنواع الواجهات في الجدران من تربة مثبتة ميكانيكياً (FHWA,2009).

- تتمتع الجدران الاستنادية من التربة المسلحة بالجيوريد (MSEW) بمزايا متعددة مقارنةً بالجدران البيتونية التقليدية المصبوبة في المكان (CIP) الكتلية والظرفية أهمها:
 - يتطلب إنشاؤها إجراءات تنفيذ سهلة وبسيطة ولا يتطلب معدات تنفيذ ضخمة.
 - لا تحتاج مهارات تنفيذية خاصة.
 - تتطلب إجراءات تحضير لموقع العمل أقل بكثير مقارنةً بالجدران البيتونية.
 - تتطلب مكان أقل أمام الجدار من أجل عمليات التنفيذ، وبالتالي يؤدي ذلك لتخفيض مساحات الاستملاك من الأرض من أجل تنفيذ المشروع.
 - لا تحتاج إلى أساسات صلبة لأن هذا النوع من الجدران أكثر مرونة وأكثر قدرة على تحمل الهبوطات النسبية والإجمالية بالمقارنة مع الجدران البيتونية المصبوبة بالمكان.
 - تعتبر كلفة هذه الجدران اقتصادية نسبياً مقارنةً بالجدران الأخرى.
 - يمكن تقنياً تنفيذ هذه الجدران بارتفاعات تتجاوز الـ 15م.
 - سرعة تنفيذ هذه الجدران كبيرةً نسبياً بالمقارنة مع الأنواع البيتونية التقليدية المصبوبة في المكان التي تحتاج لأعمال تركيب قالب وتسليح وانتظار تصلب البيتون وفك القالب وتنفيذ فواصل صب وتمدد....
 - تصنف هذه الجدران ضمن معايير بيئية أعلى من الأنواع الأخرى لأن بعضها يمكن تغطية واجهته بزراعة بعض أنواع النباتات، والأنواع الأخرى ذات الواجهة الحجرية تعتبر من الناحية الجمالية أعلى قيمةً بالمقارنة مع الأنواع الأخرى البيتونية التي تحتاج إلى إكساء حجري وبالتالي كلفة اقتصادية أعلى لتجاريها في المستوى الجمالي .

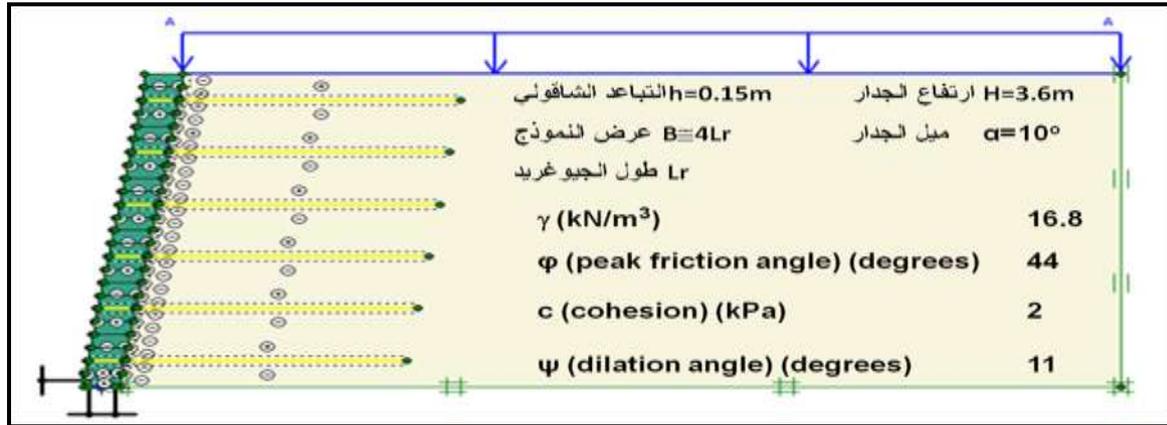
(2) البرنامج المستخدم plaxis :

سيتم في هذه الدراسة استخدام برنامج plaxis هو برنامج يستخدم طريقة العناصر المحددة من أجل التحليل الثنائي الأبعاد (2D) للمنشآت والمسائل الهندسية الجيوتهكنيكية، ويعطي إمكانية استخدام عدد كبير من قوانين المادة الأساسية والمتطورة لنمذجة السلوك الإجهادي-التشوهي الخطي واللاخطي للتربة ، إضافةً لإمكانية نمذجة شرائح الجيوريد من خلال عناصر خطية خاصة (geogrid) وإمكانية دراسة الفعل المتبادل بين المنشأ والتربة من خلال عناصر تماس خاصة (interface elements) توجد جاهزة ضمن بيئة البرنامج تأخذ بالحسبان الإجهادات المماسية بين المادتين وذلك من خلال معامل يدعى R_{inter} يربط بين معاملات المواد المختلفة ويتعلق بنوعية المادة وخشونة السطح (Plaxis, 2005).

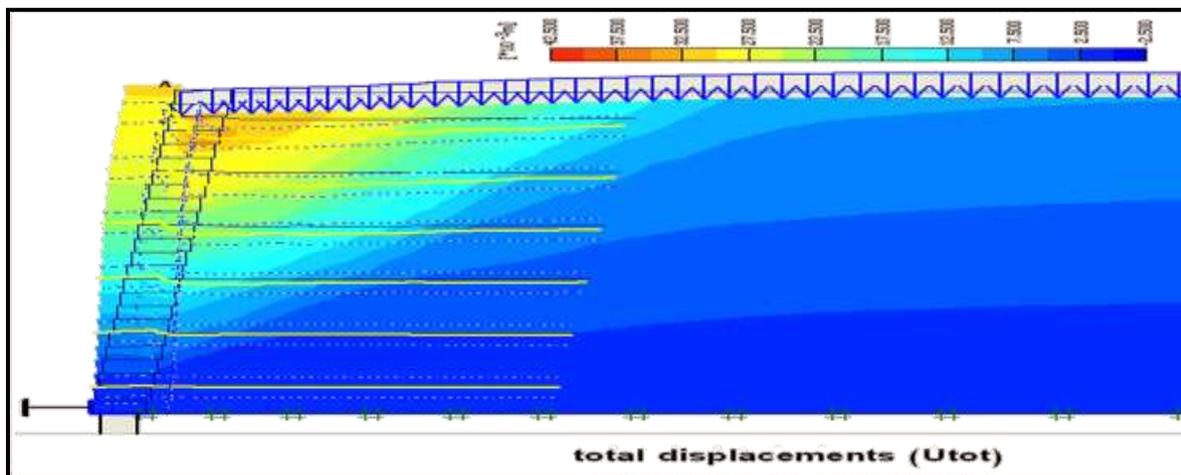
النتائج والمناقشة:

1.6 . معايرة سلوك النموذج (Model calibration):

تم إعداد نموذج رياضي لجدار تربة مسلحة بالجيوريد بارتفاع 3.6m وواجهة من الحجارة المصنعة باستخدام برنامج plaxis بنفس الأبعاد الهندسية والشروط الطرفية ومواصفات المواد المستخدمة في التجربة المخبرية التي قام بها (Bathurst et al., 2000) والموضحة بالشكل (4). وقد تم نمذجة السلوك الإجهادي-التشوهي للتربة من خلال نموذج (Mohr-Coulomb model). يبين الشكل (5) الانتقالات الإجمالية في الجدار والتربة.

