

دراسة تأثير تبدد ضغط الماء المسامي على استقرار السدود الترابية (حالة سد الحويز)

الدكتورة فاطمة فويتي*

(تاريخ الإيداع 29 / 8 / 2013. قِيلَ للنشر في 7 / 10 / 2013)

▽ ملخص ▽

نركز في هذا البحث على تأثير تبدد ضغط الماء المسامي على استقرار سد الحويز، حيث يتم الانتقال من شروط الحالة المستقرة للتسرب إلى شروط الحالة الانتقالية للجريان غير المستقر، وتصبح المعادلات المستخدمة في حساب النموذج الهيدروليكي هي معادلات الجريان للحالة المشبعة وغير المشبعة، التي من خلالها يمكن دراسة وتحليل تبدد ضغط الماء المسامي، عملية تحليل الرشح تتبع للزمن، مع الأخذ بعين الاعتبار أن الناقلية الهيدروليكية والمحتوى المائي في التربة هي توابع لضغط الماء المسامي، هذه التوابع تعطي انتقالاً انسيابياً للنموذج المدروس، حيث تعد الحالة المشبعة حالة خاصة للمعادلات المستخدمة. تبين من التحليل أن الضغط المسامي يتغير بشكل ملحوظ في حالة التسرب المستقر عن حالة التفريغ السريع قبل وبعد تأهيل سد الحويز، وأن قيم عوامل الأمان الناتجة من استخدام البرنامج slope/w تتوافق مع القيم المحسوبة يدوياً.

الكلمات المفتاحية: ضغط الماء المسامي، عامل الأمان، التسرب المستقر، التسرب غير المستقر، الناقلية الهيدروليكية، المحتوى المائي الحجمي.

* أستاذ مساعد - قسم الهندسة المائية والري - كلية الهندسة المدنية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

Effect of the Dissipation of Pore Water Pressure on the Stability of Earth Dams (case study: Huaz Dam)

Dr. Fatima Fouiti*

(Received 29 / 8 / 2013. Accepted 7 / 10 / 2013)

▽ ABSTRACT ▽

In this paper, we focus on the effect of water pore pressure dissipation to stability of the earth dam where the transition from the terms of the steady-state seepage to transient unsteady flow conditions is happened, and the used equations calculating the hydraulic model are saturated/unsaturated flow equations. These equations allow us to study and analyze pore water pressure dissipation. The infiltration process is dependent to time concerning that; hydraulic conductivity and volumetric water content in the soil are functions of pore water pressure. These disciplines give a smooth transition of the studied model where the saturated state is considered as a special case of the used equations.

Analysis showed that the pore pressure changes significantly in the case of steady state seepage on the status of the rapid drawdown before and after rehabilitation of al Huaz dam, and the values of safety factors resulting from the use of the slope/w program correspond with the values calculated manually.

Keywords: pore water pressure, factor of safety, steady state, unsteady state, hydraulic conductivity, volumetric water content.

* Associate Professor in Department of water construction and Irrigation - Faculty of Civil Engineering - Tishreen University - Lattakia – Syria.

مقدمة :

تتعرض السدود الترابية خلال مرحلة الاستثمار لتغيرات كبيرة في ضغوط الماء المسامي الناجمة عن تغير منسوب المياه المتجمعة في بحيراتها. تبدأ عملية تعرض جسم السد لضغط الماء المسامي منذ مرحلة الإملاء الأول للبحيرة، ويعتبر ذلك التحقق الأول من صحة الدراسة والتنفيذ والتأكد من استقرار السد وثباته، وعند وصول المياه إلى المنسوب التصميمي، واستقرار خط الرش داخل جسم السد. تصبح حالة التسرب المستقر هي الحالة المسيطرة. في مرحلة عمل السد والبدء بسحب المياه لأغراض الري، أو الشرب. تنتقل حالة التسرب إلى الحالة غير المستقرة، وتحصل حالة الإشباع-عدم الإشباع بالتزامن مع انخفاض وارتفاع منسوب خط الرش. والحالة التي تشكل خطورة أكبر على أمان واستقرار السد هي الانخفاض المفاجئ والسريع لمنسوب المياه، كما في الحالات الطارئة والاستثنائية. حيث ينخفض عامل استقرار الوجه الأمامي تحت تأثير تزايد ضغط الماء المسامي خلال عملية التفريغ.

