

## Analytical Study of the Impact of Earthquakes on the AL BALLOUTA Dam Using Numerical Modeling

Dr. Mounzer Hammad\*  
Ola Saleh\*\*

(Received 25 / 5 / 2023. Accepted 18 / 7 / 2023)

### □ ABSTRACT □

This study uses numerical modeling to analyze the effects of earthquakes and demonstrates how to use the Finite Element Method (FEM) to determine the static and dynamic stability of embankment dams. The AL Ballouta dam was chosen as a case study to monitor the most significant changes that occur to it after the earthquake for this reason, and as a result, we developed a suitable numerical model for the studied issue using the Geo-Studio software package. This software package contains within it sub-programs used in the research, such as the Slope/w program, which simulates the problem in static case, and the Quake/w program, which simulates the problem in dynamic case in order to calculate the safety parameters in the most dangerous state of the load (maximum load state).

The study also proved that the dam is stable in all cases of loading and that the finite element method is better than other traditional methods because it allows testing deformation and stress scenarios that the dam may be offers to, and provides the possibility of a design that achieves the safety required to face all of these scenarios.

**Keywords:** stability of embankment dams, dynamic loads on earthquakes, seismic engineering of dams, Geo-studio.

**Copyright**



:Tishreen University journal-Syria, The authors retain the copyright under a CC BY-NC-SA 04

---

\* Professor, Department of Water Engineering and Irrigation, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria. Email: [mounzer.hammad@gmail.com](mailto:mounzer.hammad@gmail.com)

\*\* Postgraduate Student, Department of Water Engineering and Irrigation, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria. Email: [olasaleh955@gmail.com](mailto:olasaleh955@gmail.com)

## دراسة تحليلية لتأثير الزلازل في سد البلوطة باستخدام النمذجة العددية

د. منذر حماد\*

علا صالح\*\*

(تاريخ الإيداع 2023 / 5 / 25. قُبِلَ للنشر في 2023 / 7 / 18)

### □ ملخص □

يتضمن هذا البحث دراسة تحليلية لتأثير الزلازل باستخدام النمذجة العددية عن كيفية حساب الاستقرار الستاتيكي والديناميكي للسدود الركامية باستخدام طريقة العناصر المنتهية (Finite Element Method (FEM). من أجل ذلك، اختير سد البلوطة كحالة دراسة لرصد أهم التغيرات التي تطرأ عليه بعد الهزة الأرضية، حيث قمنا بوضع نموذج عددي مناسب للمسألة المدروسة باستخدام حزمة برامج Geo-Studio التي تتضمن بداخلها برامج فرعية استخدمت في البحث مثل برنامج Slope/w الذي يحاكي المسألة بالوضع الستاتيكي، وبرنامج Quake/w الذي يحاكي المسألة بالوضع الديناميكي من أجل حساب معاملات الأمان في الحالة الأخطر للتحميل (حالة التحميل الأعظمي). أثبتت الدراسة أن السد مستقر في جميع حالات التحميل وأن طريقة العناصر المنتهية أفضل من الطرائق التقليدية الأخرى لأنها تسمح باختبار سيناريوهات التشوه والإجهاد التي يمكن أن يتعرض لها السد، وتوفر إمكانية التصميم الذي يحقق الأمان المطلوب لمواجهة كل تلك السيناريوهات.

**الكلمات المفتاحية:** استقرار السدود الترابية، الأحمال الديناميكية على الزلازل، الهندسة الزلزالية للسدود، Geo-studio.

حقوق النشر : مجلة جامعة تشرين- سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب الترخيص



CC BY-NC-SA 04

\* أستاذ -قسم الهندسة المائية والري-كلية الهندسة المدنية-جامعة تشرين-اللاذقية-سورية. [mounzer.hammad@gmail.com](mailto:mounzer.hammad@gmail.com)

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

[olasaleh955@gmail.com](mailto:olasaleh955@gmail.com)

**مقدمة:**

بدأت مشكلة الإنسان مع الزلازل منذ أن قام بالبناء، حيث اقترنت فكرة التشييد في الخطوات الأولى للتطور التكنولوجي للبشرية بالخوف من أن تقوم قوة خارجية بتدمير ما استغرق بناؤه سنوات طويلة وجهد كبير في ثوان قليلة، ومن هنا يرتبط خطر الزلازل دوماً بالمنشآت المدنية.

لقد بقي الاهتمام بالزلازل فاتراً، وكأنها مظهر من مظاهر غضب الطبيعة يسهل نسيانه ونسيان آثاره، فالجديد دوماً يلتهم حتى الأحزان القديمة، حتى جاءت زلازل تركت بصمات قوية يصعب تجاهلها، حيث أنها سببت صدمة إنسانية عالمية هزت الأرجاء واستقطبت الرأي العام العالمي حول أهميتها لفترة طويلة، وحدث نوع من الاستفار العلمي الذي دفع بالعلماء من شتى أصقاع الأرض إلى الاتفاق ضمناً على إيلاء قضية الزلازل حقها الكامل من الاهتمام، وتخصيصها بدراسات تفصيلية توضح أخطارها ومشكلاتها وأساليب البناء المجدية لذلك فقد جرى تنسيق من كافة الجهات العلمية على المستوى الدولي بهدف الوصول إلى المنشأ الأمين المقاوم للزلازل.

تعد الزلازل من الكوارث الطبيعية التي تهدد حياة الإنسان، ويتجلى هذا الخطر عموماً من خلال تأثيرها على انهيار منشآت المدنية وخاصة السدود، ونظراً للعواقب الكارثية على الحياة البشرية والاقتصادية التي يمكن أن تحصل نتيجة انهيارها لذا كان لابد من التفكير في حمايتها من الانهيار حتى تستمر بأداء الهدف الذي أنشأت من أجله، وبسبب وقوع سورية في منطقة غنية بالتركيبات التكتونية المتباينة جيولوجياً أدت إلى وجود مناطق متحركة وفوالق متعددة منها (منطقة السلسلة التدمرية- منطقة الغاب- منطقة الالتواءات الساحلية وسلسلتي جبال لبنان الشرقية والغربية)، وبالتالي يجب التحقق من مقاومة السدود للإجهادات الديناميكية لأجل حماية هذه المنشآت واتخاذ الإجراء الأمثل لمنع انهيارها، والعمل على تفادي الأضرار، والقيام بالصيانة اللازمة في الأوقات المناسبة. [1,2,3]

**أهمية البحث وأهدافه:****أهمية البحث:**

- الدقة والسرعة في إنجاز الحسابات الزلزالية المعقدة من خلال استخدام برمجيات وتقانات متعددة.
- الرغبة في الاستفادة من الدروس المأخوذة من انهيار أعظم سدود العالم تحت وطأة الزلازل بما يجنبنا الخسائر الفادحة في الماديات والأرواح.

**أهداف البحث:**

1. نمذجة عددية (حاسوبية) لسد البلوطة ودراسة سلوكية السد واستقراره تحت تأثير الأحمال الديناميكية (الزلزالية) اعتماداً على طريقة العناصر المنتهية (FEM(Finite Element Method) ، ومقارنة الأمان الزلزالي بين الطريقتين شبه الستاتيكية والعناصر المنتهية.
2. وضع المقترحات اللازمة في حال حدوث تسارع أعظمي يفوق المتوقع خلال فترة استثمار السد.

**طرائق البحث ومواده:****طريقة العناصر المنتهية Finite Element Method**

تعتمد طريقة العناصر المنتهية FEM على تقسيم النموذج المدروس إلى أجزاء متناهية الأبعاد تسمى شبكة العناصر المنتهية (Mesh)، بحيث يمكن وصف سلوك هذه العناصر الصغيرة كل على حدة ومن ثم استنتاج سلوك النموذج عن

طريق التجميع لسلوك أجزائه، وهي طريقة رقمية مستخدمة لتسهيل عملية الحساب، فتعتمد طريقة FEM على تحويل النموذج لمسألة رياضية على شكل معادلات تفاضلية [4,5].

غالباً ما تستخدم الطرائق العددية كطريقة العناصر المنتهية (FEM: Finite Element Method) في المسائل التي تتطلب تحليل ثنائي أو ثلاثي الأبعاد.

إذ يتم تحويل المعادلة التفاضلية إلى عدة معادلات جبرية تمثل حالة كل نقطة من نقاط الشبكة، وتلك المعادلات الجبرية تكتب بدورها بصورة مصفوفات تحمل الصيغة التالية:

$$[K^{(e)}]\{\varphi\} = \{f\}$$

$\{f\}$ : مصفوفة القوى الخارجية.

$\{\varphi\}$ : مصفوفة المجاهيل (كالانتقالات والإجهادات والضغط المسامية وغيرها).