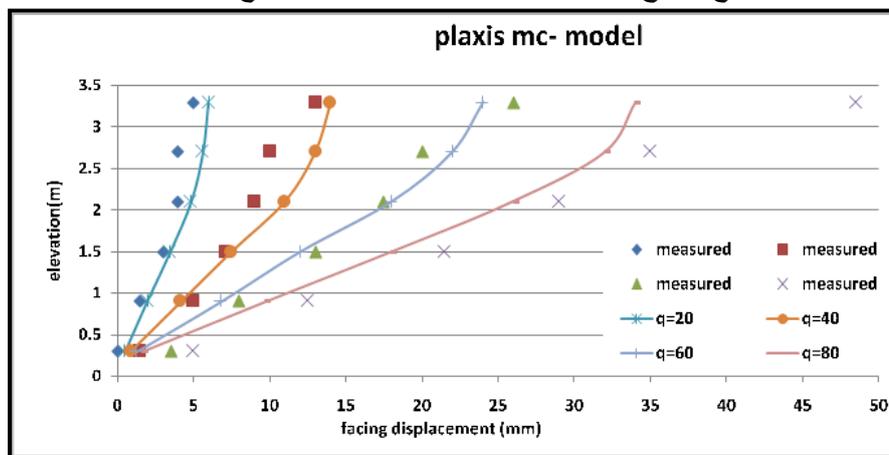


الشكل(4): النموذج الرياضي للجدار وفق معطيات التجربة الحقلية موضح عليه مواصفات التربة والجدار .



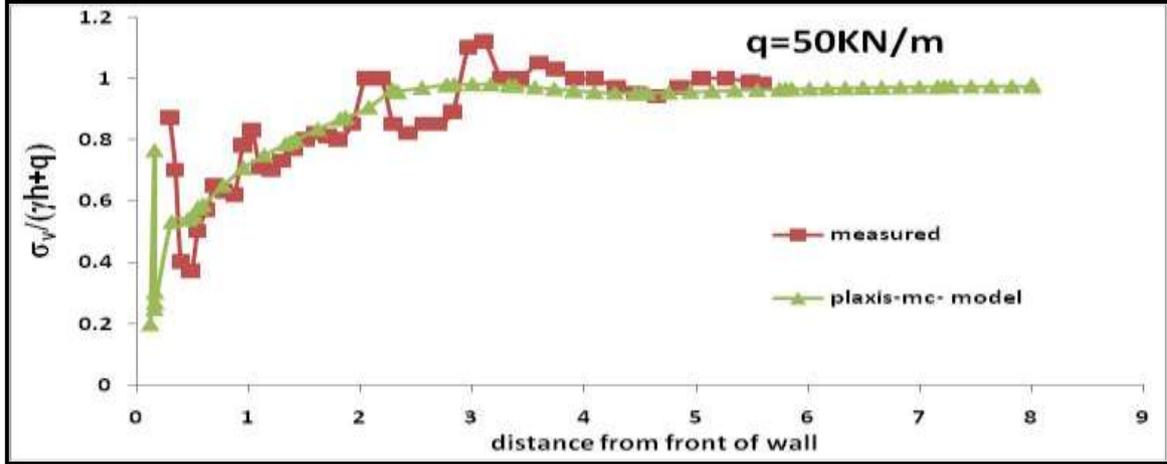
الشكل(5) الانتقالات الكلية للنموذج المستخدم للمعايرة في مرحلة الحساب الأخيرة.

تم مقارنة انتقالات الناتجة في واجهة الجدار عند مناسيب مختلفة من أجل حمولات سطحية مختلفة وفق نتائج الـ FEM مع القياسات المرجعية للتجربة الحقلية الموضحة بالشكل (6) والذي يبين أن نتائج النموذج الرياضي (FEM) يعكس تقارب مقبول مع النتائج المرجعية للتجربة الحقلية من أجل جميع الحمولات السطحية.



الشكل(6): مقارنة بين نتائج نموذج الـ FEM و القياسات المرجعية بالنسبة للعلاقة بين انتقال واجهة الجدار مع الحمولة السطحية عند مناسيب مختلفة من الجدار.

كما تم مقارنة تغير الإجهادات الشاقولية خلف الجدار عند منسوب أسفل الجدار مع البعد عن الواجهة من أجل حمولة سطحية موزعة بانتظام قدرها ($q=50\text{KN/m}^2$) والتي تظهر أيضاً التقارب بين نتائج الحسابات ونتائج القياسات التجريبية كما يوضح الشكل (7).



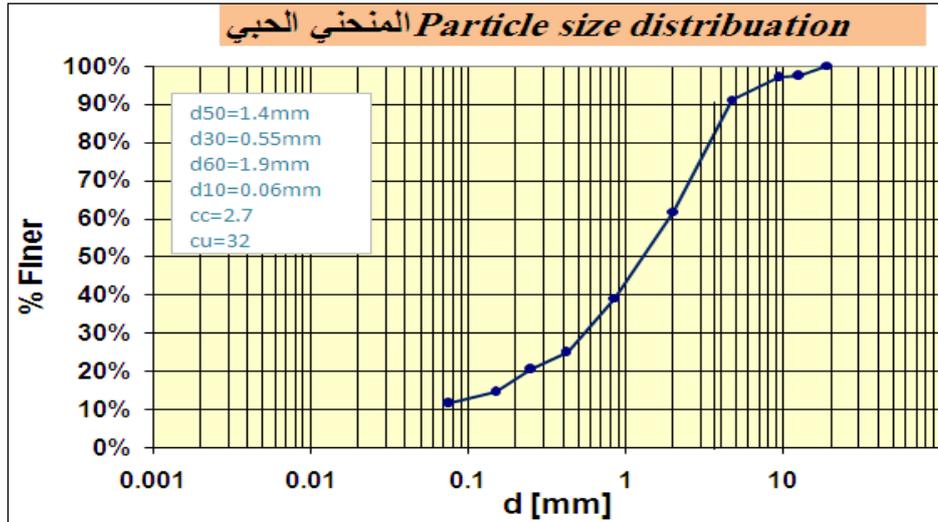
الشكل (7) مقارنة بين نموذج FEM والقياسات المرجعية لتغير الإجهادات الشاقولية عند منسوب أسفل الجدار مع البعد عن واجهة الجدار من أجل حمولة سطحية موزعة بانتظام قدرها ($q=50\text{KN/m}^2$).

مما سبق نلاحظ أن النموذج الرياضي باستخدام برنامج plaxis يعكس السلوك الإجهادي - التشوهي للتربة المسلحة بالجيوريد بدقة مقبولة وبالتالي يمكن استخدام هذا النموذج لإجراء دراسة متغيرات لأهم العوامل المؤثرة على أمان واستقرار هذا النوع من الجدران.