تكن صعوبة دراسة التفريغ السريع وتأثيره في الشروط الطرفية المتغيرة مع الزمن [3]، [11]، [19]، [20]، حيث إن ضغط الماء المسامي داخل جسم السد يتغير بتغير منسوب الماء أثناء عملية التفريغ، ويستمر ضغط الماء المسامي في التغير بعد انتهاء عملية التفريغ لفترة من الزمن، وذلك تبعاً لنفاذية التربة المكونة لجانب السد الترابي، وخواص تخزينها، وعامل الناقلية الهيدروليكية، والمحتوى المائي الحجمي، فالمواد ذات النفاذية العالية تتجاوب هيدروليكيًا بسرعة أثناء التفريغ السريع، على عكس المواد الكثيفة التي تحتاج لوقت طويل، وتزايد ضغط الماء المسامي يؤدي إلى تغير في قيمة الإجهادات الفعالة ضمن جسم السد، ونقص في مقاومة التربة على القص، الذي يؤدي بدوره لتغير عامل استقرار الجانب الأمامي، وتغير عامل الأمان الموافق له.

أهمية البحث وأهدافه :

هدف البحث هو دراسة تبدد ضغط الماء المسامي في سد الحويز عند تغير مناسيب مياه البحيرة خلال التفريغ السريع، وتأثيره على قيم عوامل أمان الجانب المبلل، وإيجاد قيم الضغوط المسامية المتولدة في السد وأساسه باستخدام طريقة العناصر المنتهية وحزمة البرامج الهندسية GeoStudio [9]، [14]، [15]، [16].

طرائق البحث ومواده:**الألغوريتم الرياضي**

أغلب مسائل الرش يمكن نمذجتها بشكل كاف وملائم في الحالة المستوية ثنائية البعد، أو المتناظرة محورياً وبشروط طرفية محددة [18]، باستخدام الجريان المستقر للمياه المتسربة، وفي الحالات الأخرى فإنه من اللازم استخدام حالة جريان المياه المتسربة غير المستقرة، مثل نموذج خروج خطوط الرش من منحدرات السدود. حيث تعتبر الناقلية الهيدروليكية والمحتوى المائي الحجمي من أهم خواص التربة في مسائل التسرب، وهي توابع لضغط الماء المسامي في نظام الجريان المشبع وغير المشبع، بدوره ضغط الماء المسامي يعتمد على مواصفات التربة المتجانسة وغير المتجانسة.

يتبع الجريان في التربة المشبعة وغير المشبعة لقانون دارسي، كما يتناسب الجريان مع الميل الهيدروليكي والناقلية الهيدروليكية (معامل النفاذية)، مع الإشارة إلى أن الناقلية الهيدروليكية غير حساسة لضغط الماء المسامي في التربة المشبعة، وتختلف بشكل كبير في التربة غير المشبعة مع تغيرات هذا الضغط، و العلاقة بين الناقلية