$K^{(e)}$ : مصفوفة الصلابة (Stiffness Matrix).

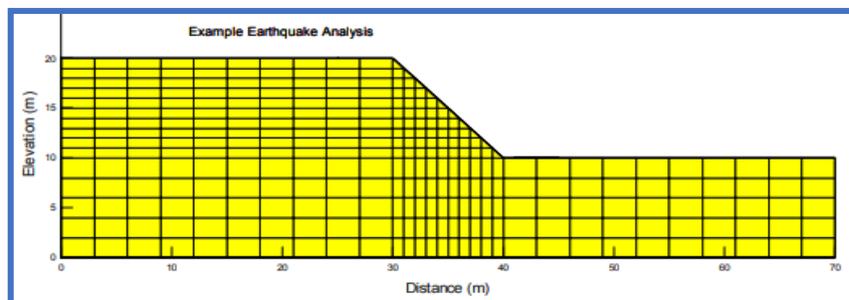
قبل ظهور هذه الطريقة كان الباحثون يستخدمون معادلات التوازن الحدية التي تفترض أن توزع الإجهادات على سطح الانزلاق ليس ضرورياً لتمثيل الإجهادات كما هي في الواقع، وتلك المعادلات تعطي الإجهادات والقوى التي:

• تؤمن توازن القوى المؤثرة على كل شريحة.

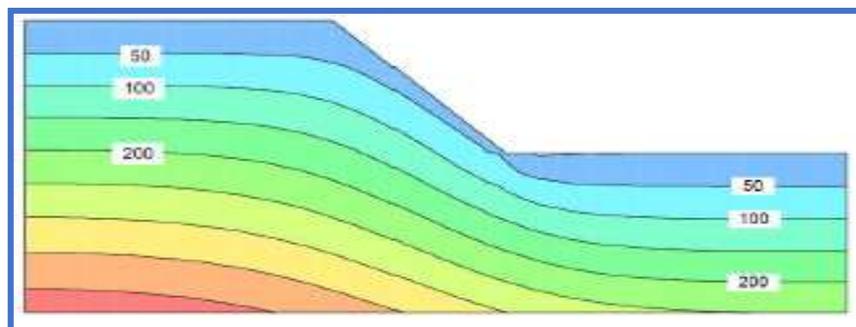
• تجعل عامل الأمان ذو قيمة واحدة لجميع الشرائح.

إنّ الجزء المفقود في معادلات التوازن الحدية هو علاقة التشوه بالإجهاد والتي لا يمكن تمثيلها إلا باستخدام طريقة العناصر المنتهية، يبين الشكل (1) شبكة العناصر المنتهية لمنحدر من أجل حساب الإجهادات، كما يبين الشكل (2)

توزع الإجهادات الشاقولية باستخدام برنامج Geo-slope.



الشكل (1) شبكة العناصر المنتهية لمنحدر من أجل حساب الإجهادات.



الشكل (2) توزع الإجهادات الشاقولية (Kpa) المحسوبة باستخدام برنامج Geo-slope.

### ▪ برنامج Geo-Studio [6]

ستجرى الحسابات في الحالة الستاتيكية والديناميكية باستخدام طريقة العناصر المنتهية من خلال حزم برنامج Geo-Studio وذلك باستخدام:

**Geo-studio/seep**: التي من خلالها سنتمكن من حساب التسرب وكمية المياه المتسربة من جسم وأساس السد في المقطع النموذجي لسد البلوطة.

**Geo-studio/sigma**: حيث ستحسب الإجهادات الكلية على كامل المقطع العرضي من ضمنها الإجهادات عند مستوي القاعدة.

**Geo-studio/slope**: ستحسب معاملات استقرار (أمان) سد البلوطة عند أخطر الحالات الحرجة على استقراره وهما: حالة التخزين الطبيعي لبحيرة السد.

حالة البحيرة الفارغة، حيث تكون المنحدرات جافة عند التشييد.

حالة التفريغ السريع وتأثيرها على السفح الأمامي

**Geo-studio/Quake**: والذي من خلاله نقوم بتطبيق هزة أرضية افتراضية معينة وفق تسارع أرضي أعظمي يوافق منطقة السد ثم حساب معاملات أمان استقرار السد في جميع الحالات الحرجة.

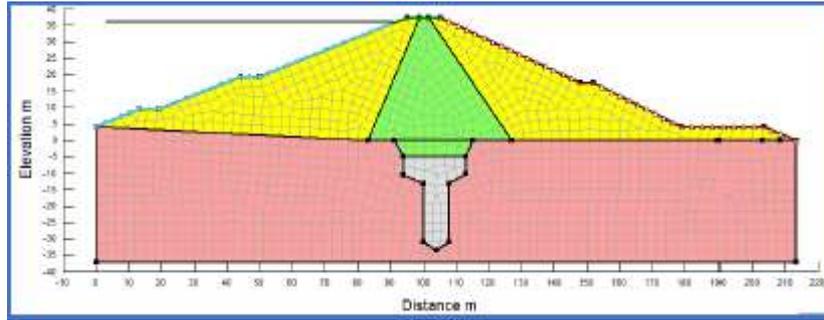
### طرائق البحث ومواده:

يعتبر سد البلوطة أحد المشاريع المائية الهامة في حوض الساحل، ويقع مشروع السد في الوادي الأوسط لنهر البلوطية على مسافة 2.5 كم في اتجاه مجرى النهر لقرية الديرون في منطقة الشيخ بدر والهدف منه تزويد القرى المحيطة بالسّد بمياه الشرب وإرواء 120 هكتاراً من الأراضي الزراعية، وهو سد ركامي ذو نواة غضارية، طوله 42 متراً في القمة وعرضه 10 أمتار والارتفاع الأقصى 42 متراً، وتخزين البحيرة سيصل إلى أكثر من 2 مليون ونصف متر مكعب من المياه، على حين يبلغ التخزين الميت 430 ألف متر مكعب والتخزين المفيد أكثر من 2 مليون متر مكعب، ميل الوجه الأمامي للسد  $1:m = 1:25$  وميل الوجه الخلفي للسد  $1:n = 1:2$ ، ارتفاع النواة 37.5 m وارتفاع منسوب الماء الطبيعي 35.5 m.

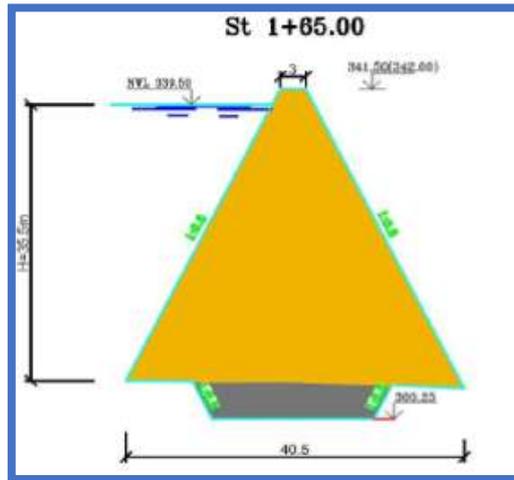
تبين الأشكال (3) و(4) و(5) موقع البحث، مقطع عرضي نموذجي في سد البلوطة، مقطع عرضي في نواة السد النموذجي على التوالي.



الشكل (3) موقع البحث.



الشكل (4) مقطع عرضي نموذجي في سد البلوطة.



الشكل (5) مقطع عرضي في نواة السد النموذجي.

### 1- معطيات تحليل النموذج

لإنشاء النموذج على برنامج Geo-studio يجب إدخال البارامترات الموضحة في الجدول (1) اللازمة للحساب، ليقوم البرنامج بتحليل السد بطريقة العناصر المنتهية FEM ومن ثم إخراج النتائج.

الجدول (1) البارامترات اللازمة لنمذجة السد باستخدام برنامج Geo-studio

Property for Nucleus	رمز البارامتر	القيمة	الوحدة
Cohesion التماسك	C	64	$KN/m^2$
Friction angle زاوية الاحتكاك	$\phi$	30	Degree
Poisson ratio نسبة بواسون	$\mu$	0.22	-
shear modulus معامل القص	G	8900	$KN/m^2$
Modulus of elasticity معامل المرونة	E	30000	$KN/m^2$
Property For Backfilling front and back	رمز البارامتر	القيمة	الوحدة
Cohesion التماسك	C	30	$KN/m^2$
Friction angle زاوية الاحتكاك	$\phi$	38.5	Degree
Poisson ratio نسبة بواسون	$\mu$	0.33	-
shear modulus معامل القص	G	5100	$KN/m^2$
Modulus of elasticity معامل المرونة	E	30000	$KN/m^2$
Property For Foundation	رمز البارامتر	القيمة	الوحدة
Cohesion التماسك	C	120	$KN/m^2$

زاوية الاحتكاك Friction angle	$\phi$	20	Degree
نسبة بواسون Poisson ratio	$\mu$	0.3	-
معامل القص shear modulus	G	7200	$\text{KN/m}^2$
معامل المرونة Modulus of elasticity	E	45000	$\text{KN/m}^2$

ويبين الجدول (2) المعلومات الوصفية للسد، والجدول (3) يوضح المعلومات الوصفية للنواة، والجدول (4) المعلومات الوصفية للأساس.