2.6 التحليل العددي باستخدام طريقة العناصر المنتهية (FEM) - برنامج Plaxis:

أ- خواص المواد المستخدمة :

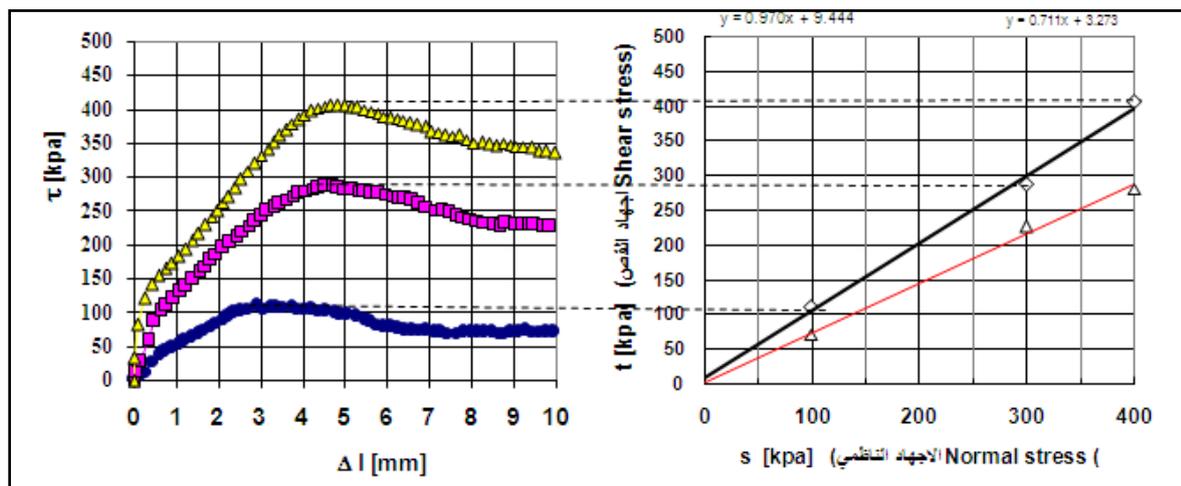
تربة الردم الخلفي (Reinforced fill & Retained backfill): هي عبارة عن رمل عدسي تم تحديد خواصه من خلال مجموعة من التجارب المخبرية في مخابر قسم الهندسة الجيوتكنيكية في جامعة تشرين، حيث إن التجارب وأهم نتائجها موضحة في الجدول (1) والأشكال (10/9/8) التالية:



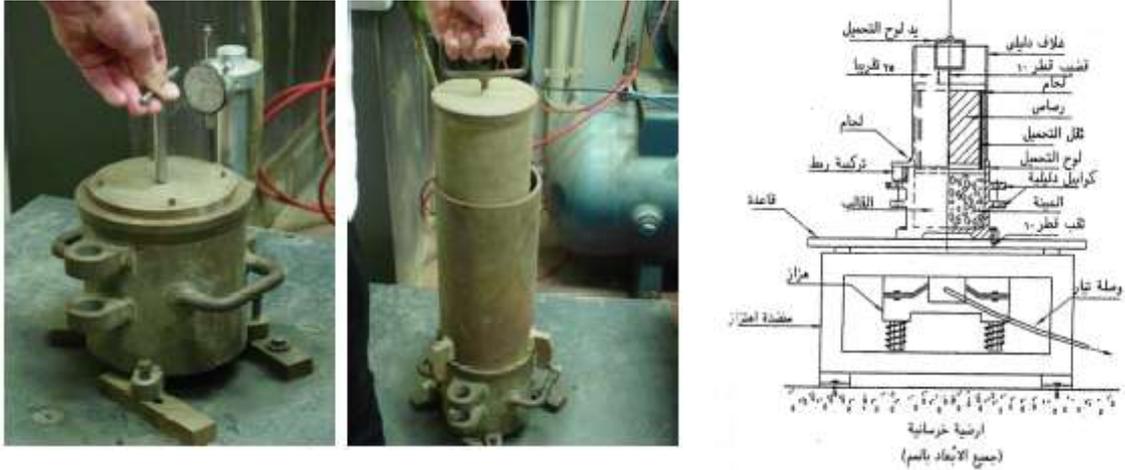
الشكل (8) منحنى التحليل الحبي لتربة الردم.

الجدول (1) نتائج التجارب المخبرية لتربة الردم.

التجربة	البيان	الرمز	Dr=60 %	Dr=70 %	Dr=83 %
الوزن الحجمي	الوزن الحجمي	γ	15.62 kN/m^3	16.12 kN/m^3	16.8 kN/m^3
تجربة الكثافة الجافة الأعظمية والأصغرية (الطاوله الرجاجة)	الكثافة الجافة الأعظمية	ρ_{dmax}	1.783 g/cm^3	1.783 g/cm^3	1.783 g/cm^3
	الكثافة الجافة الأصغرية	ρ_{dmin}	1.317 g/cm^3	1.317 g/cm^3	1.317 g/cm^3
تجربة القص المباشر	زاوية الاحتكاك الداخلي	ϕ	37.1°	40.4°	44.1°
	التماسك	c	2 Kpa	2 Kpa	2 Kpa
تجربة الانضغاط الأودومتري	معامل مرونة التربة الأودومتري	E_{oed}	18.18Mpa	25.6Mpa	32.3Mpa



الشكل (9) نتائج تجربة القص المباشر .



الشكل (9) شكل توضيحي لجهاز الطاولة الهزازة مع القوالب المستخدمة (ASTM)

الواجهة: عبارة عن قطع حجرية مصنعة بوزن حجمي $\gamma_b=21.7\text{KN/m}^3$ وبأبعاد (b=0.3m h=0.15m) شرائح التسليح: عناصر التسليح المستخدمة من الجيوريد خواصه مبينة بالجدول التالي:

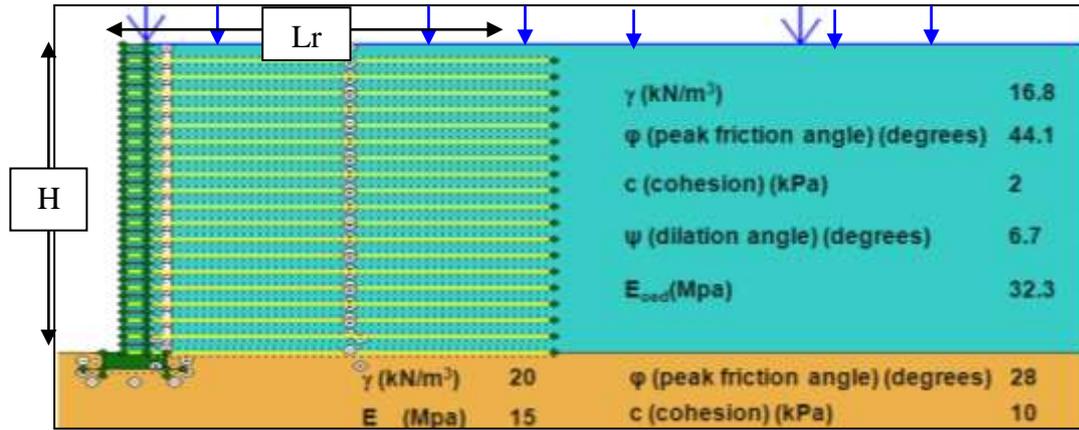
الجدول (2) مواصفات الجيوريد المستخدم.