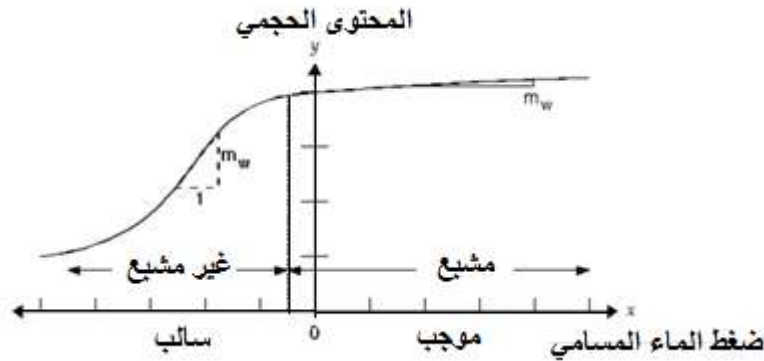
الهيدروليكية وضغط الماء المسامي نعرفها بتابع الناقلية، ويحدد هذا التابع من أجل حالات الترب المشبعة وغير المشبعة ولكل طبقة من طبقات التربة. تغير الناقلية الهيدروليكية مع ضغط الماء المسامي يجعل معادلات العناصر المنتهية غير خطية، ويتطلب حلها عملية التكرار المتتالي، حيث تكون الحمولة الهيدروليكية (وهي مجموع ضغط الماء المسامي مضافاً إليها ارتفاع منسوب الماء) مجهولة، وبما أن الناقلية الهيدروليكية ترتبط بالحمولة الهيدروليكية، فهي تعتمد على النتائج المحسوبة خلال عملية التكرار مع الزمن، وقدرة التربة على تخزين الماء يحدد من منحنى خواص التربة - ماء، وهذا المنحنى يكون مطلوب عند تحليل الجريان غير المستقر، أي عندما تكون كمية المياه الداخلة إلى عنصر حجمي من التربة أكبر من كمية المياه الخارجة منه أو بالعكس، وهذا ينتج من الحجم الحقيقي للماء المتبقي أو المتبخر خلال تزايد الزمن. أما في حالة الجريان المستقر فتكون كمية المياه الداخلة إلى عنصر حجمي من التربة تساوي كمية المياه الخارجة، وعندها لا نحتاج لهذا التابع.

تشكيل المعادلات: تشكيل المعادلات العامة للرشح يعتمد على معرفة العلاقة بين ضغط الماء المسامي والمحتوى المائي الحجمي، فعند جريان الماء خلال التربة فإنها تحتفظ بقسم منه، ويخزن قسم آخر حول جزئيات التربة المشكلة لهيكل التربة وهذا القسم من الماء المخزن هو تابع لضغط الماء المسامي، ويحدد الصفات المميزة لبنية التربة. لتحليل مسألة الرشح من المناسب تحديد القسم المخزن من الماء الجاري كنسبة من الحجم الكلي، هذه النسبة تعرف بالمحتوى المائي الحجمي حسب المعادلة:

$$\theta = \frac{v_w}{v} \quad (1)$$

حيث: θ - المحتوى المائي الحجمي. v_w - حجم الماء. v - الحجم الكلي.

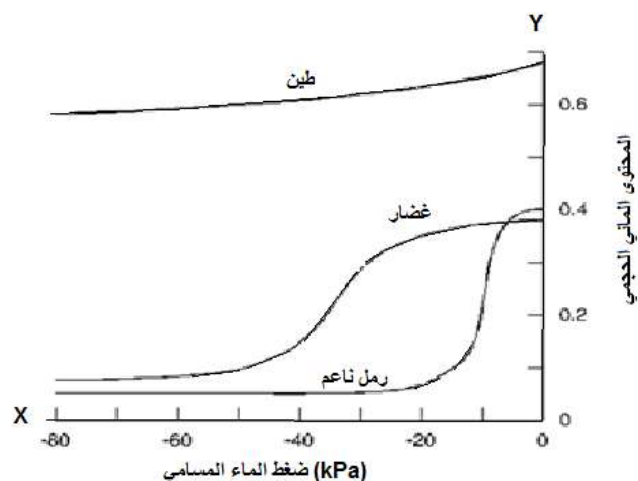
المحتوى المائي الحجمي θ يتبع لضغط الماء المسامي، والشكل (1) التالي يوضح هذه العلاقة، والتي تسمى أيضاً بتابع المواصفات المميزة للتربة - ماء [5].



