

## دراسة تأثير تغير عمق طبقة تربة عالية القساوة ذات سماكة قليلة في أساسات سد على استجابته الديناميكية- (حالة سد زيزون)

الدكتور طلال عواد\*

مضر دنيا\*\*

(تاريخ الإيداع 18 / 1 / 2015. قَبْلُ للنشر في 15 / 3 / 2015)

### □ ملخص □

حدث انهيار سد زيزون في عام 2002 وهو سد ترابي يتوضع في الشمال الغربي من الجمهورية العربية السورية. وكان لهذه الحادثة وقع كبير في زيادة الوعي لأهمية و حساسية اجراء التحريات الجيوتكنيكية اللازمة لمواقع انشاء السدود خاصة وان هذه التحريات لم تعطى الاهتمام الكافي في مراحل السابقة اضافة الى الدراسة الزلزالية والظروف الجيولوجية لموقع السد. يقع سد زيزون في نطاق نظام فالق البحر الميت مما يشدد على اهمية تحليل استجابة موقع السد وبالتالي دراسة تأثير التطبيقات الليتولوجية في أساسات السد على استقراره في الحالة الديناميكية. هذا البحث يعنى بدراسة تأثير طبقة تربة عالية النفوذية تتميز بمواصفات ستاتيكية وديناميكية مختلفة عن طبقات التربة المحيطة بها وتتواجد على أعماق متغيرة ضمن أساسات السد كما في حالة سد زيزون مع الأخذ في الحسبان أن هذه الطبقة تصل إلى عمقها الأصغري عند الموقع الذي حصل فيه انهيار السد [Rehabilitation of Zeizoun dam and the appurtenant structures. 2005]. تم اعتماد برنامج GEO-STUDIO في إجراء الدراسة التحليلية لهذا البحث ، وهو برنامج جيوتكنيكي يعتمد على طريقة العناصر المحدودة والتحليل الرقمي للنماذج التحليلية للرشوحات والاجهادات والاستقرار بالحالتين الستاتيكية و الديناميكية. بينت نتائج التحليل الديناميكي ارتفاعا في منسوب خط الرشح في جسم السد، تضخيم في الاستجابة الديناميكية، زيادة في ضغط الماء المسامي المتولد بتأثير الحركة الزلزالية (excess pore water pressure) و انخفاضاً في عوامل الامان على الاستقرار، تمت دراسة و رصد كل النتائج السابقة من خلال بناء عدة نماذج تحليلية يختلف كل منها باختلاف عمق الطبقة النفوذة عالية القساوة ضمن اساسات السد.

**الكلمات المفتاحية:** استقرار المنحدرات، دراسة الرشوحات، Geo-Studio، عوامل الأمان، السدود الترابية، التحليل الديناميكي.

\* أستاذ مساعد - قسم الهندسة الجيوتكنيكية - كلية الهندسة المدنية - جامعة دمشق - سورية.  
\*\* طالب دراسات عليا (ماجستير) - قسم الهندسة الجيوتكنيكية الزلزالية - المعهد العالي للبحوث و الدراسات الزلزالية جامعة دمشق - سورية.

## Effect of a stiff thin Foundation soil layer's depth on dynamic response of an embankment dam

Dr. Talal Awad\*  
Modar Donia\*\*

(Received 18 / 1 / 2015. Accepted 15 / 3 / 2015)

### □ ABSTRACT □

In 2002, Zeyzoun Dam failure, that is an embankment dam located at the northwest of Syria, made a big Awareness of the effects of the lack of Geotechnical investigations and concern given to seismic design, geological conditions and location of the dam. Zeyzoun dam location, in the vicinity of the Dead Sea fault system, emphasizes the importance of analyzing the effects of lithological stratum in dam foundations on dam seismic stability. This paper is concerned with the influence of a high permeable soil layer that has different static and dynamic properties, and exists at different depths in dam foundation. Geo-studio software, a Geotechnical program that applies the finite element method and can consider analysis like seepage, dynamic analysis and slope stability, used to build and analyse numerical models. The results of dynamic analysis showed rising of phreatic line level in dam body, amplification in dam dynamic response, increasing in pore-water and excess pore water pressure and decreasing in stability factors of safety, along with decreasing of the thin layer depth.

**Key words:** Slope stability, Seepage, Geo-studio, Safety factor, embankment dam, dynamic analysis.

---

\*Assistant Professor, Department of Geotechnical Engineering, Faculty of Civil engineering, Damascus University, Syria.

\*\*Higher Institute for Earthquake Researches and Studies (HIERS), Damascus University, Syria.

**مقدمة:**

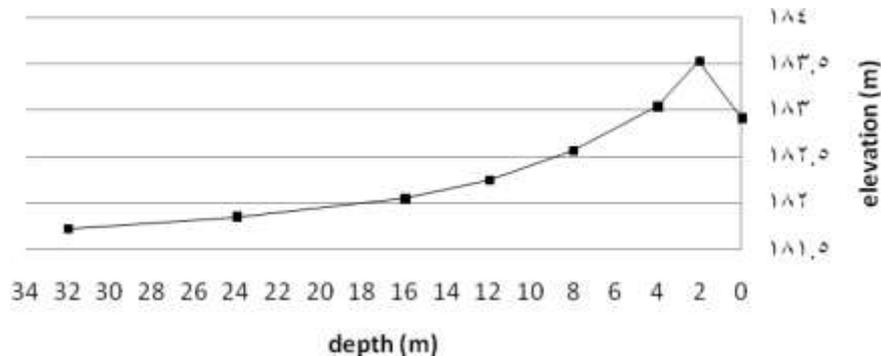
يسهم هذا البحث في زيادة الوعي لأهمية و حساسية اجراء التحريات الجيوتكنيكية الكافية لمواقع انشاء السدود ونظرا لأهمية الخصائص الفيزيائية لترب الأساسات في تحديد استجابة الموقع و بالتالي تأثيرها في تضخيم أو تخميد الهزة الزلزالية التي يتم تحديد تأثيرها في القاعدة الصخرية و بالتالي انعكاس هذا التأثير على استقرار السد في الحالة الديناميكية. يهدف البحث إلى تحديد تأثير وجود طبقة قليلة السماكة و عالية النفوذية و أكثر صلابة من طبقات التربة المحيطة على الرشوات في جسم السد و استقراره في الحالتين الستاتيكية و الديناميكية إضافة لتأثيرها في تغيير استجابة الموقع و بالتالي استجابة السد زلزاليا.

**منهجية البحث:**

تم في هذا البحث إجراء دراسة للرشوات في جسم السد و أساساته من أجل تغيير أعماق الطبقة القاسية ذات السماكة القليلة و الأكثر نفوذية (Layer3-1) و ذلك على الأعماق (32m-24m-16m-12m-8m-4m-2m-) (0m)، حيث بينت التحريات الجيولوجية تغير عمق هذه الطبقة تحت محور السد حيث يوجد العمق الأقل لهذه الطبقة عند مكان الانهيار بالتحديد. تم ادخال نتائج دراسة الرشوات و بالتحديد تأثير الضغط المسامي في التحليل الستاتيكي والديناميكي لحساب الاجهادات، وتم تحديد ضغط الماء المسامي الإضافي المتولد نتيجة للتحليل الديناميكي، وحساب التسارعات والانتقالات في جسم السد و أساساته، ثم تم حساب استقرار السد والحصول على عوامل الامان في الحالتين الستاتيكية والديناميكية. استخدمت طريقة العناصر المحدودة [Bathe, K-J. 1982] لإجراء كافة التحليلات. كما أجريت دراسة مقارنة بين النتائج الستاتيكية والديناميكية لكل من حالات الأعماق المختلفة للطبقة (Layer3-1) لظهور تأثير الخصائص الديناميكية للتربة وتأثير ضغط الماء المسامي المتولد ديناميكيا على عوامل الامان على الاستقرار. استغرق اعداد هذا البحث مدة أربعة أشهر في قسم الهندسة الجيوتكنيكية بالمعهد العالي للبحوث و الدراسات الزلزالية في جامعة دمشق. يتم التحليل الرقمي باستخدام نظرية العناصر المحدودة ثلاثية الأبعاد لكن لشريحة واحدة بسماكة 1 متر. يتم اعتماد تقسيمات شبكية للعناصر المحدودة بأبعاد تقارب 1 م بكل الاتجاهات وذات أشكال مربعة غالباً quadratic و عناصر مثلثية triangular عند الحاجة نتيجة للشكل الهندسي للمسألة، الشكل (3). تتم دراسة الرشوات ضمن حالة steady-state أي عندما يكون السد مليئ الحد التخزين الأعظمي و لفترة كافية لتأمين جريان مستقر ضمن جسم السد. يتم افتراض وجود سطح تصريف احتمالي على الوجه الخلفي للسد الشكل (3). سيتم تخصيص نموذج (مشبع-غيرمشبع) saturated-unsaturated للمواد أثناء تحليل الرشوات للمواد الواقعة فوق منسوب خط الرش ، ونموذج (مشبع) saturated للمواد الواقعة تحت منسوب خط الرش. تتم دراسة الرشوات ضمن المسألة منحل الافتراض أو ليعتقد بفرق الضاغظ بين الوجه الأمامي للسد و قاع بحيرته منجهة ، و بين الوجه الخلفي للسد و الأرض الواقعة أمام الوجه الخلفي للسد من جهة ثانية، الشكل (3). في تحليل الإجهادات الأولية ،تحدد الشروط الطرفية للمسألة بحيث تمنع الانتقالات الأفقية. في التحليل الديناميكي و لضمان عدم انعكاس الموجات الزلزالية من أطراف وحدود المسألة ولمنع التأثير السلبي لمحدودية نمذجة أبعاد المسألة على سلوكها الديناميكي ،تتم نمذجة مناطق غير منتهية infinite-region على أطراف المسألة، تؤمن هذه المناطق أبعاد افتراضية تساوي البعد بين طرف المسألة ومركزها وذلك على كمن جوانبها. تكون الشروط الحدية لطرفي المسألة الجانبيين عند التحليل الديناميكي بحيث تمنع الانتقالات الشاقولية و تسمح بالانتقالات الأفقية بينما تمنع الانتقالات الأفقية والشاقولية في الحدود السفلية للمسألة.