نوع الجيوريد	EA (KN/m) (الصلابة المحورية)
GG1	620
GG2	820
GG3	1500

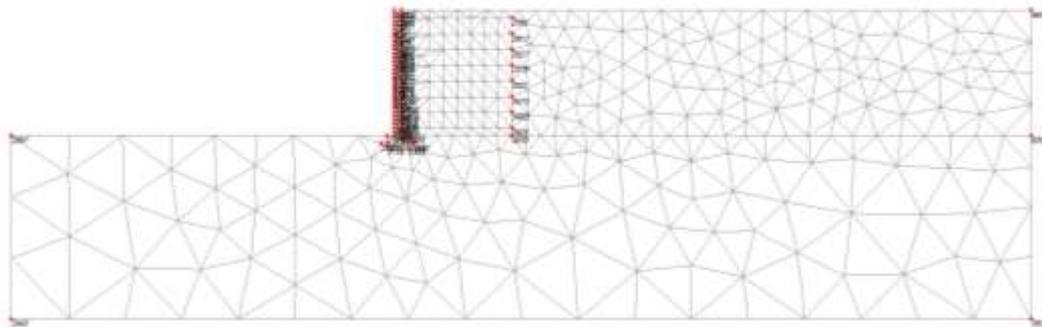
تربة التأسيس (Foundation soil): عبارة عن تربة غضارية مواصفاتها محددة بالشكل (11) ولم يتم إجراء دراسة متغيرات لخواصها في هذا البحث.

ب- النموذج الرياضي (FE-Model):

تم إعداد نموذج رياضي لجدار من تربة مسلحة بالجيوريد المبين بالشكل (11) باستخدام برنامج (plaxis) حيث تم استخدام الحالة التشوهية - المستوية (Plane strain) و تم استخدام شبكة العناصر المنتهية (FE-Mesh) الموضحة في الشكل (12) و المكونة من 716 عنصراً مثلثي بـ 15 عقدة. كما تم نمذجة الجيوريد باستخدام عناصر خطية خاصة تدعى Geogrid ، وتم نمذجة السلوك الإجهادي - التشوهي للتربة باستخدام موديل مور-كولومب. أجريت الحسابات من أجل الحصول على عامل الأمان (global safety factor) باستخدام طريقة (phi/c - reduction).

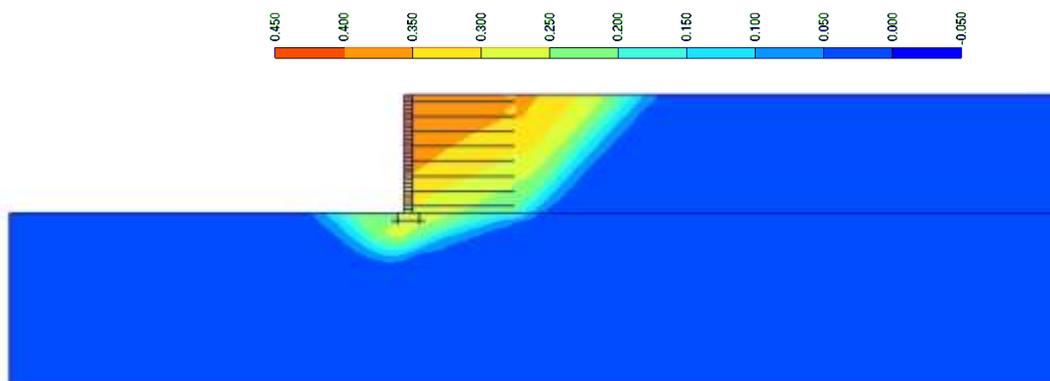


الشكل(11) الأبعاد الهندسية للنموذج المدروس ومواصفات تربة الردم والتربة الأصلية.

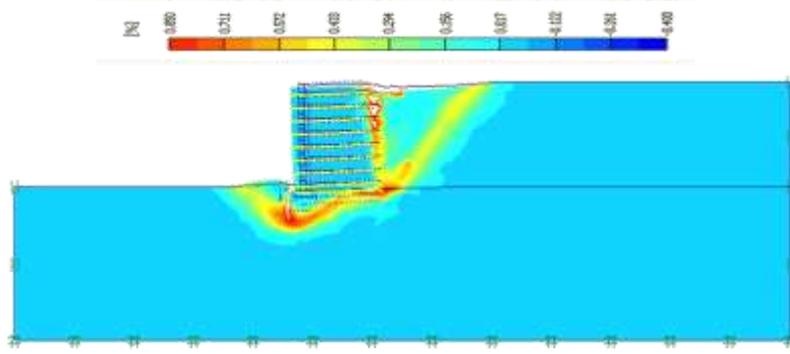


الشكل(12): شبكة العناصر المنتهية (FE-Mesh) المستخدمة للنموذج المدروس (H=4.8m).

يبين الشكل(13) قيم الانتقالات الكلية في النموذج المدروس (حالة جدار H=4.8m) والتي تظهر أن الانتقال الأعظمي في الجزء العلوي من واجهة الجدار، كما أن شكل سطح الانهيار المشكل في مرحلة الحساب الأخيرة موضح في الشكل (14) من خلال نتائج تشوهات القص النسبية.



الشكل(13): الانتقالات الكلية في النموذج في مرحلة الحساب الأخيرة.



الشكل(14):تشوهات القص في النموذج و التي تبين سطوح الانهيار.

ت- دراسة المتغيرات (Parametric study):

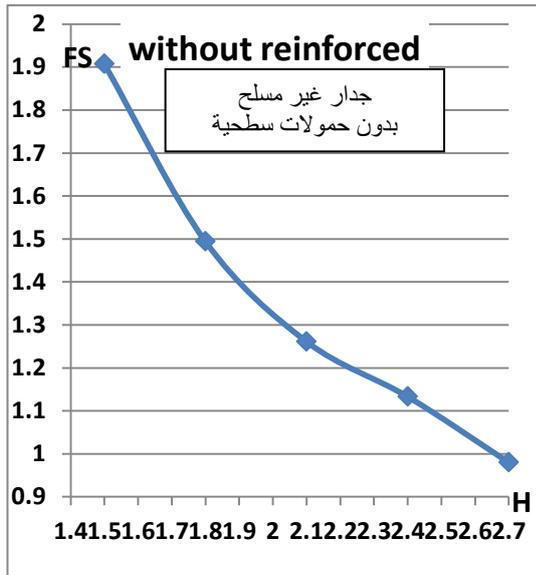
تم إجراء مجموعة سلاسل من الحسابات العددية على النموذج المدروس من أجل دراسة المتغيرات على ضوء أهداف البحث حيث بلغ عدد الحسابات المنفذة (887 runs) وهذه السلاسل موضحة بالجدول (3).

الجدول(3): سلاسل الحسابات العددية.