الشكل (1) المنحنى العام لتابع المحتوى المائي الحجمي [18]

عند دراسة التربة المشبعة كلياً، تكون درجة الإشباع 100% والمحتوى المائي الحجمي يعادل مسامية التربة n ، ويكون ضغط الماء المسامي قريب من الصفر والحمولة الخارجية الكلية المؤثرة على التربة تبقى ثابتة، هذا يسبب انتقال التربة والنتيجة تزايد في المحتوى المائي. وعندما يصبح ضغط الماء المسامي سالباً تبدأ التربة بالتصريف والمحتوى المائي يتناقص حتى تصبح التربة مصرفة تماماً، والمحتوى المائي لا يتغير مع تناقص ضغط الماء المسامي. ميل المنحنى المميز للتربة - ماء m_w المبين في الشكل (1) يشير إلى نسبة التغير بحجم الماء المتبقي في التربة مع تغير ضغط الماء المسامي. في المجال الموجب لضغط الماء المسامي يصبح m_w (الذي يستخدم في

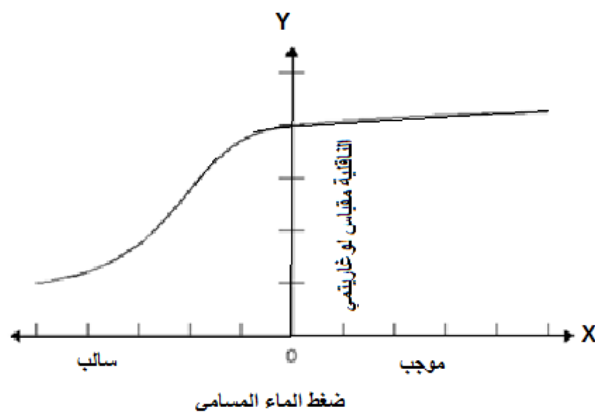
المرحلة الانتقالية للرشح) معادلاً m_v وهو معامل الانضغاطية، تابع المنحني المميز التربة - ماء للترب ذات الحبيبات الناعمة (كالغضار) يكون منبسط نسبياً، بينما للترب ذات الجزيئات الخشنة (كالرمل) يكون شديد الانحدار، الشكل (2) يبين المنحنيات الحقيقية لمحتوى الماء الحجمي الذي تم الحصول عليه 1979 للرمل الناعم والطيني والغضار [18] [8]، الاختلاف في هذه المنحنيات يبين أن خواص التربة تؤثر على التوابع المميزة.



الشكل (2) يبين توابع المحتوى المائي الحجمي الحقيقية للرمل الناعم والطيني والغضار [18]

توابع الناقلية الهيدروليكية:

باعتبار أن الماء سائل يجري على طول شرائح متلاصقة من التربة، والتي تعتبر كأقنية جريان مستمرة، وذلك عندما تكون التربة مشبعة، حيث كل الأقنية المتاحة مستخدمة، وفي هذه الحالة تكون قدرة الناقلية الهيدروليكية للماء أعظمية، وعند تناقص محتوى الماء فإن ذلك يؤثر على إنقاص حجم وعدد أقنية الجريان، حتى يتلاشى الجريان، وفي هذا السياق الناقلية الهيدروليكية تتعلق بالمحتوى المائي، وبما أن المحتوى المائي هو تابع لضغط الماء المسامي فإن الناقلية الهيدروليكية هي أيضاً تابع لضغط الماء المسامي، نسمي قدرة الناقلية الهيدروليكية للماء بمعامل الانضغاطية، يبين الشكل (3) منحنى نموذجي للعلاقة بين الناقلية الهيدروليكية للماء و ضغط الماء المسامي [18].



الشكل (3) يبين تابع الناقلية الهيدروليكية [18]

تحديد الناقلية الهيدروليكية لمنطقة ضغط الماء المسامي السالب تجعل من الممكن تحليل المسألة المتضمنة الجريان المشبع كما الجريان غير المشبع.

قانون الجريان: الصيغة المستخدمة لجريان الماء في التربة المشبعة و غير المشبعة هي قانون دارسي وله الصيغة [13]، [4]:

$$q = k \cdot i \quad (2)$$

حيث:

q - الجريان النوعي ، k - الناقلية الهيدروليكية، i - ميل حمولة الجريان.
الفرق الوحيد أنه تحت شروط الجريان غير المشبع يكون عامل الناقلية غير ثابت ويختلف مع تغيرات محتوى الماء، وبشكل غير مباشر مع تغيرات ضغط الماء المسامي. تعطي سرعة الجريان بحسب قانون دارسي من العلاقة:

$$V = k \cdot i \quad (3)$$

حيث:

V - تعرف بسرعة دارسي.