الجدول (2) المعلومات الوصفية للسد

42	ارتفاع السد m
25.2 هكتار	مساحة البحيرة عند منسوب التخزين الطبيعي
2 كم	طول خزان السد m
342.5	منسوب قمة السد عن سطح البحر m
304	منسوب التأسيس عن سطح البحر m
327	منسوب الحجم الميت عن سطح البحر m
342.15	منسوب التخزين الأعظمي عن سطح البحر m
339.5	منسوب التخزين الطبيعي عن سطح البحر m
2.566	حجم التخزين الأعظمي مليون م <sup>3</sup>
2.136	حجم التخزين المفيد مليون م <sup>3</sup>
b=10	عرض عتبة السد (b) ب m
1:m = 1:25	ميل الوجه الأمامي للسد
1:n = 1:2	ميل الوجه الخلفي للسد
B=210.16	عرض قاعدة السد ب m
2 m/day	معامل نفاذية المواد المكونة للمنحدرين الأمامي والخلفي
قيد التنفيذ	السد

الجدول (3) يوضح المعلومات الوصفية للنواة

37.5	ارتفاع النواة
35.5	ارتفاع الماء الطبيعي
3	عرض عتبة النواة
1:m = 1:0.5	ميل الوجه الأمامي للنواة
1:m = 1:0.5	ميل الوجه الخلفي للنواة
B=40.5	عرض قاعدة النواة ب m
21	عرض الستارة الحقيقية من الأعلى ب m
17	عرض الستارة الحقيقية من الأسفل ب m
0.001	معامل نفاذية النواة ب m/day

ينقسم الأساس لدينا في سد البلوطة إلى طبقتين:

الجدول (4) المعلومات الوصفية للأساس

2 g/cm <sup>3</sup>	كثافة تربة الأساس
1.7 g/cm <sup>3</sup>	الكثافة الجافة لتربة الأساس
22 m	سماعة الطبقة الأولى للأساس T <sub>1</sub>
17 m	سماعة الطبقة الثانية للأساس T <sub>2</sub>
0.05 m/day	معامل نفاذية الطبقة الأولى للأساس K <sub>F1</sub>
0.001 m/day	معامل نفاذية الطبقة الثانية للأساس K <sub>F2</sub>

• نحسب معامل نفاذية تربة الأساس للطبقتين كقيمة وسطية من خلال قانون:

$$k_f = \frac{T_1 * K_{F1} + T_2 * K_{F2}}{T_1 + T_2}$$

$$k_f = \frac{22 * \frac{0.05}{24 * 3600} + 17 * \frac{0.001}{24 * 3600}}{22 + 17} = \boxed{3.3 * 10^{-7}} \text{ m/sec}$$

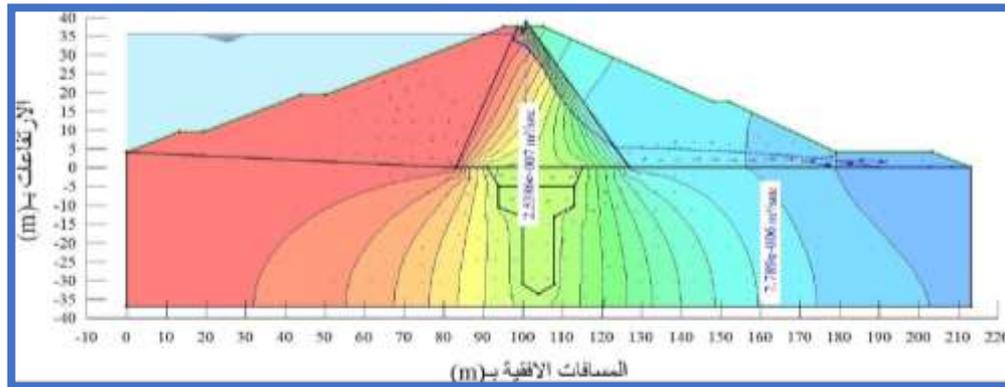
### النتائج والمناقشة:

❖ التحليل الستاتيكي لسد البلوطة

• دراسة التسرب في سد البلوطة

قمنا بتمذجة السد عن طريق برنامج SEEP/W وهو أحد فروع حزمة برامج ال (Geo-Studio)، يستطيع البرنامج رسم مسار خط الرشح (التسرب) في جسم السد وإعطاء قيمة دقيقة لكمية المياه المتسربة من جسم السد وذلك تبعاً لدقة البيانات المدخلة اليه.

يبين الشكل (6) خط التسرب وكمية المياه المتسربة من جسم وأساس السد في المقطع النموذجي لسد البلوطة بعد تمذجته ببرنامج Geo-studio/seep.



الشكل (6) خط التسرب وكمية المياه المتسربة من جسم السد والأساس في المقطع النموذجي لسد البلوطة.

### الشروط الحدية:

- مستوى الماء هو بمستوى الماء الطبيعي 35.5 م.
- الحدود الشاقولية للنموذج ممنوعة من الحركة الأفقية، والحدود الأفقية ممنوعة من الحركة الشاقولية.

**حساب كمية المياه المتسربة:**

كمية المياه المتسربة من جسم السد:

$$q_d = 2.5386 * 10^{-7} \text{ m}^3/\text{sec}/\text{ml}$$

كمية المياه المتسربة من الأساس:

$$q_f = 7.789 * 10^{-6} \text{ m}^3/\text{sec}/\text{ml}$$

حساب كمية المياه المتسربة الكلية من جسم وأساس السد:

$$q_1 = q_d + q_f$$

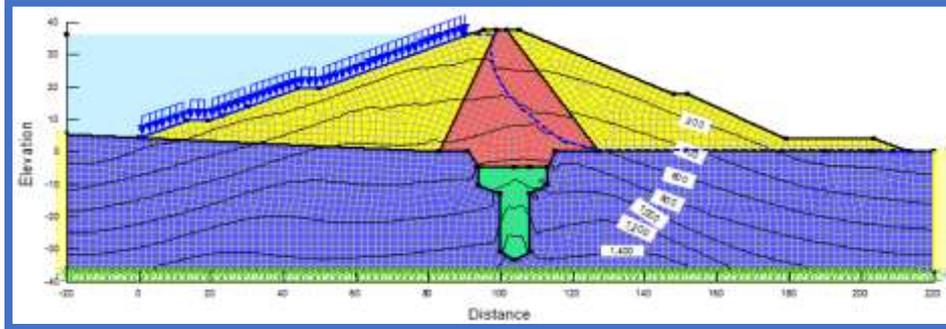
$$q_1 = 2.5386 * 10^{-7} + 7.789 * 10^{-6} = 8.04 * 10^{-6} \text{ m}^3/\text{sec}/\text{ml}$$

نلاحظ خروج الماء من قدم السد وحركة جريان جيدة للمياه وكمية مياه متسربة مقبولة وضمن الحدود المسموحة عند الإملاء بمستويات ماء طبيعية. [7]

**□ دراسة الإجهادات الستاتيكية**

هي الإجهادات الفعالة مضافاً إليها ضغط ماء المسام، حيث أنّ ضغط ماء المسام يعتمد على الضغوط الكلي للماء داخل جسم السد (خطوط الكمون) والذي يعتمد بدوره على منسوب سطح الماء في البحيرة أمام جسم السد، وبالتالي على خط التسرب ضمن جسم السد.

من نتائج التحليل الستاتيكي باستخدام برنامج Geo-studio/sigma نلاحظ أنّ قيمة الإجهادات الكلية الأعظمية في سد البلوطة  $\max = 1563 \text{ Kpa} = 156.3 \text{ t/m}^3$  عند قاعدة السد، إذ أنّ نقاط قمة السد هي الأقل تعرضاً لتغير الإجهادات بسبب موقعها العالي عن تأثير المياه، ويبين الشكل (7) خطوط الكونتور تبين التوزيع الستاتيكي للإجهادات الكلية الشاقولية (Kpa) في جسم سد البلوطة وأساسه.



الشكل (7) خطوط الكونتور تبين التوزيع الستاتيكي للإجهادات الكلية الشاقولية (Kpa) في جسم سد البلوطة وأساسه.