نوع الجدار	السلسلة	H m	Lr/H	h m	q Kpa	EA KN/m	Dr %	No.-runs	
غير مسلح	1	1.5	-	-	0	-	83%	6	
		2.7	-	-	0	-	83%	6	
مسلح	2	3	0.5	0.3	0	620	83%	168	
		7.5	1.1	0.3	60	620	83%	168	
	3	3	0.5	0.6	0	620	83%	168	
		7.5	1.1	0.6	60	620	83%	168	
	4	3	0.5	0.9	0	620	83%	168	
		7.5	1.1	0.9	60	620	83%	168	
	5	3	0.5	0.3	0.6	0	820	83%	126
		7.5	1.1	0.3	0.6	0	820	83%	126
	6	3	0.5	0.3	0.6	0	1500	83%	126
		7.5	1.1	0.3	0.6	0	1500	83%	126
	7	3	0.5	0.6	0	620	60%	70%	126
		7.5	1.1	0.6	0	620	83%	83%	126
	Σ								887

ت-1- حالة جدار غير مسلح:

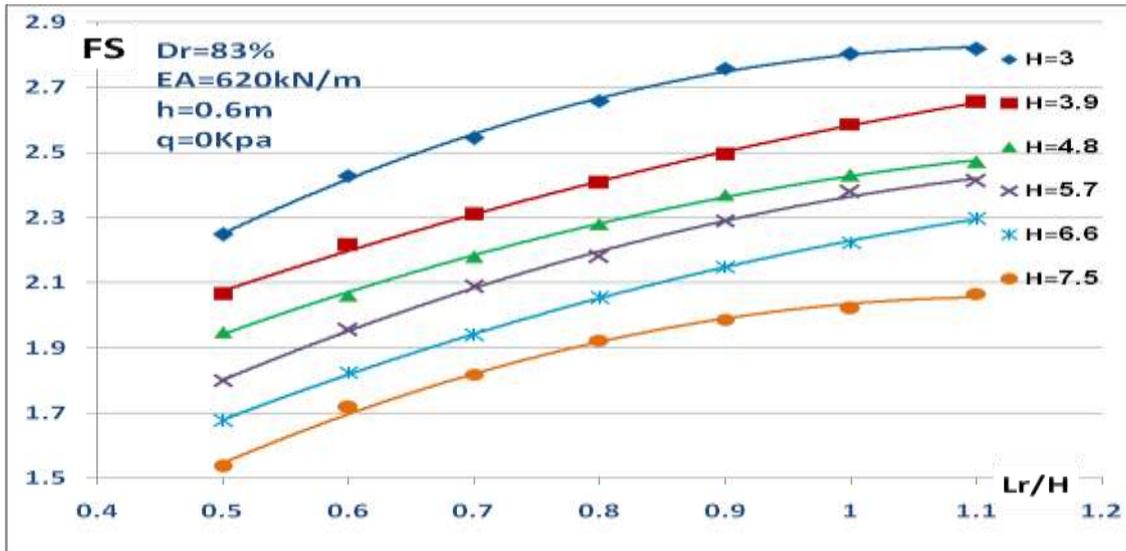
تم إجراء سلسلة من الحسابات بحالة الجدار بواجهة حجرية غير المسلحة بالجيوريد وبدون حمولة سطحية من أجل ارتفاعات مختلفة للجدار. ويوضح الشكل(15) تغير معامل الأمان مع تغير الارتفاع ويمكن من هذا الشكل استنتاج الارتفاع الأعظمي الذي ينهار عنده الجدار غير المسلحة وبدون حمولة سطحية بـ $H > 2.6m$ والارتفاع الذي يحقق عامل أمان أصغري 1.3 بـ $H < 2m$, حيث إنه من أجل ارتفاعات أكبر للجدار أو وجود حمولات سطحية نحتاج إلى تسليح بالجيوريد لتحقيق معاملات الأمان المطلوبة.



الشكل(15) تغير عامل الأمان مع تغير ارتفاع الجدار

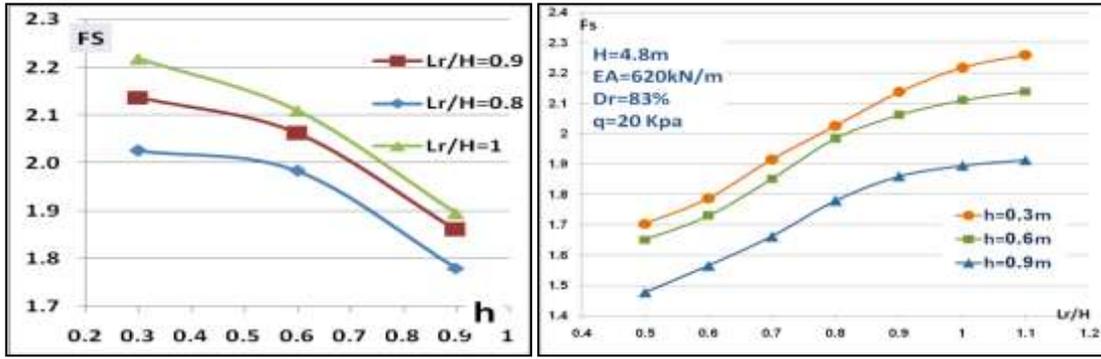
ت-2- حالة جدار مسلح بالجيوريد:

- 1) دراسة تأثير طول الجيوريد على أمان الجدار من خلال النسبة Lr/H : تم دراسة تأثير النسبة Lr/H على عامل الأمان من أجل ارتفاعات مختلفة للجدار من 3-7.5m وبين الشكل (16) أن:
1. عامل الأمان يزداد مع زيادة النسبة Lr/H بشكل منحنٍ تحت خطي و يتناقص مع تزايد ارتفاع الجدار.
 2. عندما تزيد النسبة Lr/H على 0.8 (النسبة الفعالة لطول الجيوريد) تكون الزيادة بعامل الأمان طفيفة وهذه النسبة تتوافق مع نظام الـ (AASHTOO, 2012) الذي ينص على تصميم الجدران من أجل نسبة دنيا قدرها 0.7 [1] كما تنص تعليمات الـ (NCMA, 2009) على نسبة أصغرية قدرها 0.6 [8].



الشكل (16) تأثير طول الجيوريد على عامل أمان الجدار من أجل ارتفاعات مختلفة للجدار من خلال النسبة Lr/H .

- 2) دراسة تأثير التباعد الشاقولي بين شرائح الجيوريد (h) على أمان الجدار: تم دراسة ثلاثة تباعدات مختلفة لشرائح الجيوريد (0.3-0.6-0.9m) وبين الشكلان (17) و (18):
1. زيادة عامل الأمان مع نقصان التباعد الشاقولي h .
 2. زيادة عامل الأمان بشكل شبه خطي مع زيادة Lr/H حتى قيمة محددة فعالة، تتغير مع تغير التباعد h ، حيث تأخذ هذه النسبة القيم التالية ($Lr/H=0.8-0.9-1$) من أجل تباعدات $h=(0.9-0.6-0.3)$ على الترتيب، بعدها ينخفض معدل التزايد.
 3. يوضح الشكل (18) تناقص عامل الأمان مع تزايد التباعد h بشكل طفيف حتى التباعد $h=0.6$ ، وبعدها يصبح التناقص بمعدلات أكبر مع زيادة h .