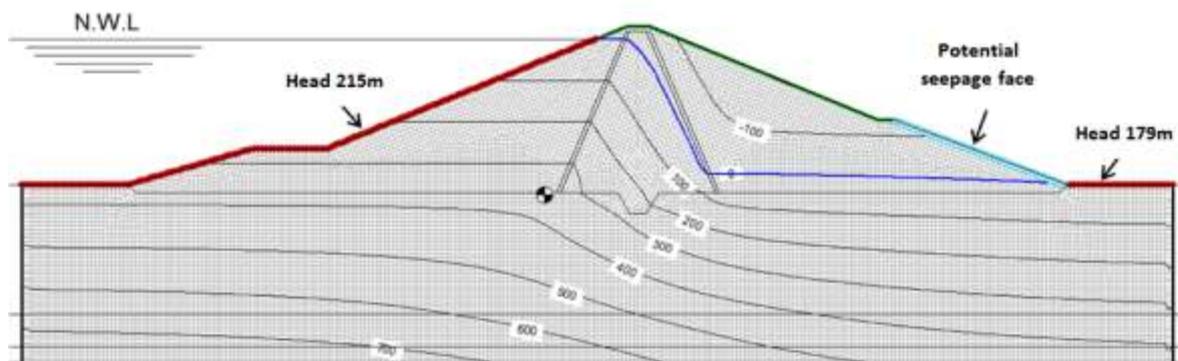


فيها الطبقة 1-3 layer عند العمق (0 متر) في التحليلات اللاحقة الستاتيكية والديناميكية عند دراسة تأثير ضغط الماء المسامي المتولد ديناميكيا .



الشكل (2)، تزايد منسوب خط الرش مع انخفاض عمق الطبقة 1-3 layer.

عندما ينخفض عمق الطبقة 1-3 layer من العمق (32 m) إلى العمق (2 m) يزداد منسوب خط الرش بمقدار (1.8 m) نتيجة لزيادة ضغط الماء المسامي في جسم السد و أساساته. الشكل (3) يبين خطوط تساوي ضغط الماء المسامي في الحالة التي تتواجد فيها الطبقة 1-3 layer عند العمق (32 m).



الشكل (3)، خطوط تساوي ضغط الماء المسامي (kpa) عند وجود الطبقة 1-3 layer بالعمق (32m).

## 2.1 دراسة الإجهادات

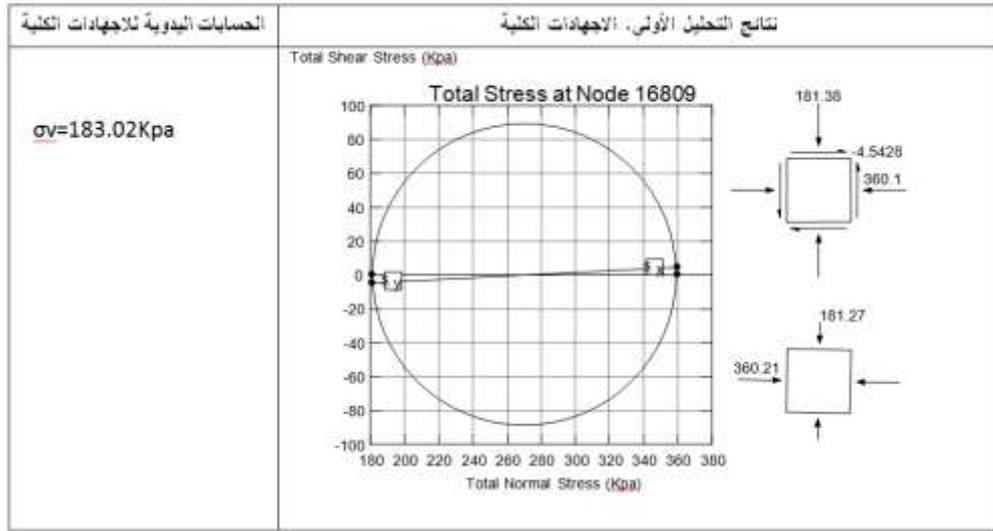
إن التحليل الأولي مهم جدا لتحديد توزيع الاجهادات الأولية الفعالة و الكلية في جسم السد و أساساته كما يستخدم التحليل الأولي كمرحلة أولى للتحليل النهائي . نتيجة لبساطة التحليل الأولي من المفيد و السهل التحقق من دقة النتائج التي يتم الحصول عليها و التي تثبت صحة التحليل الأولي و بالتالي التحليل النهائي الذي يبني عليه. من أجل الاجهادات الفعالة و الكلية على بعد 126 متر من محور السد باتجاه الوجه الأمامي و على عمق 10 متر تكون الاجهادات الكلية مساوية حصيلة مجموع الاجهادات الفعالة و ضغط الماء المسامي ، فنكون حصيلة الحساب اليدوي هي كالتالي. الاجهاد العامودي الفعال:  $\sigma_v = (17.7 - 9.81) \times 10 = 78.9 \text{ Kpa}$ . ضغط الماء المسامي الذي تم الحصول عليه من دراسة الرشوات :  $U = 104.12 \text{ Kpa}$ . الاجهاد الكلي العامودي:

$$\sigma_v = 78.9 + 104.12 = 183.02 \text{ Kpa.}$$

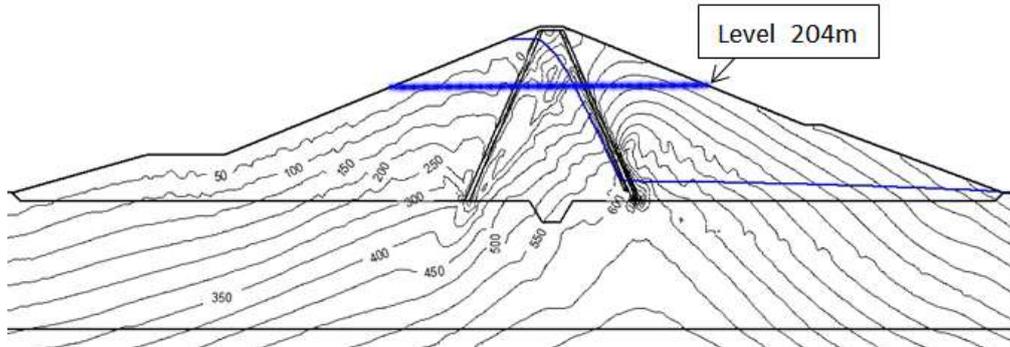
الجدول (1)، البيانات الجيو تكنولوجية

ضغظ التربة الجانبى عند الراحة $K_0$	الوزن الحجمي $\gamma$ $\text{KN/m}^3$	عامل بواسون $\nu < 0.49$	$\phi$ زاوية الاحتكاك الداخلي	C التماسك Kpa	عامل يونغ Kpa	
0.64	20.3	0.39	11.5°	73	24500	النواة الغضارية
0.31	20	0.238	29°	11.2	27500	مواشير الاستناد
0.25	20.6	0.2	28°	2	30000	الفلاتر
0.67	17.7	0.4	15.43°	39	13000	الطبقة Layer2-3
0.45	18.6	0.31	18°	23	32500	الطبقة Layer3-1