المعادلات التفاضلية التي تحدد عملية الرشح في الترب تحدد من المعادلة التالية:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (4)$$

حيث: H - الحمولة الكلية، k_x - الناقلية الهيدروليكية بالاتجاه x ، k_y - الناقلية الهيدروليكية بالاتجاه y ، Q - التدفق الطرقي المطبق، θ - المحتوى المائي الحجمي، t - الزمن.

تنص المعادلة على أن الاختلاف بين الجريان الداخل والخارج من عنصر حجمي في لحظة معينة من الزمن يساوي للتغير في المحتوى المائي الحجمي، كما تنص أساساً على أن مجموع نسب التغير في الجريان في الاتجاهين x و y مع الجريان الخارجي المطبق يساوي إلى نسبة تغير محتوى الماء الحجمي بالعلاقة مع الزمن. ففي ظروف الجريان المستقر يكون الجريان الداخل والخارج من العنصر الحجمي هو نفسه مع الزمن. وبالتالي الطرف اليميني من المعادلة يصبح معدوم، وتصبح المعادلة بالشكل التالي:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = 0 \quad (5)$$

التغير بالمحتوى المائي الحجمي يتعلق بتغير حالة الإجهاد وخواص التربة، وحالة الاجهاد من أجل حالتي الإشباع وعدم الإشباع يمكن التعبير عنها بمتحولين وهما u_a و u_w [6] و [7].

حيث: u_a - ضغط الهواء المسامي، u_w - ضغط الماء المسامي.

وضعت المعادلات تحت شروط ثبات الضغط الكلي، أي لا يوجد تحميل وإعادة تحميل لكتلة التربة، الفرضية الثانية أن ضغط الهواء المسامي يبقى ثابت عند الضغط الجوي خلال الفترة الانتقالية أي أن $u_a - \sigma$ تبقى ثابتة، ولا تؤثر على تغير محتوى الماء الحجمي المتعلق فقط بتغيرات $u_a - u_w$ ومع بقاء u_a ثابتة، ويكون التغير بمحتوى الماء الحجمي $\partial \theta$ تابع فقط لتغيرات ضغط الماء المسامي ∂u_w حسب المعادلة:

$$\partial \theta = m_w \partial u_w \quad (6)$$

حيث: m_w - ميل منحنى التخزين.

والحمولة الهيدروليكية الكلية تحدد بالمعادلة التالية:

$$H = \frac{u_w}{\gamma_w} + y \quad (7)$$

حيث:

$-u_w$ - ضغط الماء المسامي، $-\gamma_w$ - الوزن الحجمي للماء، $-y$ - منسوب النقطة المدروسة. فإذا كانت توابع الإحداثيات المستخدمة في طريقة العناصر المنتهية هي:

$$X = \langle N \rangle \cdot \{x\} \quad (8)$$

$$Y = \langle N \rangle \cdot \{y\} \quad (9)$$

حيث:

N - الشعاع الممثل لتوابع الشكل أو توابع التحويل [2].

$\{x\}$ و $\{y\}$ - هي الإحداثيات العامة لعقد العنصر.

x ، y - هي الإحداثيات المحلية لعقد العنصر.