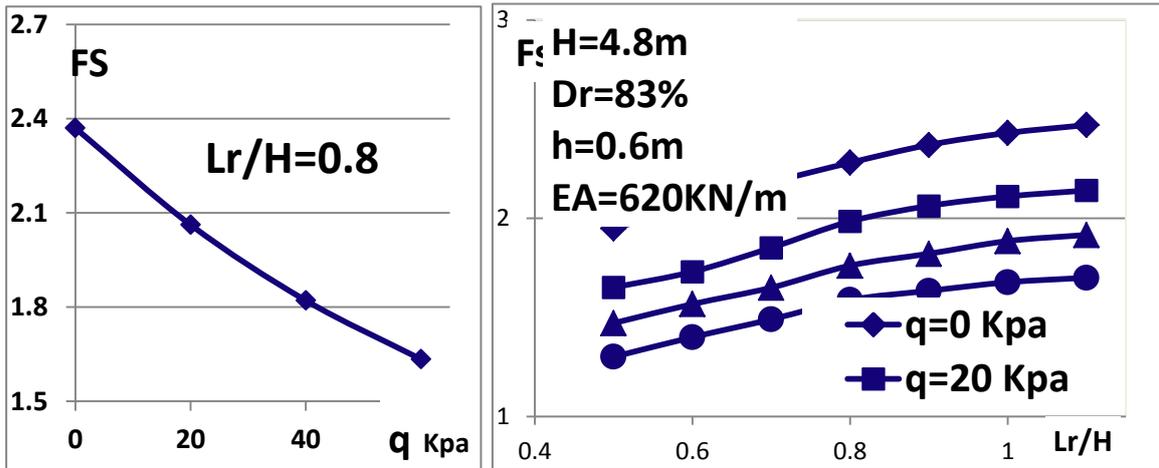


الشكل (17) تأثير النسبة Lr/H على عامل أمان الجدار
الشكل (18) تغير عامل الأمان مع تغير التباعد الشاقولي h
من أجل نسب مختلفة من ($Lr/H=0.8-0.9-1m$)

(3) دراسة تأثير تغير الحمولة السطحية q على أمان الجدار: نلاحظ من الشكلين (19) و (20) ما يلي:

(1) تناقص عامل الأمان مع تزايد الحمولة q بنسبة ثابتة لا تتغير مع تغير Lr/H .

(2) من أجل النسبة $Lr/H=0.8$ نلاحظ من الشكل (20) أن نسبة التناقص في عامل الأمان تبلغ القيمة 13% عند تغير الحمولة بين $0-20$ kN/m^2 وتصل إلى 23% عند تغير الحمولة بين $0-40$ kN/m^2 و إلى 30% عند تغير الحمولة بين $0-60$ kN/m^2 .

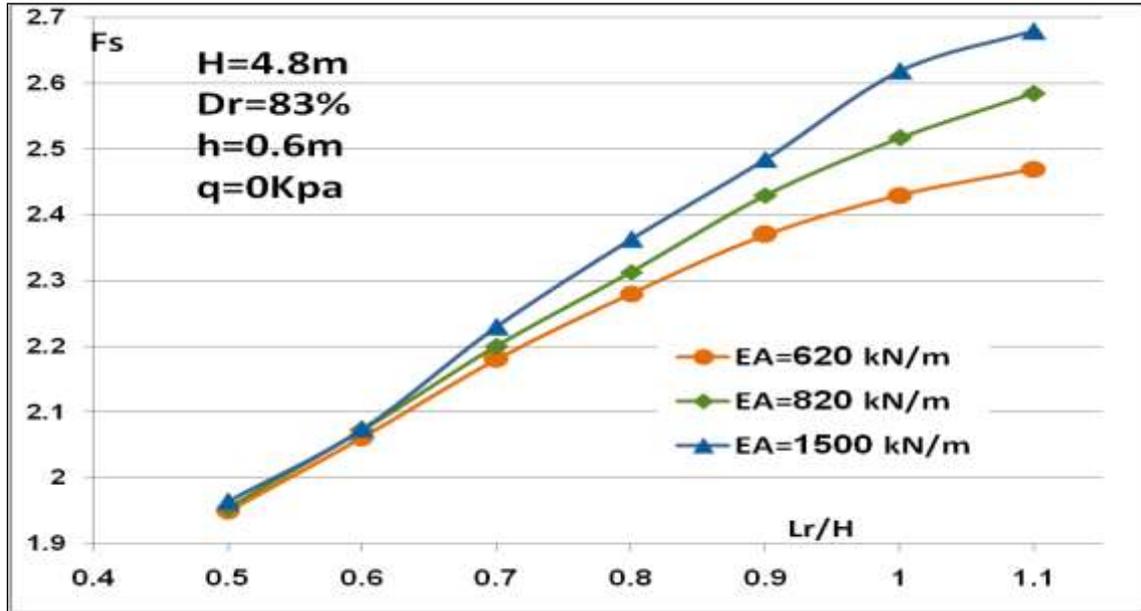


الشكل (20) تغير عامل الأمان مع تغير الحمولة
السطحية q من أجل $Lr/H=0.8$

الشكل (19) تأثير الحمولة السطحية q على عامل أمان الجدار.

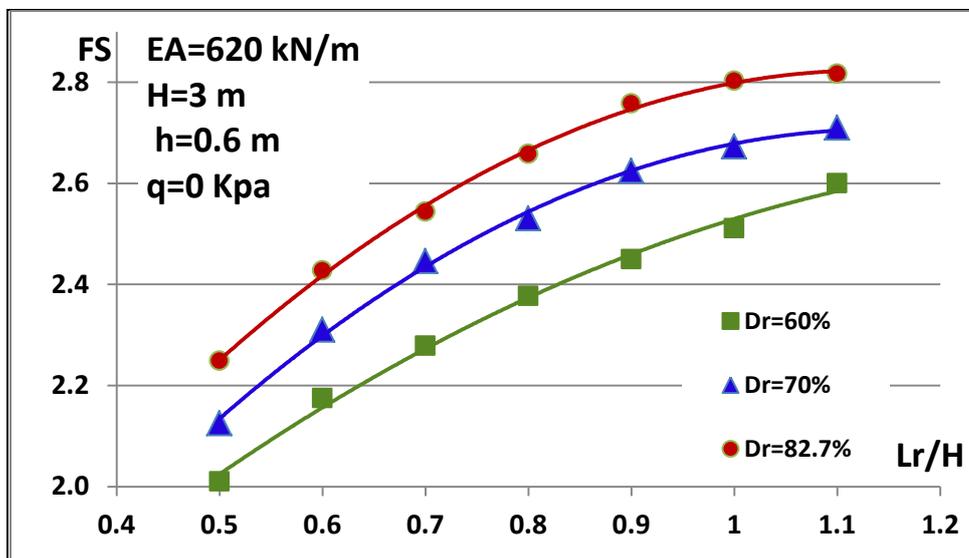
(3) دراسة تأثير صلابة الجيوريد على أمان الجدار:

يوضح الشكل (21) أن تأثير صلابة الجيوريد على عامل الأمان من خلال تغير الصلابة المحورية (Axial stiffness) EA يعتبر طفيفاً نسبياً ويظهر هذا التأثير أكثر من أجل $Lr/H > 0.8$ ، حيث يتزايد معامل الأمان بشكل خطي تقريباً مع تزايد صلابة الجيوريد . فمن أجل النسبة $Lr/H=0.8$ تبلغ زيادة معامل الأمان مقدار أقل من 4% من أجل زيادة صلابة الجيوريد من $(620-1500)kN/m$.