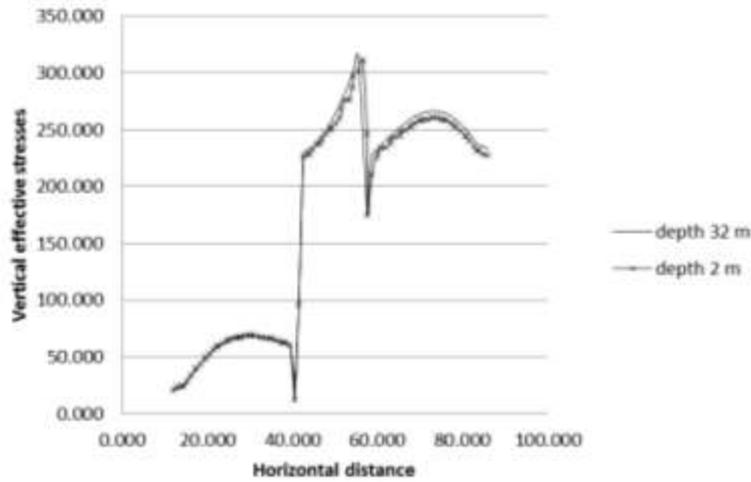
بالمقارنة بين الحسابات اليدوية و نتائج التحليل الأولي يتبين وجود فروقات بسيطة كما يبين الشكل (4) ، حيث تعود هذه الفروقات الى وزن السد الواقع بالقرب من المقطع المختار و الذي ينتقل عبر طبقات أساسات التربة. في التحليل الذي يعتمد السلوك المرن-اللدن للمواد و من أجل حساب الاجهادات الفعالة العمودية ، يتم طرح ضغط الماء المسامي من الاجهاد الكلي العامودي و ذلك عند الحساب تحت منسوب خط الرشح ( $\sigma' = \sigma_t - u$ ) ، و يتم اضافة ضغط الماء المسامي الى الاجهادات الكلية العمودية عند الحسابات فوق منسوب خط الرشح ( $\sigma' = \sigma_t - (-u)$  ) . كما يبين الشكل (5) و الذي يوافق العمق (depth 32m) عند مقطع أفقي يمر عند المنسوب (204m). بإهمال الاجهادات الفعالة العمودية في المدى (x=40  $\Rightarrow$  60) m و التي تخص مادة أخرى هي النواة الغضارية ذات وزن حجمي مختلف، و الاكتفاء بالمقارنة للاجهادات في مادة مواشير استناد السد التي تكون بالحالة المشبعة عند الوجه الامامي للسد و بالحالتين المشبعة وغير المشبعة عند الوجه الخلفي، يمكن ملاحظة ان الاجهادات الفعالة عند المنسوب (204m) هي اكبر فوق منسوب خط الرشح منها تحت خط الرشح بما يتوافق مع الشرح السابق. بمقارنة البيانات الخاصة بالاجهادات الفعالة العمودية عند المنسوب 204 متر للتحليل الستاتيكي للاجهادات و من أجل حالتين مختلفتين لعمق لطبقة (3-1) layer هما العمقين (32m-2m)، يظهر بأن الاجهادات الفعالة العمودية قبل (x=40) لا تتغير مع تغير عمق الطبقة (3-1) layer لكن بعد (x=68) تتخفف الاجهادات الفعالة العمودية مع انخفاض عمق الطبقة (3-1) layer، الشكل (6). إن تغير الاجهادات الفعالة العمودية مع تغير العمق سيؤثر في عوامل امان الاستقرار الستاتيكي للوجه الخلفي للسد كما ستبين التحليلات التالية الخاصة بالاستقرار الستاتيكي.



الشكل (4)، دائرة مور عند العمق المدروس.



الشكل (5)، الاجهادات الفعالة العمودية عند المنسوب 204 متر، ( التحليل الستاتيكي للاجهادات)

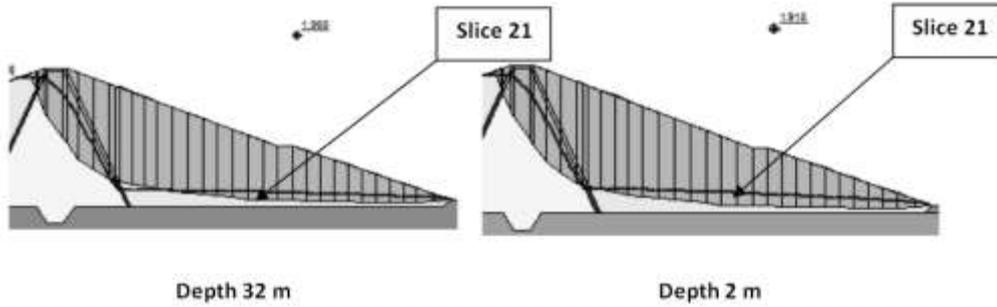


الشكل (6)، تغير الاجهادات الفعالة العمودية (kpa) عند المنسوب 204متر مع تغير المسافة الأفقية (m) من نقطة بداية المقطع عند الوجه الأمامي للسد (من أجل حالتين لعمق 1-3 layer و 2 متر و 32 متر).

### 3.1 دراسة الإستقرار

إن الهدف من هذا البحث هو تحديد تأثير تغيرات منسوب خط الرشح و الناتج عن انخفاض عمق الطبقة (layer 3-1) في عوامل الامان الناتجة من دراسة الاستقرار. لذلك فإن تراكم اي تأثير لعوامل اخرى مثل مقاومة

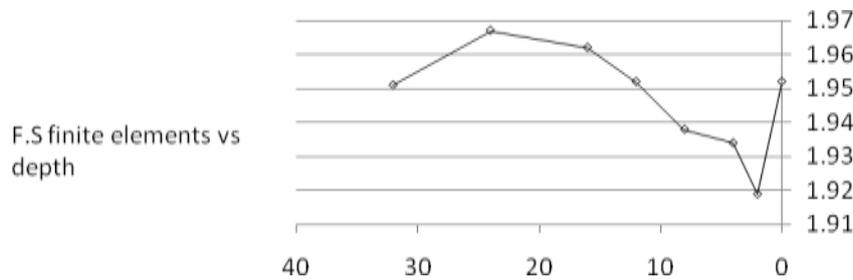
القص للطبقة (layer 3-1) في حال مرور سطح الانزلاق ضمن هذه الطبقة ، يمكن ان يؤدي الى نتائج متداخلة لا تمكن من رصد التأثير المطلوب لتغيرات منسوب خط الرشح خاصة اذا اخذنا في الحسبان ان مقاومة القص للطبقة (layer 3-1) هي اكبر من مقاومة القص لباقي طبقات التربة (layer 2-3). و لتجنب أي نتائج غير واضحة او ناتجة عن عوامل متداخلة تم تحديد سطح انزلاق ثابت يمر عبر جسم السد و فوق اساساته حيث سيتم حساب عوامل الامان لاستقرار الوجه الخلفي للسد عند سطح الانزلاق الثابت و ذلك من اجل اعماق مختلفة للطبقة (layer 3-1) و من أجل عدة طرق في التحليل [Hasani, H., Mamizadeh, J., and Karimi, H. 2013]. كما ذكر سابقا في دراسة الاجهادات فان الاجهادات العامودية الفعالة تحسب كنتيجة من الاجهادات الكلية العامودية و ضغط الماء المسامي،  $(\sigma' = \sigma_t - u)$  تحت منسوب خط الرشح،  $(\sigma' = \sigma_t - (-u))$  فوق منسوب خط الرشح. و هذا يعني بأن القيم الموجبة لضغط الماء المسامي تحت منسوب خط الرشح لديها تأثير زالق مطبق على سطح الانزلاق المدروس. من ناحية اخرى فان القيم السالبة لضغط الماء المسامي (السحب) لديها تأثير مثبت على الكتلة المنزلقة الواقعة فوق منسوب خط الرشح. عندما ينخفض عمق الطبقة (layer 3-1) يرتفع منسوب خط الرشح كما تبين في الدراسة السابقة للرشحات و بما ان سطح الانزلاق قد تم تثبيته لنقادي اي تأثيرات متداخلة تعيق الهدف الاساسي للبحث و هو رصد تأثير تغيرات منسوب خط الرشح ، فإن ارتفاع منسوب خط الرشح يعني ان قسما اكبر من الكتلة المنزلقة تصبح تحته كما يظهر من الشكل (7).



الشكل (7)، الكتلة المنزلقة عندما تتواجد الطبقة (layer 3-1) على كل من العمقين 2متر و32متر حيث يبدو قسما اكبر من هذه الكتلة تحت خط الرشح عند حالة العمق 2 متر.

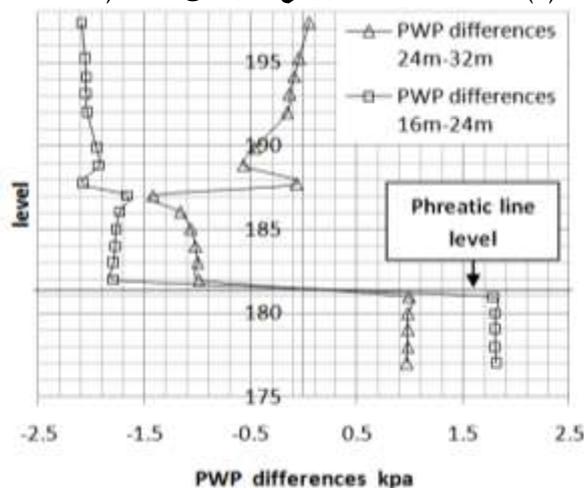
ينعكس ارتفاع منسوب خط الرشح على الكتلة المنزلقة بزيادة في القوى الزالقة (القوى الناتجة عن ضغط الماء المسامي) وانخفاضا في القوى المثبتة (مقاومة القص المماسية على السطوح الجانبية بين الشرائح و مقاومة القص عند القاعدة و القوى العامودية على قاعدة الشرائح). إن التغيرات في القوى المطبقة على شرائح الكتلة المنزلقة والناتجة عن نقصان عمق الطبقة (layer 3-1) تؤدي الى تخفيض عوامل الامان للاستقرار . يبين الشكل (8) أن المخطط البياني لعوامل الامان على الاستقرار و المحسوبة بطريقة العناصر المحدودة يزداد عندما ينخفض عمق الطبقة من 32متر الى 24متر، ثم يعود المخطط البياني للانخفاض تدريجيا مع انخفاض عمق الطبقة (layer 3-1). فعندما ينخفض عمق الطبقة (layer 3-1) من 32 مترا الى 24 مترا يحدث تغير بسيط جدا يمكن ملاحظته في منسوب خط الرشح لكن عندما ينخفض عمق الطبقة (layer 3-1) من 24 متر الى 16 متر فإن التغير في منسوب خط الرشح تكون أكبر الشكل (2). مما سبق يتبين بأنه من المهم مقارنة الفروقات في ضغط الماء المسامي PWP (القيم الموجبة لضغط الماء المسامي تحت خط الرشح)، و السحب ( القيم السالبة لضغط الماء المسامي فوق خط الرشح) من أجل

حالة تغير العمق من 32 متر الى 24 متر ( $PWP_{32m}-PWP_{24m}$ ) و من العمق 24 متر الى 16 متر ( $PWP_{24m}-PWP_{16m}$ )، وذلك عند مقطع عامودي يمر عبر الشريحة 21 ، الشكل (7).