تحتسب قدرة تحمل التربة من علاقة ترزاكي للأساس المستطيل بالعلاقة الآتية:

$$q_u = c \cdot N_c + \gamma \cdot D_f \cdot N_q + 0.5 \gamma \cdot B \cdot N_\gamma$$

حيث أنّ قيمة زاوية الاحتكاك  $\Phi = 20$  والتماسك  $c = 30 \text{ KN/m}^2$  (من الجدول السابق (1))

تؤخذ قيم معاملات قدرة تحمل من الجدول (5) بحسب قيمة  $\Phi$ .

الجدول (5): قيم معاملات  $N_c, N_q, N_\gamma$  لحساب قدرة تحمل التربة.

$\Phi^\circ$	$N_c$	$N_q$	$N_\gamma$
0	5.7	1.0	0
5	7.3	1.6	0.14
10	9.6	2.7	1.2
15	12.9	4.4	1.8
20	17.7	7.4	5.0
25	25.1	12.7	9.7
30	37.2	22.5	19.7
35	57.8	41.4	42.4
40	95.7	81.3	100.4
45	172.3	173.3	360.0
50	347.5	415.1	1072.8

$$\Rightarrow q_u = 30 \times 17.7 + 16.5 \times 30 \times 7.4 + 0.5 \times 16.5 \times 210.16 \times 5$$

$$= 12863.1 \text{ KN/m}^2 \text{ (12.863 Mpa)}$$

وبالتالي قدرة تحمل التربة المسموحة باعتبار عامل الأمان يساوي  $F=3$ ، ومنه:

$$\sigma_{all,F} = 437.1 \text{ t/m}^2$$

نلاحظ أن قيمة الإجهادات عند قاعدة السد في حالة التحليل الستاتيكي أصغر من قدرة تحمل الأساس، حيث بلغت قيمة إجهاد الضغط الأعظمي عند قاعدة السد القيمة

$$\sigma_{max} = 156.3 \text{ t/m}^2 < \sigma_{all,F} = 437.1 \text{ t/m}^2$$

#### □ معاملات استقرار (أمان) سد البلوطة

عند التحليل الستاتيكي لسد البلوطة نقوم بدراسة أخطر الحالات الحرجة على استقراره وهم:

- ❖ حالة التخزين الطبيعي لبحيرة السد.
- ❖ حالة البحيرة الفارغة، حيث تكون المنحدرات جافة عند التشييد.
- ❖ حالة التفريغ السريع وتأثيرها على السطح الأمامي.

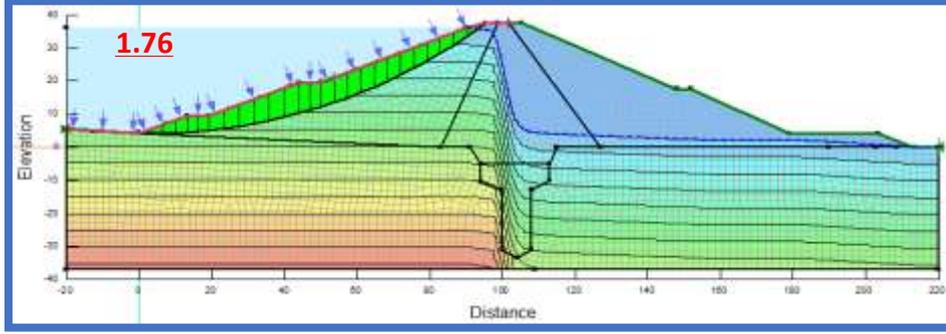
عند حساب عامل الأمان تتم مقارنة القيم الناتجة من تحليل النموذج مع القيم المسموحة الممثلة في الجدول المعتمدة من قبل FERC من أجل تقييم الأمان وإرشادات السلامة في السدود الركامية [8]، ويشمل الجدول (6) عدة حالات.

جدول (6) الحد الأدنى من كود FERC المطلوب لإرشادات السلامة [8]

حالة التحميل	عامل الأمان الأصغري	تحليل المنحدر
انتهاء بناء السد	1.3	المنحدر الأمامي والخلفي
تفريغ مفاجئ والبحيرة ممتلئة	>1.1	المنحدر الأمامي
التفريغ المفاجئ من قمة المفيض أو قمة البوابات	1.2	المنحدر الأمامي
تسرب مستقر مع تخزين أعظمي	1.5	المنحدر الأمامي والخلفي
زلزال (لظروف تسرب مستقر مع الزلازل)	>1.0	المنحدر الأمامي والخلفي

**المنحدر الأمامي لسد البلوطة (البحيرة ممتلئة)**

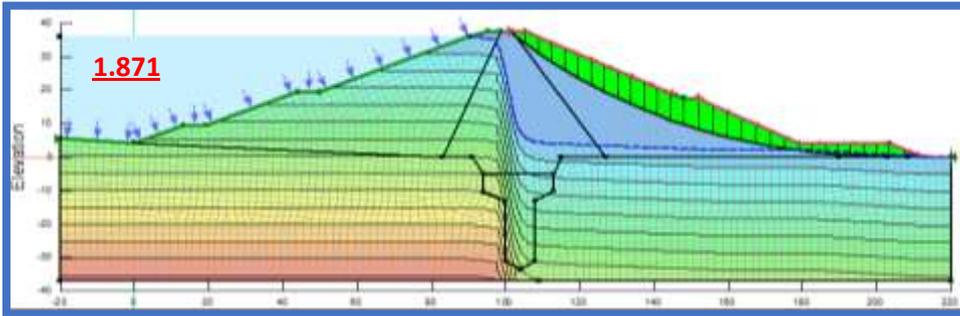
في حالة المنسوب الطبيعي لبحيرة التخزين تبين أن معامل الأمان للمنحدر الأمامي للسد يبلغ 1.76، وهو أكبر من 1.5 عامل الأمان الحدي وفق الجدول (6) حالة تسرب مستقر مع تخزين أعظمي وبالتالي سد البلوطة مستقر عند تحليله ستاتيكيًا، وهو موضح في الشكل (8).



الشكل (8) عامل أمان المنحدر الأمامي لسد البلوطة عند التحليل الستاتيكي في حالة البحيرة الممتلئة.

**المنحدر الخلفي لسد البلوطة (البحيرة ممتلئة)**

في حالة المنسوب الطبيعي لبحيرة التخزين تبين أن معامل الأمان للمنحدر الخلفي للسد يبلغ 1.871 وهو أكبر من 1.5 عامل الأمان الحدي وفق الجدول (6) حالة تسرب مستقر مع تخزين أعظمي وبالتالي سد البلوطة مستقر عند تحليله ستاتيكيًا كما هو موضح في الشكل (9).



الشكل (9) عامل أمان المنحدر الخلفي لسد البلوطة عند التحليل الستاتيكي في حالة البحيرة الممتلئة.

وبالطريقة نفسها نجد معاملات الأمان بالنسبة للمنحدر الأمامي والخلفي في حالة البحيرة فارغة.

**التحليل الستاتيكي في حالة التفريغ السريع****المنحدر الأمامي لسد البلوطة**

تم دراسة استقرار المنحدر الأمامي للسد عند القيم التالية لمدى تفريغ ربع السد ونصفه وثلاثة أرباعه وكامل السد (0.25, 0.5, 0.75, 1) وبسرعة مختلفة للتفريغ تتراوح بين الـ (3-0.001) m/day وذلك لسد البلوطة بارتفاع  $H=35.5$  m لدراسة تأثير مدى التفريغ على عامل أمان المنحدر الأمامي للسد حيث:

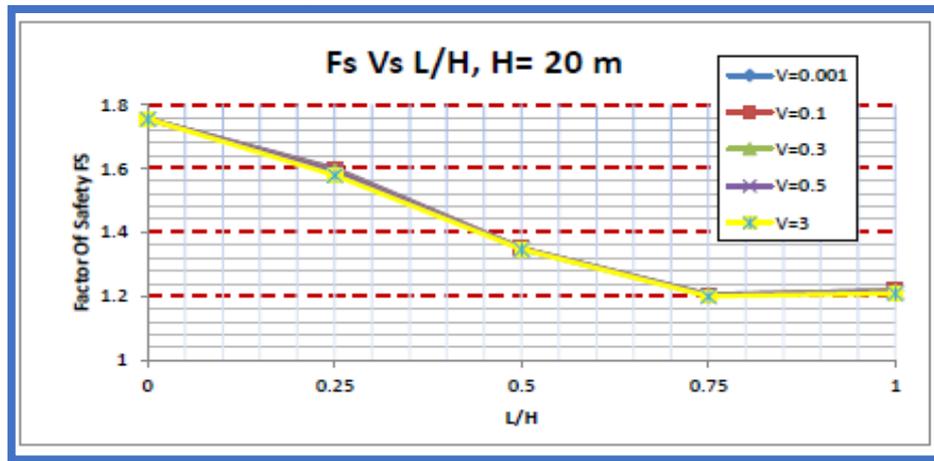
L: ارتفاع الماء الذي تم تفريغه m.