الشكل (21) تأثير صلابة الجيوغريد EA على عامل أمان الجدار.

4) دراسة تأثير الكثافة النسبية لتربة الردم $Dr\%$ على أمان الجدار:
 من الشكل (22) نلاحظ تزايد عامل الأمان بزيادة الكثافة النسبية Dr لتربة الردم خلف الجدار وتكون نسبة الزيادة بمقدار 4.5% وسطيا عند زيادة Dr من % (70-83) وبمقدار 10% وسطيا عند زيادة Dr من % (60-83).

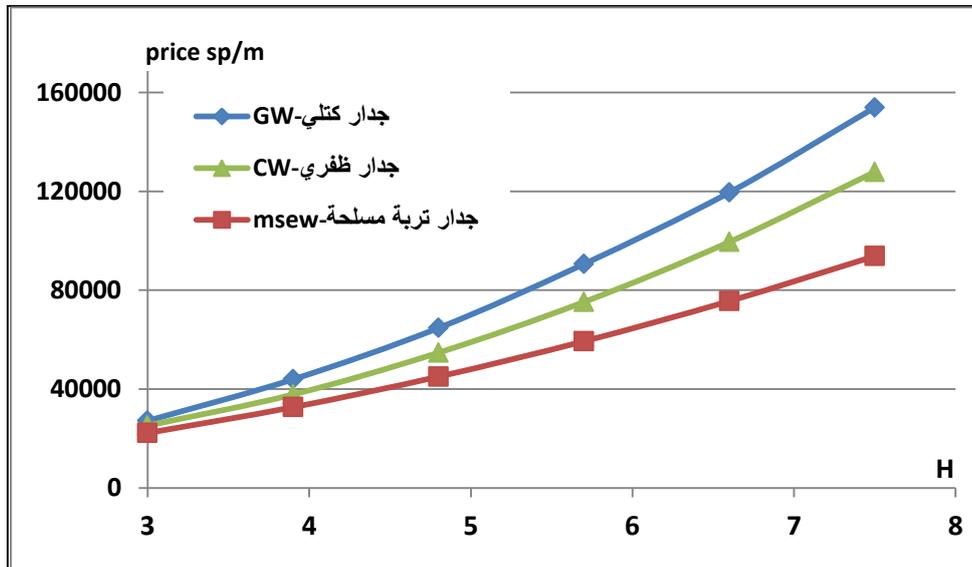


الشكل (22) تأثير الكثافة النسبية لتربة الردم $Dr\%$ على عامل أمان الجدار.

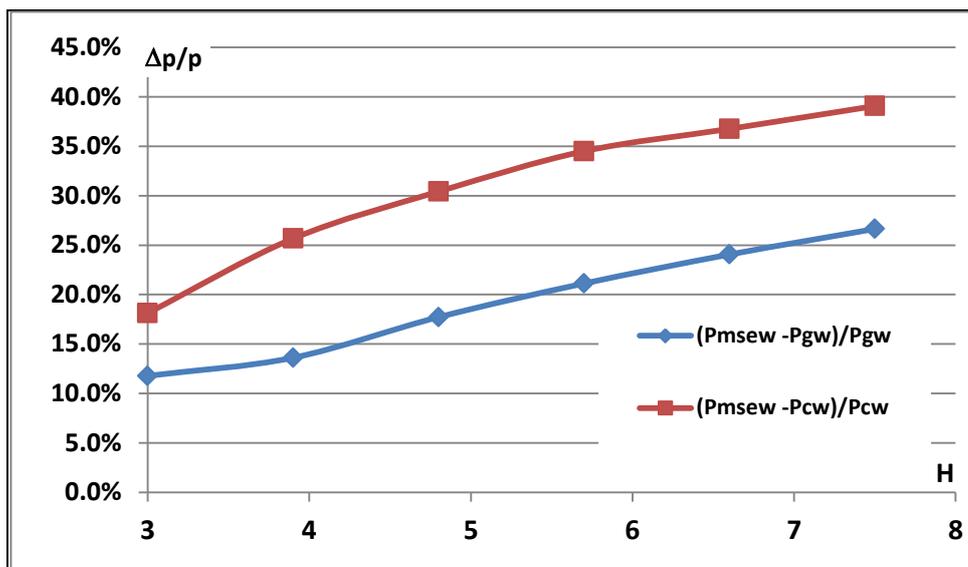
3.6. مقارنة بين جدران التربة المسلحة بالجيوريد (MSEW) والجدران البيتونية التقليدية المصبوبة في المكان (CIP) الكتلية والظفرية:

تم إجراء مقارنة بين أنواع مختلفة من الجدران الاستنادية البيتونية التقليدية (كتلي غير مسلح - ظفري مسلح) وجدران من تربة مسلحة بالجيوريد من حيث كلفة إنشاء متر طولي من الجدار على ضوء أسعار مواد البناء والتنفيذ وفق جدول تحليل الأسعار الصادر عن وزارة الإدارة المحلية - محافظة اللاذقية للعام 2013م، و ذلك من أجل ارتفاعات مختلفة للجدار (3-7.5m). أهم المعايير التي أخذت بالحسبان أثناء المقارنة بالكلفة هي اختيار أبعاد الجدران البيتونية التي تحقق معاملات أمان متقاربة مع جدران التربة المسلحة و ميول متساوية للردميات خلف الجدران المختلفة. وتم تمثيل النتائج بالشكل (23) الذي يبين ما يلي:

- 1- تزداد كلفة المتر الطولي مع ازدياد ارتفاع الجدار بشكل منحنٍ فوق خطي بالنسبة لجميع أنواع الجدران.
- 2- تكون الجدران البيتونية التقليدية الكتلية (غير المسلحة) أكثر كلفة من الجدران التقليدية البيتونية الظفرية (المسلحة) بنسبة تتراوح من 7% إلى 20% من أجل تغيير الارتفاعات من 3m إلى 7.5m.
- 3- إن كلفة إنشاء المتر الطولي للجدران الاستنادية من تربة مسلحة بالجيوريد أقل من النوعين السابقين بنسبة توفير عن الجدار البيتوني الكتلي تتراوح من 18% إلى 39%، من أجل تغيير الارتفاعات من 3m إلى 7.5m ، وبنسبة توفير عن الجدار الظفري تتراوح من 12% إلى 27% من أجل تغيير الارتفاعات من 3m إلى 7.5m ، كما هو موضح بالشكل (24).