Depth m

الشكل (8)، عوامل الأمان للاستقرار مع تغير عمق الطبقة (layer 3-1)



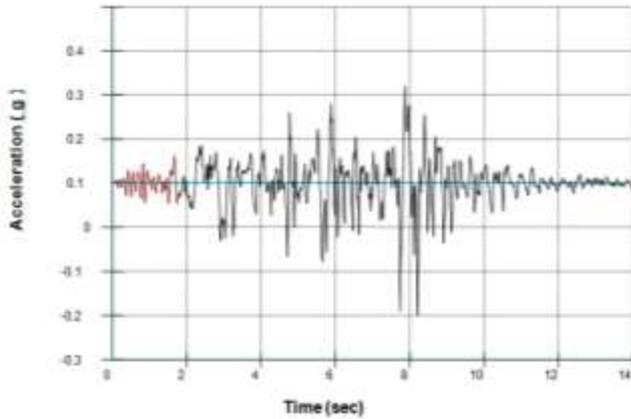
الشكل (9)، الفروقات في ضغط الماء المسامي مع المنسوب (m)، لحالتين لتغير العمق ( $32m-24m$ ) و حالة ( $24m-16m$ ).

يبين الشكل (9) أن قيم ( $PWP_{32m}-PWP_{24m}$ ) هي أقل من قيم ( $PWP_{24m}-PWP_{16m}$ ) تحت منسوب خط الرشح، و هذا يعني أن الزيادة في القيم الزلقة في حالة ( $PWP_{32m}-PWP_{24m}$ ) هي أقل منها في حالة ( $PWP_{24m}-PWP_{16m}$ )، بينما يحدث العكس تماما فوق منسوب خط الرشح، و هذا هو السبب في كون عوامل الأمان F.S للاستقرار تزداد عند انخفاض العمق من 32متر الى 24 متر بينما تعود للتناقص باضطراد مع تناقص عمق الطبقة (layer 3-1).

## 2. التحليل الديناميكي

إن سد زيزون المدروس في هذا البحث يتوضع في الشمال الغربي من الجمهورية العربية السورية حيث يعبر فائق البحر الميت من الجنوب و باتجاه الشمال. تظهر الدراسات الزلزالية و التكتونية لفائق البحر الميت بأنه فائق عكسي غير مستقر ظهر نشاطه من خلال زلازل مدمرة حدثت عبر التاريخ في هذه المنطقة. بحسب خريطة تساوي التسارع الزلزالي الأرضي الصادرة عن المؤسسة العامة للجيولوجيا و الثروة المعدنية فإن سد زيزون يقع في منطقة تتراوح ذروة تسارعها الزلزالي الأرضي بين 0.1g و 0.3g عند زمن عائد 50 و 100 عام.

## 1.2 الهزة الزلزالية المطبقة



الشكل (10)، السجل الزمني للهزة الزلزالية المطبقة.

كما ذكر سابقاً، تتراوح ذروة التسارع الزلزالي الأرضي (PGA, Peak Ground Acceleration) في موقع السد بين 0.1g و 0.3g بحسب زمن العائد، بالتالي سيتم استخدام  $PGA=0.3g$  أعظمية في التحليل الديناميكي. الشكل (10) يبين التسجيل الزلزالي المستخدم في التحليل الديناميكي بذروة تسارع زلزالي  $0.3g$  و بزمن 14 ثانية و تم تطبيق هذه الهزة في قاعدة النماذج التحليلية و التي تمثل طبقة القاعدة الصخرية بحسب البرنامج المعتمد.

## 2.2 البيانات و التوابع المستخدمة في الدراسات التحليلية الديناميكية

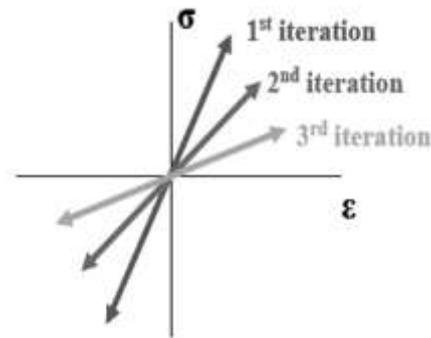
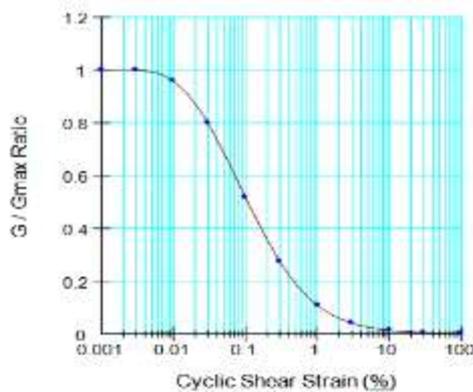
إضافة الى البيانات اللازمة لاجراء التحليل الستاتيكي، الجدول (1)، فإن التحليل الديناميكي يستلزم المزيد من الخصائص و البارامترات الجيو تكنولوجية للتربة ، الجدول (2). إن هذه البارامترات ضرورية لنمذجة سلوك التربة في الحالة الديناميكية حيث اعتمد السلوك المكافئ الخطي (equivalent linear mode) لنمذجة المواد ديناميكياً. إن النموذج التحليلي المكافئ الخطي شبيهه بالنموذج المرن-الخطي لكن الفرق بين النموذجين أن صلابة التربة (soil stiffness) في النموذج المكافئ الخطي تعرف بواسطة معامل القص الديناميكي الأعظمي ( Dynamic shear modulus) و الإجهاد الديناميكي المطبق (dynamic stress)، حيث تتغير هذه العوامل باستمرار خلال الهزة الزلزالية مع الافتراض بأن التربة ستخضع قساوتها استجابة للتشوه النسبي الدوري الناتج عن القص ( cyclic shear strain modulus computed ) و الذي يتم حسابه باستمرار خلال الهزة الزلزالية. تعرف هذه العملية كنسبة مئوية من معامل القص الديناميكي الأعظمي ( $G_{max}$ ) و يحددها تابع يدعى بتابع تخفيض معامل القص الديناميكي ( G reduction function).

الجدول (2)، البيانات الجيو تكنولوجية الديناميكية

المادة	نموذج التحليل	عامل التخامد	قرينة اللدونة	عامل القص الديناميكي الأعظمي $G_{max}Kpa$
النواة الغضارية	المكافئ الخطي Equivalent linear	تابع (منحني)	26.5	13670
مواشير الاستناد	المكافئ الخطي Equivalent linear	تابع (منحني)	20.2	11106
الفلاتر	المكافئ الخطي Equivalent linear	تابع (منحني)	20	1500

4643	25.59	تابع (منحني)	المكافئ الخطي Equivalent linear	الطبقة Layer 2-3
12405	11.29	تابع (منحني)	المكافئ الخطي Equivalent linear	الطبقة Layer3-1
4643	-	ثابت (0.05)	المرن الخطي Linear elastic	الطبقة Layer 2-3 infin
12405	-	ثابت (0.05)	المرن الخطي Linear elastic	الطبقة Layer 3-1 infin

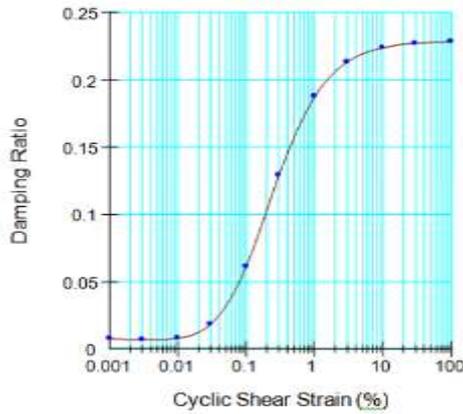
يبين الشكل (11) التابع الذي يحدد عملية تعديل معامل القص الديناميكي (G) و قيمته المعدلة التي تدخل في كل عملية حسابية تكرارية (iteration) حيث تستمر هذه العملية حتى تصل قيمة G المعدلة الى حدود التسامح المحددة مسبقا، الشكل (12). قام (Ishibashi and Zhang 1993) بتطوير معادلة لتقدير نسبة معامل القص الديناميكي اللحظي G إلى معامل القص الديناميكي الأعظمي Gmax (G/Gmax) ، حيث يقوم البرنامج المعتمد في هذا البحث بتكوين هذا التابع تلقائيا بالاعتماد على هذه المعادلة.