المتغيرات في مسألة الرشح هي الحمولة الكلية H ، ومن الضروري الحصول على توزيع الحمولة الكلية H داخل العنصر، الذي يرتبط بتوابع التحويل، وهذا يعني أن توزيع الحمولة هو خطي عندما نتجاهل العقد الثانوية في العناصر المنتهية وغير خطي عند وجود العقد الثانوية، ومعادلة توزيع الحمولة هي:

$$h = \langle N \rangle \cdot \{H\} \quad (10)$$

حيث: $-h$ - الحمولة عند أي إحداثية محلية

$\langle N \rangle$ - الشعاع الممثل لتوابع الشكل (توابع التحويل)

$\{H\}$ - شعاع الحمولات في العقد

ونستطيع كتابة معادلة العنصر المنتهي بالشكل:

$$[K]\{H\} + [M]\{H\}_{,t} = \{Q\} \quad (11)$$

حيث:

$$[K] = t \int_A [B]^T [C] [B] dA \quad \text{- المصفوفة المميزة للعنصر}$$

$$[M] = t \int_A (\lambda \langle N \rangle^T \langle N \rangle) dA \quad \text{- مصفوفة الكتلة}$$

$$\{Q\} = q \cdot t \int_L (\langle N \rangle^T) dL \quad \text{- شعاع الجريان المطبق}$$

المعادلة (11) هي المعادلة العامة للعنصر المنتهي عند تحليل مسألة الرشح المستقر وغير المستقر (الانتقالي)

ففي الحالة المستقرة تكون الحمولة غير تابعة للزمن، وبالتالي فإن الحد $[M]\{H\}_{,t}$ يتلاشى للصفر، وتصبح بالشكل:

$$[K]\{H\} = \{Q\} \quad (12)$$

وفي الحالة غير المستقرة (الانتقالية) تكون المسألة تابع للزمن، كما يوضح الحد $\{H\}_{,t}$ ، وزمن التكامل ينجز

من تقريب الفروق المنتهية [17]، وتصبح المعادلة بالشكل:

$$(\alpha \cdot \Delta t [K] + [M])\{H_1\} = \Delta t ((1 - \alpha)\{Q_0\} + \alpha\{Q_1\}) + ([M] - (1 - \alpha)\Delta t [K])\{H_0\} \quad (13)$$

حيث:

$-\Delta t$ - خطوة تزايد الزمن. $-\alpha$ - نسبة تتراوح بين 0 و 1، $\{H_1\}$ - الحمولة عند نهاية خطوة تزايد الزمن،

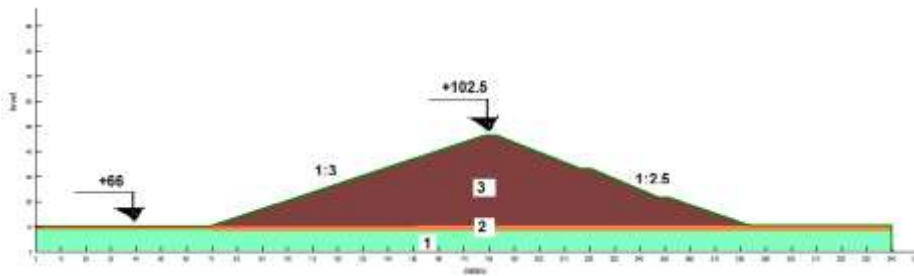
$\{H_0\}$ - الحمولة عند بداية خطوة تزايد الزمن، $\{Q_1\}$ - الجريان في العقدة عند نهاية خطوة الزمن،

$\{Q_0\}$ - الجريان في العقدة عند بداية خطوة الزمن، $[K]$ - المصفوفة المميزة للعنصر. $[M]$ - مصفوفة الكتلة.

وباستخدام التكامل العددي (لغوص) من أجل تحديد المصفوفة المميزة للعنصر $[K]$ ومصفوفة الكتلة $[M]$ ، يتم الحل لمرة واحدة، وتحسب الحمولة العقدية والميول الهيدروليكية وسرعة الجريان دارسي عند كل نقطة تكامل ضمن كل عنصر. عندما تكون الناقلية الهيدروليكية تابع للحمولة، تكون مواصفات التربة غير معروفة عند بداية التحليل، وبالتالي من أجل حل المعادلات فإن الأمر يتطلب مخطط التكرار في استخدام تقنية التعويض المتكرر، ومن أجل أول تكرار يحدد المستخدم الحمولة الأولية أثناء تحديد مواصفات المادة، وفي العمليات التالية يتم حساب الحمولة كوسطي بين القيمة المحسوبة السابقة والحالية.