H: ارتفاع الماء في السد m.

Fs: عامل الأمان.

V: سرعة التفريغ.

إنَّ تغيرات قيم عامل أمان المنحدر الأمامي للسد عند قيم مختلفة لمدى التفريغ موضحة في الشكل (10).



الشكل (10) تغيرات قيم عامل أمان المنحدر الأمامي للسد عند قيم مختلفة لمدى التفريغ ولسرعات تفريغ مختلفة.

نستنتج مما سبق:

- في حالة سد البلوطة لا تأثير لزيادة سرعة التفريغ على زيادة انخفاض قيمة معامل أمان المنحدر الأمامي للسد.
- عند تفريغ كامل السد يبقى المنحدر الأمامي مستقراً مهما كانت سرعة التفريغ.
- من نتائج التحليل نجد قيم معاملات الأمان كما هو موضح في الجدول (7):

جدول (7) قيم معاملات الأمان في التحليل الستاتيكي للسد.

معامل الأمان الحدي	المنحدر الخلفي	المنحدر الأمامي	معامل الأمان
1.5	1.87	1.76	بحيرة ممثلة
1.5	1.89	2.23	بحيرة فارغة
>1.1		1.2	تفريغ سريع لكامل البحيرة

- في حالة المنسوب الطبيعي لبحيرة التخزين تبين أنَّ معامل الأمان للمنحدر الأمامي والخلفي والتفريغ السريع للسد أكبر من عامل الأمان الحدي في حالة تسرب مستقر وفي حالة التفريغ السريع وبالتالي سد البلوطة مستقر عند تحليله ستاتيكيًا.

#### ❖ التحليل الديناميكي لسد البلوطة

#### □ الإجهادات الديناميكية والتشوهات المرافقة

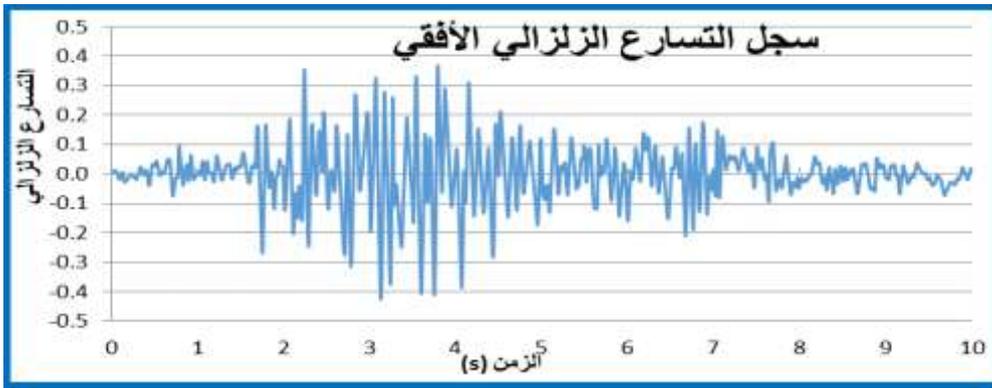
نقوم بتطبيق هزة افتراضية معينة وفق تسارع زلزالي أعظمي يوافق منطقة السد في الشيخ بدر، حيث يبلغ التسارع الزلزالي الأعظمي لها بين القيمتين 0.35-0.4 g، وذلك كما ورد في الخريطة والجدول الموضوع في الكود العربي السوري، وأيضاً كما ورد في الخريطة الزلزالية العالمية. [9]

قيمة ذروة التسارع الزلزالي الأفقي الأعظمي  $PGA=0.4g$  للمنطقة المدروسة موضوعة في الكود من أجل احتمال تجاوز 10% لعمر منشأة 50 سنة وبزمن عودة قدره 475 سنة.

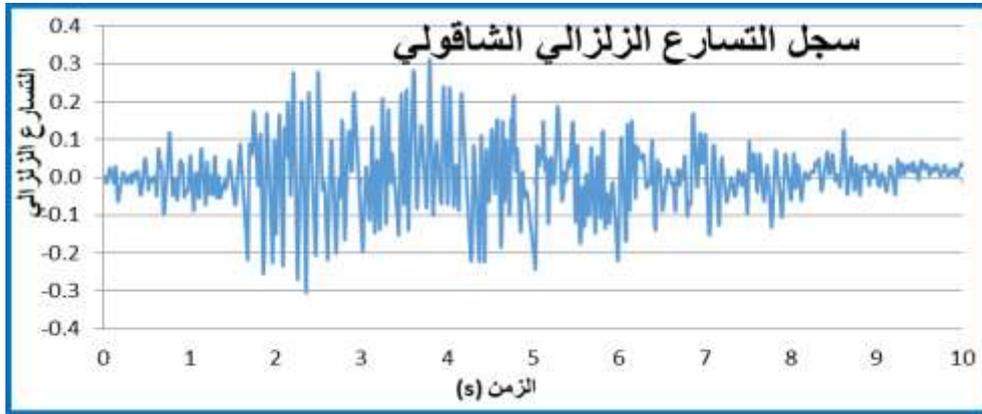
تم الاستعانة بالسجل الزمني لزلزال Koynanagar earthquake 1967، الحاصل في الهند في مدينة Koynanagar، بشدة مقدارها 6.6 على مقياس ريختر ويعمق 15 km وبذروة تسارع زلزالي 0.4g الذي أثر على جسم سد Koyna.

بما أن هذا الزلزال له نفس قيمة ذروة التسارع الزلزالي في المنطقة المدروسة، مما سبق نجد أنه من الممكن تطبيق السجل الزمني للتسارع الزلزالي لزلزال Koynanagar earthquake 1967.

تم اعتماد الزلزال السابق لسببين أحدهما أن له نفس ذروة التسارع الزلزالي الموصي بها في الكود العربي السوري والسبب الآخر توافر معطيات هذا الزلزال، حيث سجل التسارع الزلزالي الأفقي للزلزال المرصود الذي مدته 10 sec موضح في الشكل (11)، وسجل التسارع الزلزالي الشاقولي موضح في الشكل (12).



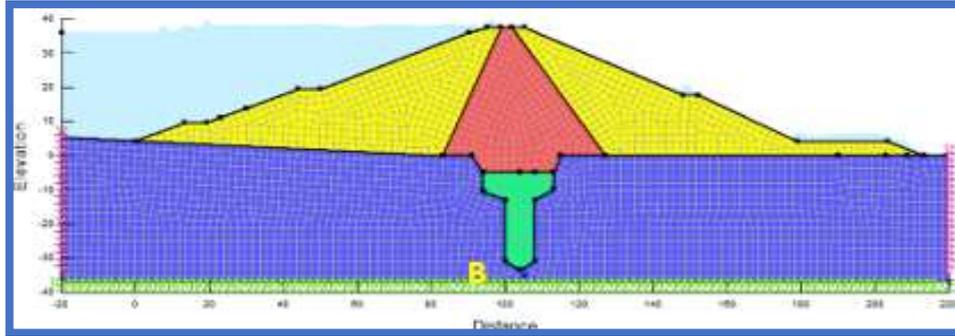
الشكل (11) سجل التسارع الزلزالي الأفقي المطبق في التحليل (Horizontal Acceleration Time History) [10].



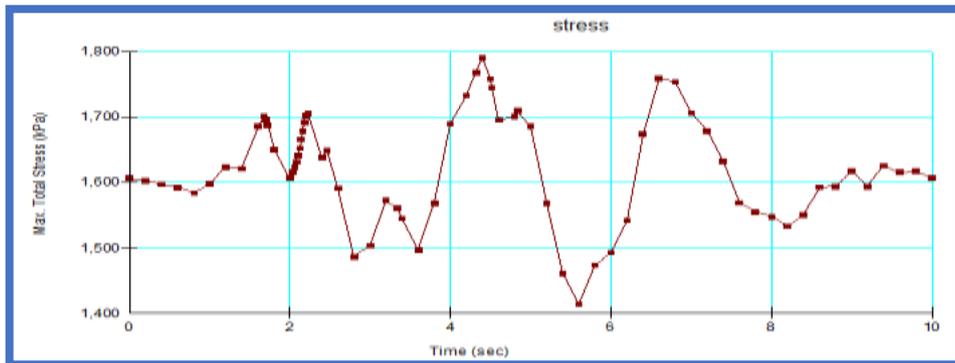
الشكل (12) سجل التسارع الزلزالي الشاقولي المطبق في التحليل (Vertical Acceleration Time History) [10].