الشكل (12)، كيفية عمل النمط المكافئ الخطي الذي يخفض قيمة G عند كل عملية حسابية تكرارية. الشكل (11)، تابع تخفيض معامل القص الديناميكي G و المخصص للطبقة layer 3-1.

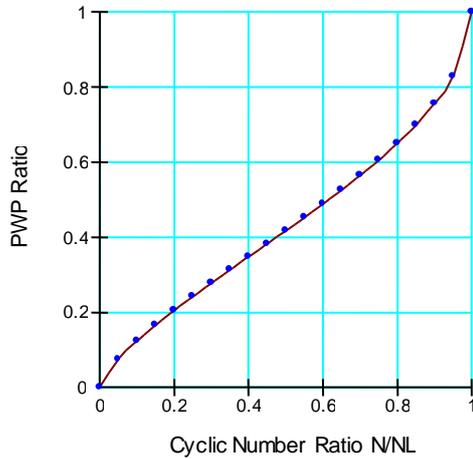
تم تحديد عامل تخامد كقيمة ثابتة و تخصيصه للتحليل الخطي المرن و ذلك بالنسبة لطبقات التربة في اساسات السد من النوع layer3-1infi و layer2-3infi كما هو مبين بالجدول (2)، حيث إن هاتين الطبقتين هما امتداد للطبقتين layer3-1 و layer2-3 و لديهما نفس الخصائص الجيوتكنيكية الستاتيكية الا أن نمذجة حدود لا نهائية على اطراف النماذج التحليلية لمنع ارتداد الموجات الزلزالية في التحليل الديناميكي يستلزم انشاء مناطق لا نهائية (infinite regions) على اطراف النماذج و هذه المناطق يجب نمذجتها بطريقة العناصر اللامحدودة ( infinite elements method) التي تعتمد السلوك المرن الخطي للمادة الذي يعتبر عامل التخامد أحد مدخلاته كقيمة ثابتة حصرا [Bettess, P 1992]. أما من أجل طبقات تربة الاساسات المقابلة لها و التي توجد داخل النموذج تحت جسم السد و التي تتم نمذجتها بهدف دراسة تأثير استجابة الموقع الديناميكية و تأثيرها في السد و كذلك بالنسبة لمواد جسم السد التي تحدد استجابته الزلزالية فيجب اعتماد السلوك المرن-اللدن للمادة و النمذجة بطريقة العناصر المحدودة و التي يمكن ان يتم ادخال التخامد في حساباتها كتابع لتشوه القص النسبي الدوري (cyclic shear strain). قام [Ishibashi and Zhang, 1993] بتطوير معادلة لتقدير تابع عامل التخامد حيث إن مدخلات هذه المعادلة هي

قرينة اللدونة (PI) و عامل تخفيض معامل القص الديناميكي (G/Gmax)، الشكل (13)، يمكن أن يتولد نتيجة للهزة الزلزالية ضغط ماء مسامي اضافي (Excess pore-water pressure) في المواد الخشنة (granular materials) و هي مواد مواشير الاستناد. يوجد تابعان اساسيان يلزمان لحساب ضغط الماء المسامي المتولد الاضافي و هما تابع ضغط الماء المسامي و تابع الرقم الدوري (cyclic number function) و الذي يرمز له بالرمز (N) و هو تابع الرقم المكافئ الدوري المتجانس (a function of the equivalent number of uniform cycles N) و يحدد بناء على مقدار الهزة الزلزالية (earthquake magnitude)، بحسب [Kramer 1996] . P



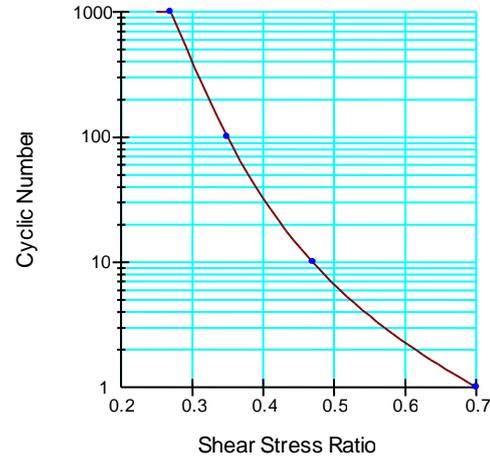
الشكل (13)، تابع التخامد المخصص للطبقة 1-3 layer.

مع الاخذ في الحسبان ان هذه التوابع يمكن تحديدها حصرا في التربة الخشنة القابلة للتميع في ظروف ديناميكية معينة الشكل (15).



الشكل (14)، تابع ضغط الماء المسامي الاضافي المتولد ديناميكيا لمواد مواشير الاستناد.

و [DeAlba et al 1975] بإيجاد معادلة خاصة لتقدير ضغط الماء المسامي المتولد، الشكل (14). كما قام [Seed and Lee 1965] بتكوين تابع الرقم الدوري (cyclic number function) بالاعتماد على CSR و هو عامل اجهاد القص الدوري (CSR cyclic shear stress ratio) حيث أن عامل اجهاد القص الدوري هو علاقة بين عامل اجهاد القص والعدد اللازم لحدوث التميع في تربة معينة،



الشكل (15)، تابع الرقم الدوري لمواد مواشير الاستناد.

في مايلي معادلة الحركة النازمة للاستجابة الديناميكية للنموذج المبني بحسب نظرية العناصر المحدودة:

$$\{M\} \{\ddot{a}\} + \{D\} \{\dot{a}\} + \{K\} \{a\} = \{F\}$$

حيث:

[M]	مصفوفة الكتلة.
[D]	مصفوفة التخماد.
[K]	مصفوفة القساوة.
{F}	شعاع القوى المتزايدة النقطية المطبقة.
{ $\ddot{a}$ }	شعاع التسارع النقطي.
{ $\dot{a}$ }	شعاع السرعة النقطية.

إن شعاع القوى المتزايدة النقطية المطبقة يتكون مما يلي:

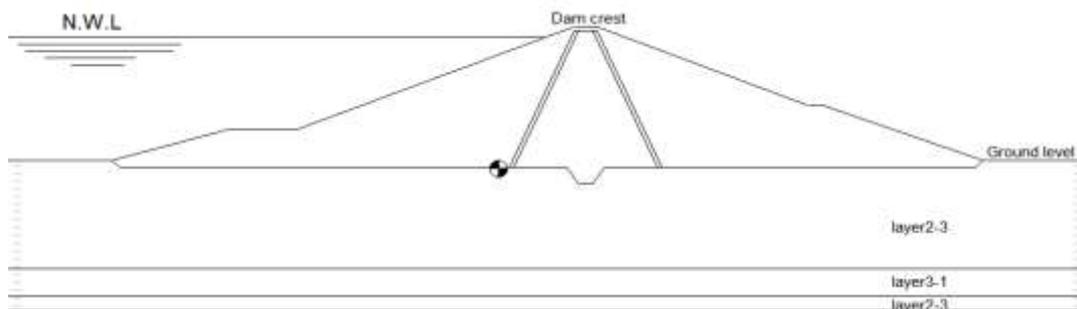
$$\{F\} = \{F_b\} + \{F_s\} + \{F_n\} + \{F_g\}$$

حيث:

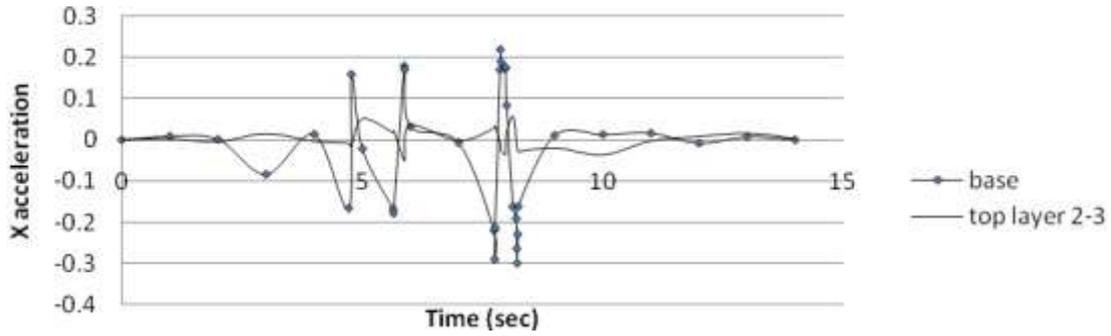
{F <sub>b</sub> }	حمولات الوزن الذاتي المتزايدة
{F <sub>s</sub> }	الحمولات الناتجة عند الضغوطات المتزايدة السطحية و المطبقة على حدود النموذج
(=) dL (N) T dL =	صيغة المعادلة من أجل تحليل ثنائي البعد
{F <sub>n</sub> }	القوى المركزة المتزايدة النقطية
{F <sub>g</sub> }	القوى الناتجة عن الحمولة الزلزالية.