الشكل (23) مقارنة بين الجدران الاستنادية من تربة مسلحة بالجيوريد والتقليدية البيتونية المصبوبة بالمكان (الكتلية غير المسلحة والظفرية المسلحة) من حيث الكلفة.



الشكل (24) النسبة المئوية للتوفير في الكلفة بين جدران التربة المسلحة بالجيوجريد والتقليدية البيتونية المصبوبة بالمكان (الكتلية غير المسلحة والظفرية المسلحة)، حيث $(\Delta p/p)$ تمثل النسبة المئوية للتوفير كفرق للكلفة بين نوعين من الجدران على كلفة الجدار التقليدي.

الاستنتاجات والتوصيات:

1.7. نتائج الدراسة العددية بطريقة العناصر المنتهية: من خلال نتائج الدراسة العددية ودراسة المتغيرات تم

التوصل إلى مجموعة من الاستنتاجات يمكن تلخيصها بما يلي:

1. أعطى التحليل العددي بطريقة الـ FEM - برنامج PLAXIS - لدراسة الجدران الاستنادية من تربة مسلحة بالجيوجريد (MSE) نتائج مقبولة مقارنة مع نتائج قياسات مخبرية على نماذج بأبعاد حقيقية، حيث تعكس السلوك الإجهادي - التشوهي للتربة والنموذج بدقة مقبولة.

2. يمكن تنفيذ جدران بواجهة حجرية من تربة غير مسلحة بالجيوجريد وبدون حمولات سطحية حتى ارتفاعات أقل من 2م لتحقيق معامل أمان أصغري قدره 1.3. ومن أجل جدران بارتفاعات أكبر من 2م ووجود حمولات سطحية يتطلب استقرار الجدار وأمانه استخدام تسليح للتربة خلف الجدار بالجيوجريد أو غيره من عناصر التسليح.

3. في حالة الجدران المسلحة بالجيوجريد أظهرت الدراسة ازدياد عامل الأمان مع زيادة طول الجيوجريد أي بزيادة النسبة Lr/H ومع نقصان التباعد الشاقولي للجيوجريد h . كما أظهرت أن الطول الفعال للجيوجريد هو $(Lr/H=0.8)$ وهذا يتوافق مع نظام الـ AASHTO الذي ينص على الطول الأصغري لشرائح الجيوجريد $(Lr/H=0.7)$. كما بينت نتائج البحث أن التباعد الشاقولي الفعال للجيوجريد $h \leq 0.6$ m.

4. في حال وجود حمولات سطحية خلف الجدار يتناقص عامل الأمان مع تزايد الحمولة السطحية q بنسبة ثابتة لا تتغير مع تغير Lr/H ، فمن أجل النسبة $Lr/H=0.8$ نجد أن نسبة التناقص في عامل الأمان تصل حتى 13% عندما تصل الحمولة إلى 20 kN/m^2 و تصل حتى 23% عندما تصبح الحمولة 40 kN/m^2 و إلى 30% عند الحمولة 60 kN/m^2 .

5. أظهرت الدراسة أن معامل الأمان يزداد بازدياد الكثافة النسبية لتربة الردم (Dr) ونسب هذه الزيادة تكون أقل من 10% بين كثافة نسبية متوسطة 60% وكثافة نسبية عالية 83%.

6. لم تثبت الدراسة وجود تأثير فعال لصلابة الجيوريد ضمن الحدود المدروسة والمستخدمه في المجال العملي على معامل الأمان من أجل أطوال جيوريد أقل من $0.8H$.

2.7. نتائج المقارنة مع الجدران الاستنادية البيتونية التقليدية: أظهرت نتائج الدراسة المقارنة اعتماداً على الكلفة الاقتصادية ما يلي:

1. إن الجدران الاستنادية من تربة مسلحة بالجيوريد تعطي كلفة إنشاء للمتر الطولي أقل من النوعين السابقين بنسبة توفير عن الجدار البيتوني الكتلتي تتراوح من 18% إلى 39% من أجل تغير ارتفاعات الجدار من 3m إلى 7.5m ، وبنسبة توفير عن الجدار البيتوني الظفري تتراوح من 12% إلى 27% من أجل تغير ارتفاعات الجدار من 3m إلى 7.5m .

2. تقدم الجدران الاستنادية بتربة مسلحة بالجيوريد بديلاً اقتصادياً بالمقارنة مع الأنواع التقليدية للجدران الاستنادية البيتونية المصبوبة في المكان رغم انتشارها الواسع. إضافة إلى ميزات الأخرى المتعددة مثل سرعة وسهولة التنفيذ و تصنيفها ضمن مستويات جمالية وبيئية أعلى من الأنواع الأخرى.

التوصيات:

1. يوصى مستقبلاً بإجراء دراسات تجريبية على نماذج بأبعاد حقيقية، وتوسيع مجال الدراسة من حيث ارتفاعات الجدران وأبعاد الواجهة الحجرية وميلانها ، تأثير خواص تربة التأسيس.
2. يوصى مستقبلاً بإجراء المزيد من الدراسات المقارنة مع الأنواع الأخرى من الجدران الاستنادية .
3. يمكن الاستفادة من نتائج هذا البحث و الأبحاث المستقبلية في هذا المجال في توضيح ميزات هذا النوع من الجدران بهدف استخدامها في الدراسات والمشاريع الهندسية المختلفة كبديل للأنواع الأخرى التقليدية.

المراجع :

1. AASHTO, "AASHTO LRFD Bridge Design Specification", AASHTO, Washington, D.C. 6th edition, 2012.
2. ALZAMORA, D. ; BARROWE, R. *Mechanically Stabilized Earth Walls on the Interstate Highway System*. TR NEWS 249, Federal Highway Administration, Washington, 2007, 32-33.
3. BOWLES, J. E. *Foundation analysis and design*, 5th ed., The McGraw-Hill Companies, Inc. 1997, 1230 pages.
4. BATHURST, R. J., WALTERS, D., VLACHOPOULOS, N., BURGESS, P. & ALLEN, T. M. *Full scale testing of geosynthetic reinforced walls*. ASCE Special Publication Denver. No. 103,2000, 201–217
5. BERG, R.R.; CHRISTOPHER, B.R.; SAMTANI, N.C. *Design of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes – Volume I*. Report Federal Highway Administration Washington, D.C. FHWA-NHI-10-024 , FHWA GEC 011-Vol I, 2009, 332 pages.
6. ELTON, D.; PATAWARAN, M. *Mechanically Stabilized Earth (MSE) Reinforcement Tensile Strength From Tests Of Geotextile Reinforced Soil*. Report to the Alabama Highway Research Center Frazier Parker, Jr., Director, Auburn university, 2005, 80 pages.
7. MURTHY, V. N. S. *Geotechnical Engineering: Principles and Practices of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, CRC Oress, 2002, 1050 pages.
8. NCMA, "Design Manual for Segmental Retaining Walls, 3rd Ed.," TR 127B, National Concrete Masonry Association (NCMA), Herndon, VA. 2009, 282 pages.
9. PLAXIS. 2005. "Plaxis Finite Element Code for Soil and Rock Analyses", Version 8.2, P.O. Box 572, 2600 AN Delft, The Netherlands.