التطبيق العملي: سد الحويز قبل وبعد التأهيل

يقع سد الحويز جنوب شرق مدينة اللاذقية بمسافة حوالي 40 كم، وتم بناؤه في الفترة بين 1980-1986 لاستخدامات الري، وهو سد ركامي متجانس يبلغ ارتفاعه 37 م، منسوب القمة 102.5 م عن سطح البحر وعرضها 6 م، طول السد 305 م، ميل الجانب الأمامي 1:3 والجانب الخلفي 1:2.5 [1]. الشكل (4) يبين مقطعاً عرضياً للسد قبل التأهيل ومواصفات الطبقات المشكلة للسد وأساسه، بعد وضعه في الاستثمار تبين وجود رشح عبر جسم السد، يظهر عند المنسوب 78 م، عندما يكون منسوب الماء في البحيرة عند المنسوب 82-84+ م، تمت دراسة الأسباب في العام 1996 بإجراء تجارب النفاذية على السبر رقم 2 الواقع على محور السد عند الارتفاع الأعظمي للمقطع العرضي، ووجد أن عامل نفاذية العشرة أمتار العلوية لجسم السد $k_{\phi} = 0.34 \text{ m/day}$ ولبقية الارتفاع $k_{\phi} = 0.015 \text{ m/day}$ [1]. وتم اتخاذ قرار من قبل الجهة الدارسة بحل المشكلة عن طريق بناء جدار كتامة مركزي، وتعلية السد بمقدار 5 م بنفس الوقت للاستفادة من كمية تخزين إضافية لأغراض الري، المقطع العرضي للسد بعد التأهيل مبين بالشكل (5) وكذلك مواصفات طبقات التربة المشكلة له.



الشكل (4) يبين مقطعاً عرضياً للسد قبل التأهيل ومواصفات الطبقات المشكلة للسد وأساسه [1]

الطبقة	الكثافة (KN/m^3)	زاوية الاحتكاك الداخلي ($^\circ$)	التماسك (kPa)
1	21.5	26.5	200
2	20.3	14	40
3	20.3	28.8	30



الشكل (5) يبين مقطعاً عرضياً للسد بعد التأهيل و مواصفات طبقات التربة المشكلة له [1]

الطبقة	الكثافة (KN/m ³)	زاوية الاحتكاك الداخلي (°)	التماسك (kPa)	النفذية (m/day)
1	21.5	26.5	200	0.01
2	20.3	14	40	0.12
3	20.3	28.8	30	0.015
4	16.7	28.8	0	نفذية عالية
5	18.5	33	0	نفذية عالية
6	20.8	21.8	25	0.001
7	21	33	30	0.0001

النتائج والمناقشة:

تمت في هذا البحث دراسة تبيد ضغط الماء المسامي، وكذلك استقرار السد وقيم عوامل الأمان قبل وبعد التأهيل باستخدام البرنامج الحاسوبي Slope/w ، بعد أخذ الشروط الطرفية المناسبة لكل حالة من حالات الحساب، ومقارنتها مع الحسابات المقدمة من الجهة الدارسة، يبين الجدولان (1) و (2) عوامل الأمان المحسوبة من قبل الجهة الدارسة قبل وبعد التأهيل [1]، ويبين الجدولان (3) و (4) عوامل الأمان المحسوبة باستخدام البرنامج الحاسوبي المذكور قبل وبعد التأهيل.

الجدول (1) عوامل الأمان المحسوبة من قبل الجهة الدارسة قبل التأهيل.

الجانب	منسوب الماء في البحيرة	عامل الأمان الأصغري
الخلفي	الارتفاع الأعظمي +98	1.42
الأمامي	تفريغ البحيرة حتى المنسوب +80	1.16

الجدول (2) عوامل الأمان المحسوبة من قبل الجهة الدارسة بعد التأهيل.