### 3.2 دراسة تأثير طبقات تربة الأساسات (foundations stratum) في السلوك الديناميكي

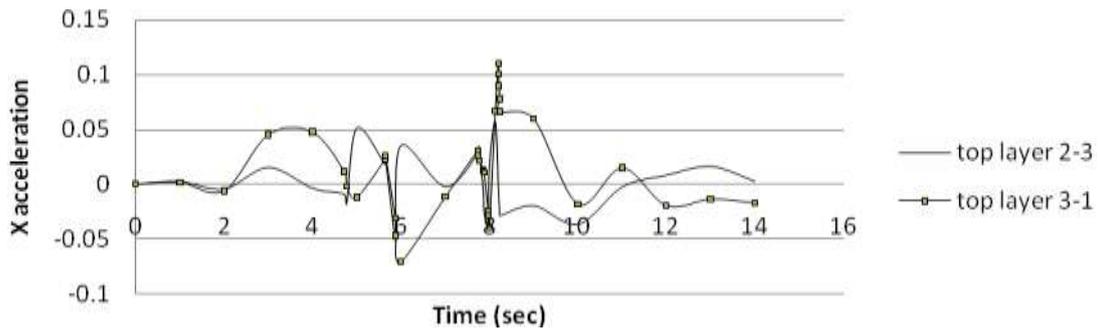
تمثل مواد تربة الأساسات و جسم السد خصائص ديناميكية مختلفة ، و يحدد البرنامج المستخدم Geo-studio بأن الخصائص الديناميكية الأساسية هي عامل اجهاد القص و عامل التخماد. إن العمق المتغير للطبقة 1-3 الشكل (1)، قد يؤثر على استجابة الموقع و كذلك جسم السد عند حدوث الهزة الزلزالية. في هذه الفقرة ستم مقارنة التسارعات الزلزالية الأفقية (earthquake horizontal acceleration) عند مناسيب مختلفة و ذلك عندما نثبت عمق الطبقة 1-3 عند العمق 32 متر ، الشكل (16) و الشكل (17). تجدر الإشارة الى ان الاستجابة تتم فلترتها بواسطة البرنامج بحيث لا يتم اعطاء القيم لكل اللحظات الزمنية للهزة الزلزالية و يتم الاكتفاء بقيم الاستجابة ذات التغيرات و القيم الملحوظة لذلك تظهر منحنيات الاستجابة لمساء. إن حساب عامل التضخيم (Amplification factor) عند عدة مناسيب سيشكل مفهوما واضحا للسلوك الديناميكي لكل طبقة و المادة المكونة لها.



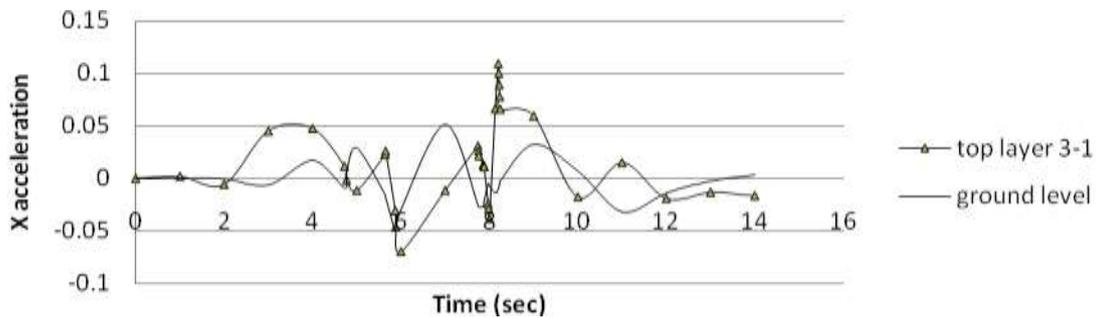
الشكل (16)، النموذج التحليلي عندما يكون عمق الطبقة 1-3 ثابتا عند العمق 32 متر.



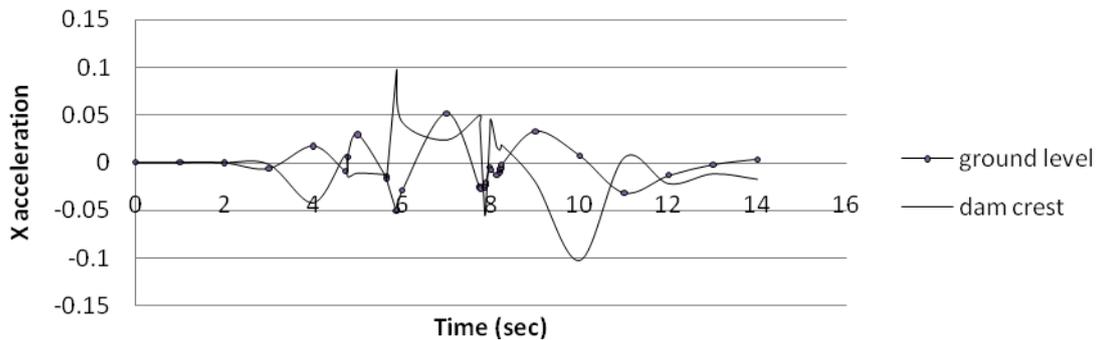
(a)، المقارنة بين منسوب القاعدة الصخرية التي تشكل قاعدة النموذج و منسوب أعلى الطبقة 2-3 layer2-3 .



(b)، المقارنة بين منسوب أعلى الطبقة 2-3 layer2-3 و منسوب أعلى الطبقة 3-1 layer3-1 .



(c)، المقارنة بين منسوب أعلى الطبقة 3-1 layer3-1 و منسوب سطح الأرض.



(d)، المقارنة بين منسوب سطح الأرض و قمة السد.

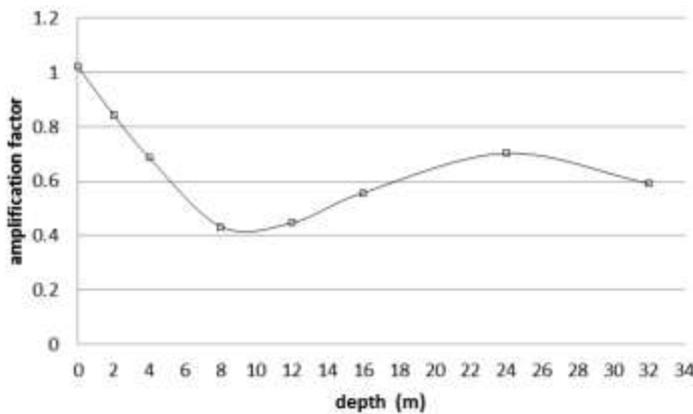
الشكل (17)، مقارنة التسارعات الزلزالية الأفقية.

بحساب عامل التضخيم لكل حالة مبينة في الأشكال (17- a,b,c,d) و هو النسبة بين القيمة الاعظمية للتسارع الزلزالي الاقفي في أعلى منسوب للمقارنة إلى قيمته عند أسفل منسوب المقارنة و ذلك لكل حالة على حدة يكون مفهوم واضح لاستجابة كل طبقة من طبقات تربة اساسات السد بالاضافة الى جسم السد نفسه.

الجدول (3)، عوامل التضخيم.

حالة المقارنة	(17)-a	(17)-b	(17)-c	(17)-d
عامل التضخيم $A_f$	0.192	1.904	0.472	1.978

يبين عاملا التضخيم للحالتين (17)-a و (17)-c والذان يتعلقان بسلوك الطبقة 3-2 layer أن هذه الطبقة لديها تأثير مخمد بينما تبين الحالة (17)-b و المتعلقة بسلوك الطبقة 1-3 layer أن لديها تأثير مضخم. إن الحالة (17)-d و المتعلقة بجسم السد تبين تأثيره المضخم و هو ينسجم منطقيا مع شكل جسم السد المرتفع عن سطح الأرض. إن هذه النتائج تتوافق مع صلابة التربة و المعبر عنها بعامل القص الديناميكي الأعظمي الموضح بالجدول (2) و الذي يبين أن الطبقة 1-3 layer لديها القساوة الأعلى ضم أساسات السد. إن التأثير المضخم المحتمل لانخفاض عمق الطبقة 1-3 layer سيظهر تأثيره بالتسارع الزلزالي الاقفي عند قمة السد و بالتالي يمكن رصد تأثير التغيرات الليتولوجية لتربة أساسات السد من خلال النسبة بين التسارع الزلزالي الاقفي عند قمة السد و التسارع الزلزالي الاقفي عند القاعدة الصخرية للاساسات و ذلك من أجل جميع حالات الشكل (17).

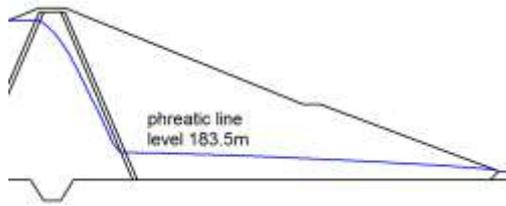


الشكل (18)، عوامل التضخيم مع تغير عمق الطبقة 3-1 Layer

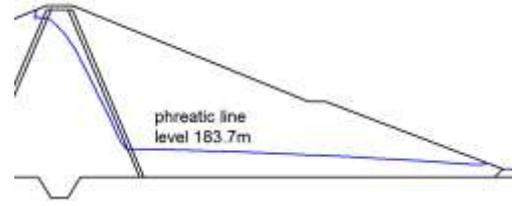
يبين الشكل (18) أن عامل التضخيم الاكبر ( $A_{fac}=1.02$ ) يكون في حالة العمق 0 متر اي عندما يكون أعلى الطبقة 1-3 layer عند سطح الأرض. يبين الشكل (18) أن الموقع لديه تأثير عام مخمد على الهزة الزلزالية باستثناء حالة العمق 0 متر اي عندما يكون اعلى الطبقة 1-3 layer عند منسوب سطح الأرض.