#### الإجهادات الديناميكية والتشوهات المرافقة

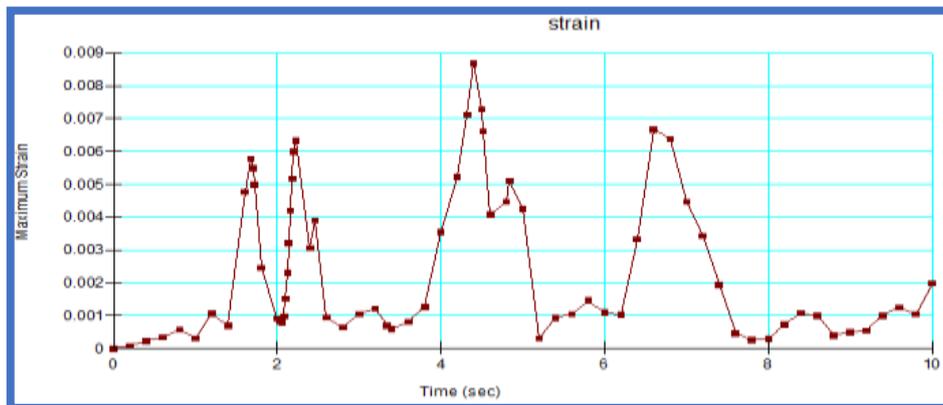
نأخذ نقطة مرجعية (B) في قاعدة السد كما هو موضح في الشكل (13) لنبين ترافق التشوهات مع الإجهادات الديناميكية الكلية خلال كل لحظة زمنية من الهزة الأرضية كما هو موضح في الشكلين (14) و(15).



الشكل (13) النقطة المرجعية (B) في قاعدة جسم السد ترصد التغيرات قبل وبعد الهزة الأرضية.



الشكل (14) الإجهادات الديناميكية الكلية للنقطة المرجعية B.



الشكل (15) تراقف التشوهات مع الإجهادات الديناميكية الكلية لنقطة مرجعية في السد في كل لحظة زمنية من لحظات الهزة الأرضية.

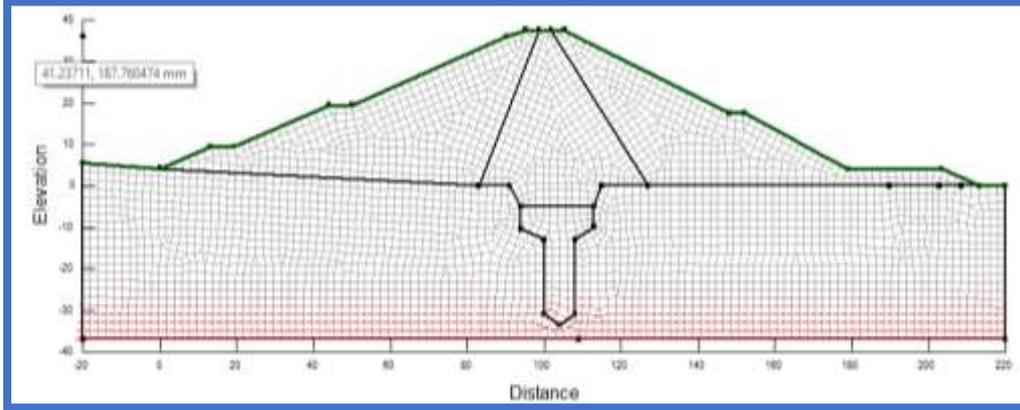
❖ نلاحظ من النتائج السابقة أن قيمة الإجهادات عند قاعدة السد في حالة التحليل الديناميكي أصغر من قدرة تحمل الأساس، حيث بلغت قيمة إجهاد الضغط الأعظمي عند قاعدة السد القيمة

$$\sigma_{max} = 183.5 \text{ t/m}^2 < \sigma_{all,F} = 437.1 \text{ t/m}^2$$

❖ كل النقاط تزداد بزيادة الإجهادات وتتنقص بنقصانها، حيث يرتبط الإجهاد والتشوه بالعلاقة  $\sigma = \epsilon * E$  ويكون عامل المرونة ثابت فإن العلاقة بين الإجهاد والتشوه علاقة طردية.

**التسيل (التميع)**

يتشكل لدينا ضغط مسامي زائد (Excess Pore Water Pressures) ينجم عن حالة تحميل مغلق (لا تصريف للماء المسامي)، لكن لدى اختبار إمكانية تشكل هذا الضغط المسامي الزائد في سد البلوطة تبين عدم إمكانية حدوث تميع في تربة جسم السد وأساسه، وهذا موضح في الشكل (16)، حيث يقوم البرنامج بتلوين مناطق التسيل باللون الأصفر إشارة إلى حدوثه، ويعزى سبب عدم تشكل ظاهرة التميع (التسيل) في السد إلى النفاذية الكبيرة في الردميات الصخرية للوجهين الأمامي والخلفي للسد، حيث تسمح بتمرير الماء بسهولة دون حدوث ضغوط مسامية إضافية.



الشكل (16) مقطع عرضي في سد البلوطة يبين عدم حصول تميع (تسيل) في جسم السد وأساسه.

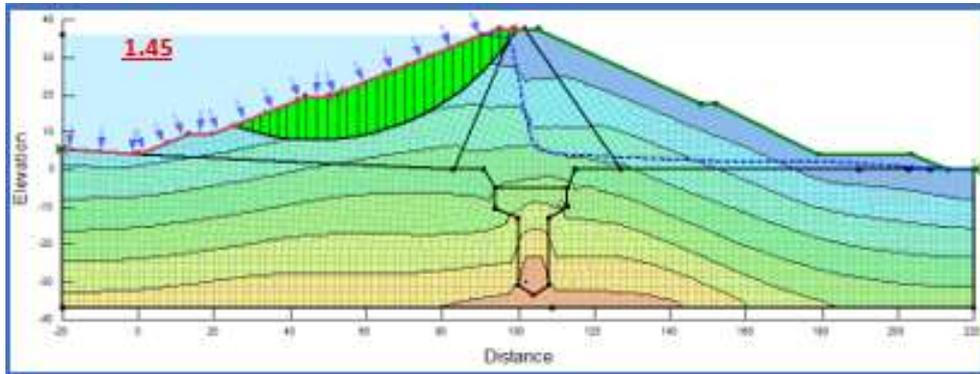
**2- معاملات استقرار (أمان) سد البلوطة**

عند التحليل الديناميكي لسد البلوطة تقوم بدراسة أخطر حالتين حرجتين على استقراره وهما:

- ❖ حالة التخزين الطبيعي لبحيرة السد.
  - ❖ حالة البحيرة الفارغة حيث تكون المنحدرات جافة عند التشييد.
- حالة التفريغ السريع وتأثيرها على السطح الأمامي.

**المنحدر الأمامي لسد البلوطة في حالة البحيرة ممتلئة**

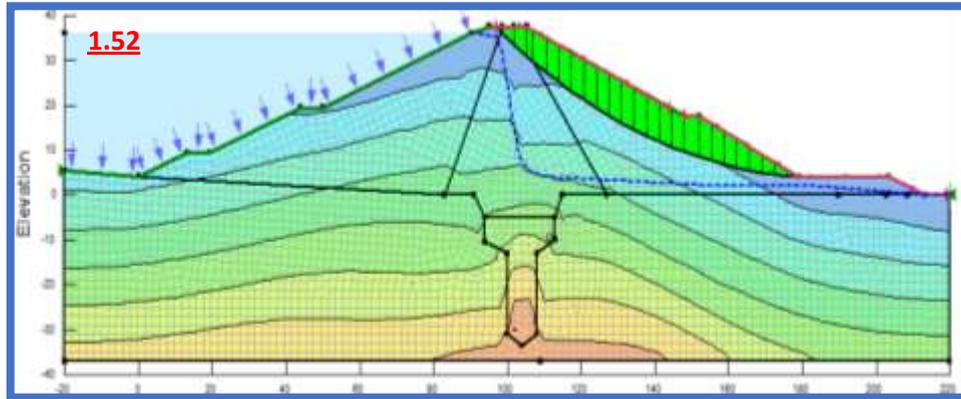
في حالة المنسوب الطبيعي لبحيرة التخزين تبين أن معامل الأمان للمنحدر الأمامي للسد يبلغ 1.45 وهو أكبر من 1.0 عامل الأمان الحدي المسموح الممثل لتقييم الأمان وإرشادات السلامة في السدود الركامية [8] وبالتالي سد البلوطة مستقر ديناميكياً، وهذا موضح في الشكل (17).



الشكل (17) عامل أمان المنحدر الأمامي لسد البلوطة عند التحليل الديناميكي في حالة البحيرة الممتلئة.