#### 4.2 دراسة تأثير ضغط الماء المسامي الإضافي المتولد ديناميكيا.

كما تم توضيحه أعلاه فعند الشروط الزلزالية سيتولد ضغط ماء مسامي اضافي و الذي سيؤدي بدوره الى ارتفاع منسوب خط الرشح و ذلك لكل حالة من حالات عمق الطبقة 1-3 Layer . و كما ذكر في الفقرة (1.1) فإن حالة العمق (2m) ينتج عنها أعلى منسوب لخط الرشح في الحالة الستاتيكية، لذلك فإن مقارنة منسوب خط الرشح لحالة العمق (2m) بين الحالتين الستاتيكية و الديناميكية سيبين تأثير ضغط الماء المسامي الاضافي المتولد ديناميكيا (excess PWP) على ارتفاع منسوب خط الرشح في جسم السد و ذلك عند لحظة انتهاء الزلزال، الشكل (19).



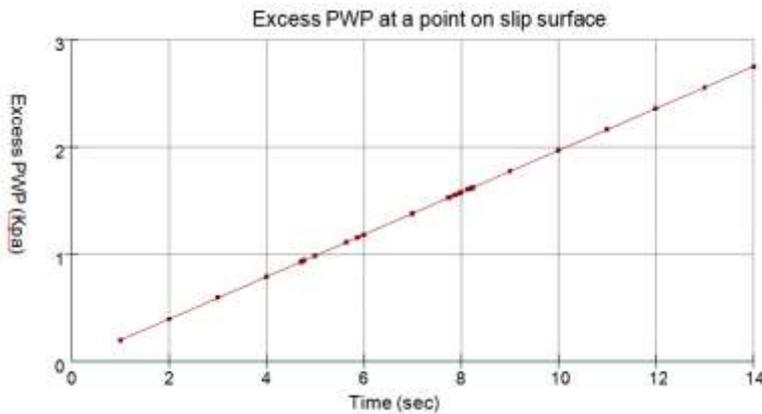
(a)، الحالة الستاتيكية.



(b)، الحالة الزلزالية.

الشكل (19)، منسوب خط الرشح في جسم السد.

بما أن سطح الانزلاق قد تم تثبيته سابقاً لأغراض هذا البحث ، كما تم توضيحه في الفقرة (3.1)، يمكن تحديد نقطة ثابتة على سطح الانزلاق لدراسة (excess PWP) عندها خلال الهزة الزلزالية و بالتالي تحديد اللحظة الزمنية التي يصل فيها إلى قيمته الاعظمية، يبين الشكل (20) انه يبلغ قيمته الاعظمية عند نهاية الزلزال (الزمن 14 Sec). بحسب منهجية البرنامج المستخدم يتم حساب ضغط الماء المسامي الاضافي المتولد ديناميكياً بحساب الفروقات بين ضغط المسامي في نهاية الهزة الزلزالية و ضغط الماء المسامي الستاتيكي، و تتعلق هذه الحسابات بمواصفات المواد، الشكلين (14)، (15). و بالتالي ينعكس انخفاضاً في الاجهادات الفعالة. مثلاً و من أجل نقطة واقعة تحت منسوب خط الرشح و قبل بداية الهزة الزلزالية ( الزمن 0 Sec ) و في الحالة الستاتيكية يكون  $PWP=34.13$  Kpa



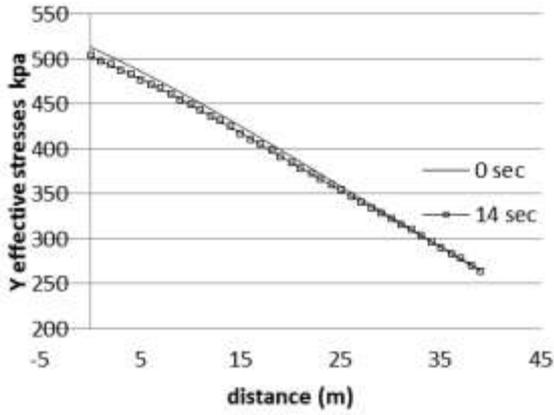
أما في نهاية الهزة الزلزالية، الزمن 14 Sec يكون  $PWP=36.88$  Kpa بالتالي يكون ضغط الماء المسامي الاضافي هو

$$PWP=36.88-34.11=2.77$$

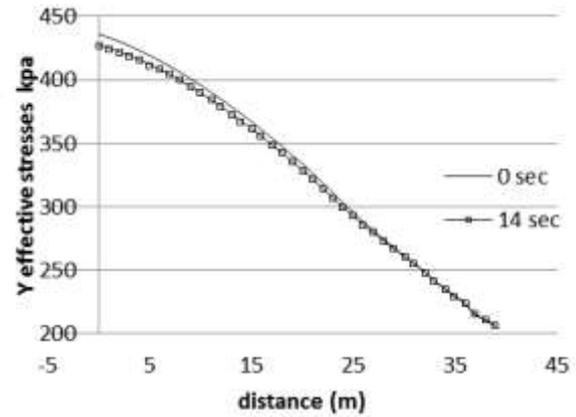
Kpa كما هو موضح في الشكل (20) و هي تعد زيادة طفيفة نسبياً. يعني ما ذكر سابقاً أن الاجهادات الفعالة ستتناقص فوق منسوب خط الرشح بسبب نقصان ضغط السحب،

الشكل (20)، ضغط الماء المسامي الاضافي في نقطة ثابتة على خط الرشح خلال الهزة الزلزالية.

وستنخفض تحت منسوب خط الرشح بسبب زيادة ضغط الماء المسامي، الشكل (21).



(a)، عندما يقع المقطع تحت منسوب خط الرشح.

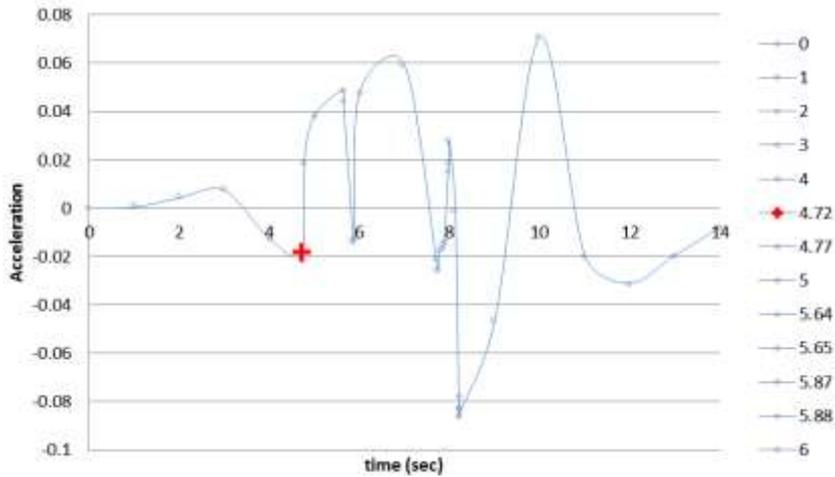


(b)، عندما يقع المقطع فوق منسوب خط الرشح.

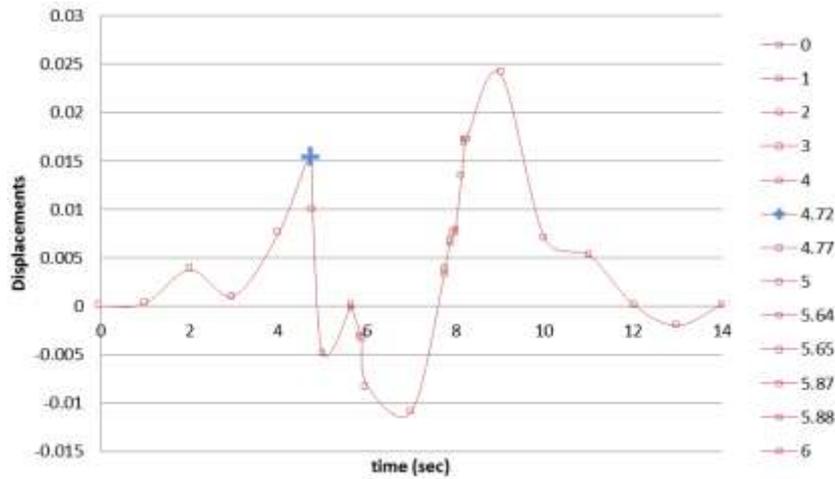
الشكل (21)، مقارنة بين الاجهادات الفعالة في الحالتين الستاتيكية و الزلزالية في مقطع تحت الوجه الخلفي لجسم السد.

### 5.2 دراسة الاستقرار في الحالة الزلزالية.

كما ذكر سابقا فإن التأثير الأكبر للتطبقات الليتولوجية يكون عندما تبلغ الطبقة 1-3 layer العمق 0 متر و 2 متر . إضافة لذلك فإن القيمة الأكبر لضغط الماء المسامي الاضافي هي في حالة الطبقة 1-3 layer عند العمق 2 متر، لذلك فإن حالة العمق 2 متر هي مناسبة لمقارنة السجل الزمني (Time history) للتسارعات و السجل الزمني للانتقالات بهدف اختيار اللحظة الزمنية التي يمكن أن ينشأ عنها عامل امان الاستقرار الأصغري ، يبين الشكل (22) أن هذه اللحظة هي 4.72 ثانية. تم اجراء تحليلين لدراسة الاستقرار لكل حالة عمق ، الأول يتضمن تأثير ضغط الماء المسامي الاضافي بينما لا يتم تضمينه في التحليل الثاني. يبين الجدول (3) مقارنة بين القوى المثبتة و الزالقة المطبقة على الشريحة 21 المبينة بالشكل (7) لكل من هذين التحليلين، حالة العمق 2 متر.



(a)، السجل الزمني للتسارعات.



(b)، السجل الزمني للانتقالات

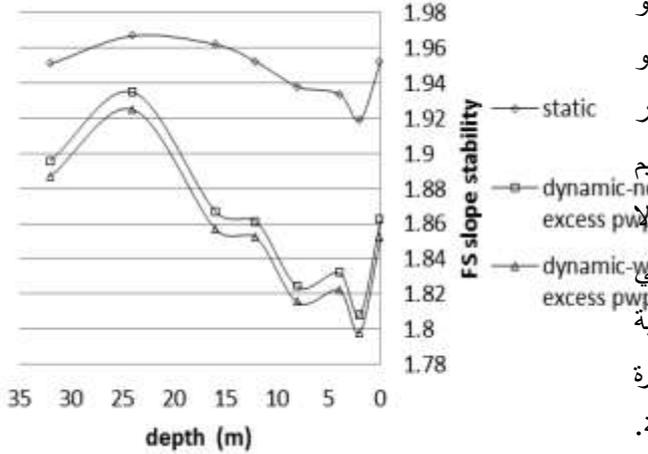
الشكل (22)، السجل الزمني للتسارعات و الانتقالات عند المصطبة الواقعة على الوجه الخلفي للسد - حالة العمق 2 متر.

الجدول (4)، مقارنة القوى المطبقة على الشريحة 21.

مع تضمين ضغط الماء المسامي الإضافي	حالة عدم تضمين ضغط الماء المسامي الإضافي	
1.7977	1.8078	عامل الأمان لاستقرار السد
2.2703	2.2866	عامل أمان استقرار الشريحة 21
35.263 Kpa	32.492 Kpa	ضغط الماء المسامي
142.15 kN	130.98 kN	قوى ضغط الماء المسامي
860.02 kN	866.21 kN	قوى القص القاعدية المقاومة Base Shear Res. Force
213.34 Kpa	214.88 Kpa	اجهاد القص القاعدي المقاوم Base Shear Res. Stress

تبين المقارنة ازدياد في قوى ضغط الماء المسامي و نقصان في قوى القص القاعدية المقاومة ( Base shear resistance force ) و ذلك عندما يتم تضمين ضغط الماء المسامي الاضافي في دراسة الاستقرار. يبين الشكل (23) مقارنة بين عوامل الامان لاستقرار الوجه الخلفي للسد في كل من حالات و الستاتيكية [Bishop and Morgenstern, 1960, 1965 - Janbu 1954]، و الزلزالية مع تضمين ضغط الماء المسامي الاضافي، و الزلزالية دون تضمين ضغط الماء المسامي الاضافي و ذلك من أجل جميع حالات تغير العمق للطبقة 1-3 Layer. يبين هذا الشكل تأثير الهزة الزلزالية و ضغط الماء المسامي الاضافي المتولد ديناميكيا على عوامل الأمان على الاستقرار. يوضح الشكل (23) أن ضغط الماء المسامي الاضافي لديه تأثير في تخفيض معاملات الأمان على الاستقرار و ذلك

لكل حالات أعماق الطبقة 1-3 Layer. كما يظهر من الشكل ازدياد في معاملات الامان من العمق 32 متر الى العمق 24 متر للسبب الذي سبق و تم شرحه في الفقرة 3.1 الشكل (9).



الشكل (23)، عوامل أمان الاستقرار مع العمق.

إن الفكرة الأساسية لهذا البحث هو دراسة تأثير الخواص الديناميكية للتربة و ضغط الماء المسامي الإضافي على تغير عوامل الامان لاستقرار السد ، لذلك فإن قيم عوامل الامان الناتجة الأكبر من 1 يجب ان لا تعتبر دليلاً على عدم علاقة التأثير الزلزالي على انهيار سد زيزون لأن تأثير الهزة الزلزالية يتعلق بقيمة PGA من جهة و بمدة سيطرة PGA و القيم القريبة منها من جهة ثانية. الشكل (10) يبين بأن التسارع الزلزالي الارضي يبلغ قيمة عظمى تساوي 0.3g لمدة

قصيرة جداً لا يمكن ان تولد قوى زلقة كبيرة مع الاخذ في الحسبان التأثير المخمد لتربة الاساسات التي تخفض قيمة PGA من 0.3g عند القاعدة الصخرية الى 0.07g عند سطح الارض لحالة العمق 32 متر ، كما تخفضها الى القيمة 0.18g لحالة العمق 2 متر.

### الاستنتاجات والتوصيات:

من المهم في الدراسات الستاتيكية و الديناميكية للسدود الترابية الأخذ بعين الاعتبار وجود طبقة تربة عالية النفوذية و اكثر قساوة من باقي تربة الاساسات حيث تعود هذه الاهمية لتأثيرها في استقرار السد. في هذا البحث تم بناء عدة نماذج تحليلية للحالتين الستاتيكية و الزلزالية لدراسة الرشوات و الاجهادات و الاستقرار و تحديد تأثير تغير عمق هذه الطبقة على منسوب خط الرش و الاجهادات و الاستجابة الزلزالية و الاستقرار للسد و اساساته. بينت النتائج أن عامل التضخيم يزداد كما يرتفع منسوب خط الرش في جسم السد مع تناقص عمق الطبقة 1-3 Layer الذي ينتج عنه زيادة في ضغط الماء المسامي و ضغط الماء المسامي الإضافي المتولد ديناميكياً و القوى الزلقة في جسم السد، كما ينتج عنه ايضا انخفاضاً في القوى المثبتة و انخفاضاً في عوامل امان استقرار الوجه الخلفي للسد. إن هدف هذا البحث هو دراسة تأثير الخواص الديناميكية و ضغط الماء المسامي الإضافي الناتج عن طبقة التربة متغيرة العمق و عالية النفوذية و القساوة على عوامل الامان لاستقرار السد، كما أن تأثير الهزة الزلزالية يتعلق بقيمة ذروة التسارع الزلزالي و مدة سيطرتها مع القيم القريبة منها (Surveillance duration) مما يعني أن هذه الآثار السلبية ستتحقق عند حدوث أي زلزال لكن ستختلف حدتها باختلاف الإشارة الزلزالية المطبقة.

## المراجع:

1. Rehabilitation of Zeizoun dam and the appurtenant structures. AGROCOMPLECT, PLC. Sofia, Bulgaria. 2005.
2. BATHE, K.J. *Finite Element Procedures in Engineering Analysis*. Prentice-Hall. 1982.
3. KOKANEH, S.P. et al. *Seepage evaluation of an earth dam using Group Method of Data Handling (GMDH) type neural network: A case study*. Scientific Research and Essays Vol. 8(3), pp. 120-127. 2013.
4. CHILDS, E.C; COLLIS, G.N. *The Permeability of Porous Materials*. Proceedings of the Royal Society, pp. 392-405. 1950.
5. HASANI, H; Mamizadeh, J; Karimi, H. *Stability of Slope and Seepage Analysis in Earth Fills Dams Using Numerical Models(Case Study: Ilam DAM-Iran )*. World Applied Sciences Journal 21 (9): 1398-1402. 2013.
6. ISHIBASHI, I; Zhang. X. *Unified Dynamic Shear Modula and Damping Ratios of Sand and Clay*. Soils and Foundations. Vol.33, No.1, pp. 182-191. 1993.
7. BETTESS, P. *Infinite Elements*. Penshaw Press. 1992.
8. KRAMER, S.L. *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice Hall. 1996.
9. LEE, K.L; Albaisa, A. *Earthquake induced settlement in saturated sands*. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE. Vol. 100, No. GT4. 1974.
10. SEED, H.B; Lee, K.L. (1966). *Liquefaction Of Saturated Sands During Cyclic Loading*. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 92.
11. BISHOP, A.W; Morgenstern, N. *Stability coefficients for earth slopes*. Geotechnique. 1960.
12. JANBU, N. *Applications of Composite Slip Surfaces for Stability Analysis*. In Proceedings of the European Conference on the Stability of Earth Slopes, Stockholm. 1954.
13. MORGENSTERN, N.R. and Price, V.E. *The Analysis of the Stability of General Slip Surfaces*. Geotechnique. 1965.
14. Seepage Modeling with SEEP/W 2007, an Engineering Methodology, Third Edition, March 2008.
15. Stress-Deformation Modeling with SIGMA/W 2007, an Engineering Methodology, Third Edition, March 2008.
16. Stability Modeling with SLOPE/W 2007 Version, an Engineering Methodology, Third Edition, March 2008.