### المنحدر الخلفي لسد البلوطة في حالة البحيرة ممتلئة

في حالة المنسوب الطبيعي لبحيرة التخزين تبين أن معامل الأمان للمنحدر الخلفي للسد يبلغ 1.52 وهو أكبر من 1.0 عامل الأمان الحدي المسموح الممثل لتقييم الأمان وإرشادات السلامة في السدود الركامية [8] وبالتالي سد البلوطة مستقر ديناميكياً، وهذا موضح في الشكل (18).



الشكل (18) عامل أمان المنحدر الخلفي لسد البلوطة عند التحليل الديناميكي في حالة البحيرة ممتلئة

وبالطريقة نفسها نجد معاملات الأمان بالنسبة للمنحدر الأمامي والخلفي في حالة البحيرة فارغة.

### التحليل الستاتيكي في حالة التفريغ السريع

#### المنحدر الأمامي لسد البلوطة

تم دراسة استقرار المنحدر الأمامي للسد عند القيم التالية لمدى التفريغ السد ونصفه وثلاثة أرباعه وكامل السد (0.25, 0.5, 0.75, 1) ويسرع مختلفة للتفريغ تتراوح بين الـ (0.001-3) m/day وذلك لسد البلوطة بارتفاع  $H=35.5$  m، لدراسة تأثير مدى التفريغ على عامل أمان المنحدر الأمامي للسد.

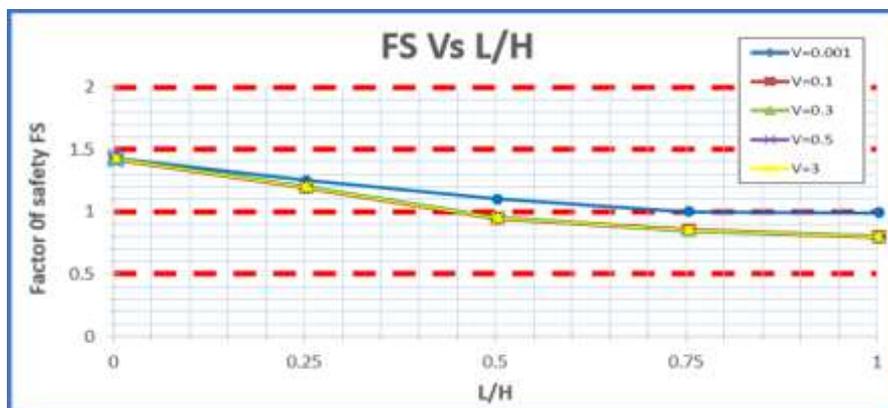
L: ارتفاع الماء الذي تم تفريغه m.

H: ارتفاع الماء في السد m.

Fs: عامل الأمان.

V: سرعة التفريغ.

إنّ تغيرات قيم عامل أمان المنحدر الأمامي للسد عند قيم مختلفة لمدى التفريغ موضحة في الشكل (19).



الشكل (19) تغيرات قيم عامل أمان المنحدر الأمامي للسد عند قيم مختلفة لمدى التفريغ وسرعات تفريغ مختلفة.

**نستنتج:**

من نتائج التحليل نجد قيم معاملات الأمان كما هو موضح في الجدول (8):

جدول (8) قيم معاملات الأمان في التحليل الديناميكي للسد.

معامل الأمان الحدي	المنحدر الخلفي	المنحدر الأمامي	معامل الأمان
>1.0	1.52	1.45	بحيرة ممتلئة
>1.0	1.65	1.64	بحيرة فارغة
>1.1	-	0.8	تفريغ سريع لكامل البحيرة

- نلاحظ أن السد مستقر بعوامل أمان لا تقل عن 1.0 وذلك في حالة حدوث زلزال بتسارع الزلزالي 0.4g وهي توافق ذروة التسارع الزلزالي المسموح في المنطقة حسب الكود العربي السوري. [11]
- عند تفريغ ربع السد يبقى المنحدر الأمامي مستقراً مهما كانت سرعة التفريغ، في حين أن التفريغ نصف ارتفاع السد يكون فيه المنحدر مستقراً عند التفريغ بسرعة صغيرة جداً  $V = 0.001 \text{ m/d}$  ثم يصبح غير مستقر عند سرعات أعلى من هذه السرعة.
- حالة التفريغ لثلاثة أرباع السد والتفريغ لكامل السد يؤديان إلى عدم استقرار المنحدر الأمامي مهما كانت سرعة التفريغ صغيرة.

□ في حال حدوث تسارع أعظمي يفوق المتوقع خلال فترة استثمار السد

من المفيد هنا أن نذكر أن سورية تقع على خط زلزالي نشط والثبات فيه أمر نسبي، لكن على الرغم من قلة التسجيلات التاريخية للزلازل الحاصلة على الأرض السورية والتوثيق الجغرافي المحدود لبؤر حدوث تلك الزلازل فإنه ينبغي علينا أن نتوقع الزلازل الأسوأ احتمالاً في دراستنا وأبحاثنا الأكاديمية. انطلاقاً مما سبق فقد أخذنا بعين الاعتبار حدوث تسارع أعظمي يبلغ  $0.6 \text{ g}$  أي يفوق التسارع المحدد بالكود وهو  $0.4 \text{ g}$  للأسباب الأنفة الذكر، حيث بلغت معاملات الأمان للمنحدر الخلفي بالطريقة شبه الستاتيكية وطريقة العناصر المنتهية كما هو موضح في الجدول (9).

جدول (9) مقارنة بين طريقة العناصر المنتهية والطريقة شبه الستاتيكية

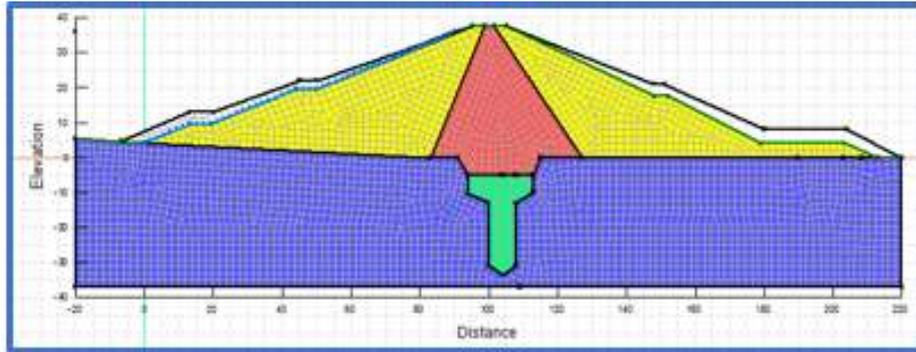
طريقة العناصر المنتهية	الطريقة شبه الستاتيكية	معامل الأمان للمنحدر الخلفي
1.15	1.42	البحيرة الفارغة
19 %		الفارق بين الطريقتين

طريقة العناصر المنتهية	الطريقة شبه الستاتيكية	معامل الأمان للمنحدر الخلفي
1.01	1.135	البحيرة الممتلئة
11%		الفارق بين الطريقتين

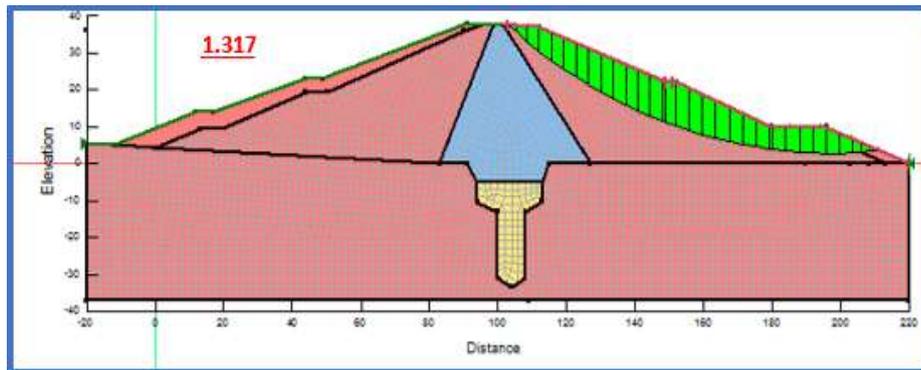
❖ نلاحظ انخفاض في معاملات الأمان في طريقة العناصر المنتهية وقريبة من القيمة 1.0 عامل الأمان الحدي المسموح الممثل لتقييم الأمان وإرشادات السلامة في السدود الركامية [8]، لذلك تم اقتراح طريقتين لزيادة قيمة معاملات الأمان بهدف ضمان أمان واستقرار السد.

#### المقترح الأول: تخفيض ميول منحدرات السد من خلال إضافة طبقات ردمية

نقوم بتقليل زاوية ميل المنحدر على الأفق أو بتغيير الميل من 1:2 حتى 1:2.5 في المنحدر الخلفي ومن 1:2.5 حتى 1:3 في المنحدر الأمامي بهدف زيادة استقرار المنحدر كما هو موضح بالشكل (20) فنتبين بالدراسة أن معامل الأمان للمنحدر الخلفي وصل إلى 1.317 كما هو موضح بالشكل (21).



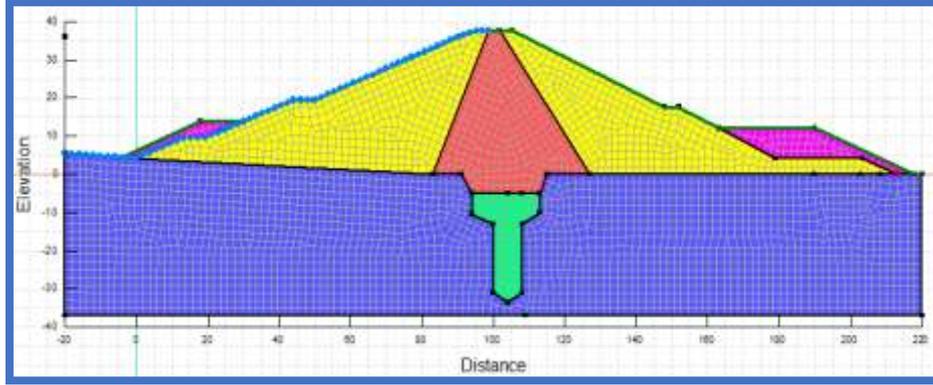
الشكل (20) تخفيض ميول منحدرات السد من خلال إضافة طبقات ردمية.



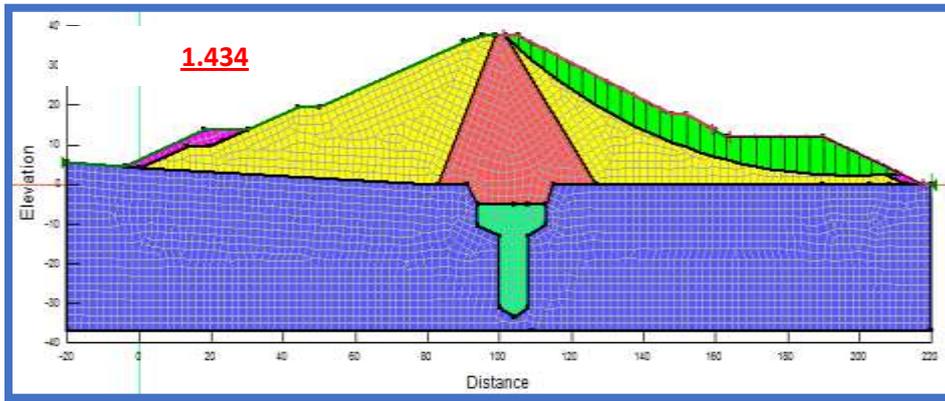
الشكل (21) معامل الأمان للمنحدر الخلفي لسد البلوطة في حال تخفيض ميول منحدرات السد من خلال إضافة طبقات ردمية.

#### المقترح الثاني: تقوية منحدرات السد من خلال إضافة ردمية أمامية وخلفية

نقوم بإضافة ردمية جانبية لزيادة قدرة المنحدر على مقاومة الإجهادات القاصة والقوى الميكانيكية المسببة للانزهار كما هو موضح بالشكل (22) وقد اختيرت بعرض 25 م وبميل 1:2 وبارتفاع 14 م ويعادل ثلث ارتفاع السد وذلك تجريبياً بعد أن أثبتت فعاليته في تأمين استقرار المنحدر بعامل أمان وصل إلى 1.434 كما هو موضح بالشكل (23).



الشكل (22) إضافة مصطبة أمامية وخلفية لتقوية المنحدر الخلفي لسد البلوطة.



الشكل (23) معامل الأمان للمنحدر الخلفي لسد البلوطة في حال إضافة مصطبة أمامية وخلفية لتقوية المنحدر.

## الاستنتاجات والتوصيات:

### الاستنتاجات:

- ✓ السد مستقر بعوامل أمان لا تقل عن 1.5 بالنسبة للتحليل الستاتيكي ولا تقل عن 1.3 بالنسبة للتحليل الديناميكي وذلك في جميع الحالات (البحيرة الممتلئة والفارغة) للمنحدرين الخلفي والأمامي.
- ✓ الإجهادات الأعظمية عند قاعدة السد في حالة التحليل الستاتيكي والديناميكي أصغر من قدرة تحمل الأساس، وبالتالي السد مستقر.

- ✓ زلزالياً السد مستقر ومقاوم للزلازل التي يبلغ تسارعها 0.4g وهي توافق ذروة التسارع الزلزالي في المنطقة.
- ✓ عند دراسة حالة التفريغ السريع لسد البلوطة بالتحليل الديناميكي عند سرعة تفريغ  $V=0.001$  m/day تعطي قيمة معامل الأمان حدية 1.1 وذلك عند تفريغ نصف البحيرة، وفي حالة التفريغ لنصف البحيرة ستخضع عوامل الأمان ويصبح السد غير مستقر بمختلف سرعات التفريغ.

### التوصيات:

- ضرورة استخدام أسلوب التحليل الديناميكي في الدراسات المحلية لاستقرار السدود على الأحمال الزلزالية لأن التحليل شبه السكوني لا يعطي تصور حقيقي عن سلوك المنشأة أثناء الزلزال ولا يأخذ بعين الاعتبار تغير الخواص الديناميكية للتربة وحالة تزايد ضغط ماء المسام.

- يجب وبشكل عاجل معالجة البيانات (التسجيلات) الزلزالية الحقيقية في سورية ومكاملتها مع الانزياحات المسجلة من الأقمار الصناعية والمعلومات الجيولوجية والنماذج المتوفرة وإجراء حسابات تغيرات الضغط (الإجهاد) نتيجة زلزال 6 شباط وما يليه من هزات ارتدادية.
- في حال حدوث تضرر في السدود يجب البدء بالتفريغ التدريجي بعد الزلزال لمنع تشكل سطوح انهيار بفعل خطوط التسرب التراجعية ويهدف تخفيض ضغط ماء المسام المتزايد والذي من الممكن أن يتشكل في المناطق المشبعة من السد.
- وضع خريطة خطر زلزالي جديدة في سوريا توضح وضع المنطقة وتوزعات الضغط والأماكن الأكثر احتمالية لحدوث الهزات (من قبل المختصين وممن تتوفر لديهم هذه البيانات) لدراسة السدود المنشأة وقيد الإنشاء بشكل أدق لتقليل الخطر المحتمل.

### References:

1. Baziar, M. H. Salemi, S. Heidari, T. Analysis of Earthquake Reponse of an Asphalt Concrete Core-Embankment Dam. International Journal of Civil Engineering, 2006, Sep, Vol. 4, No. 3, 192-210.
2. Chatterjee, K. Choudhury, D. Seismic Stability Analysis of Soil Slopes Using Analytical and Numerical Approaches. ISET Golden Jubilee Symposium, Indian Society of Earthquake Technology, Department of Earthquake Engineering Building, 2012, Oct, 20-21.
3. Valtersson, D. Johansson, L. Stability Analysis of Non-over flow Section of Concrete Gravity Dams. Luleå University of Technology, Nanjing, China, Jul 2018, 69.
4. Khattab, S. A. Stability Analysis of MOUSEL Dam under Saturated and Unsaturated Soil Condition. Al-Rafidain engineering, 2010, Jan, Vol. 18, No. 1, 13-27.
5. Namdar, A. Pelko, A. K. Seismic Evaluation of Embankment Shaking Table Test and Finite Element Method. Mysore University, Mysore, India, 2010, 699-707.
6. Manuals Geo-studio, 2011.
7. Habil, H.J. Beyerm, W. Wasserbereitstellung zur Bewässerung. DDR- 1040 Berlin, Reihardistr, 14, Lizenznummer 101-175, 1981, 90 p.
8. FERC. Federal Energy Regulatory Commission Engineering Guidelines for the Evaluation of Hydropower Projects – Chapter 4 – Embankment Dams. FERC, [s.l.] 2006, 90 p.
9. Huang, J. Seismic Response Evaluation of Concrete Gravity Dams Subjected to Spatially Varying Earthquake Ground Motions. A Thesis Submitted to the Faculty of Drexel University, June, 2011.
10. Petaccia, G. Lai, C.G. Milazzo, C. Natale, L. The collapse of the sella Zerbino gravity dam. Elsevier journal, Engineering Geology, VOL.211, 2016, 39-49.
11. Syria Arab Code, for the design and implementation of installations with reinforced concrete. Fourth edition. Damascus, 2012.