الجانب	منسوب الماء في البحيرة	عامل الأمان الأصغري
الخلفي	الارتفاع الأعظمي +98	1.43
الأمامي	تفريغ البحيرة حتى المنسوب +80	1.44

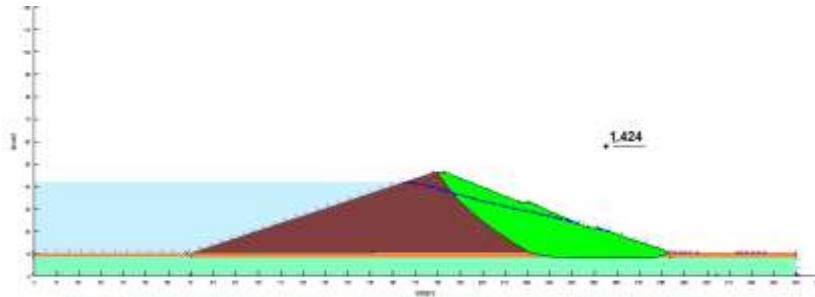
الجدول (3) عوامل الأمان المحسوبة بالبرنامج slope/w قبل التأهيل.

الجانب	منسوب الماء في البحيرة	عامل الأمان الأصغري
الخلفي	حالة التسرب المستقر الارتفاع الأعظمي +98	1.424
الأمامي	حالة التسرب المستقر الارتفاع الأعظمي +98	2.68
الأمامي	تفريغ سريع للبحيرة حتى المنسوب +80	1.595

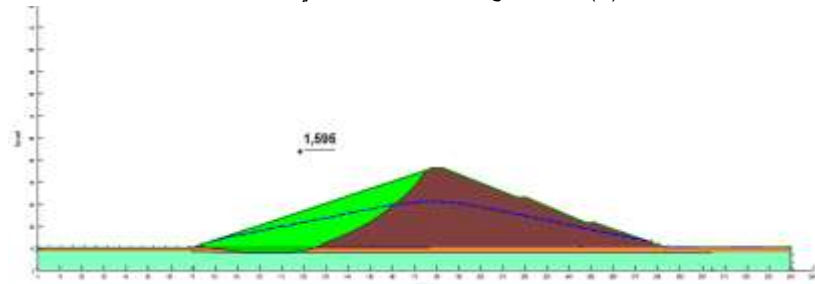
الجدول (4) عوامل الأمان المحسوبة بالبرنامج slope/w بعد التأهيل.

الجانب	منسوب الماء في البحيرة	عامل الأمان الأصغري
الخلفي	حالة التسرب المستقر الارتفاع الأعظمي +98	1.13
الأمامي	حالة التسرب المستقر الارتفاع الأعظمي +98	1.56
الأمامي	تفريغ البحيرة حتى المنسوب +80	1.684

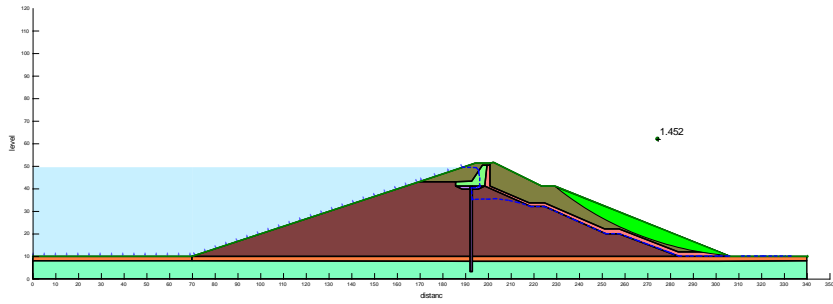
تبين الأشكال (6) (7) (8) و(9) التالية سطوح الانزلاق، التي تم الحصول عليها من البرنامج slope/w من الحزمة GeoStudio [18] للحالة قبل التأهيل وبعد التأهيل، كما تم حساب ضغط الماء المسامي بالبرنامج seep/w ، وحصلنا على النتائج التالية المبينة على الأشكال (10) (11) (12) و(13) للحالة قبل وبعد التأهيل.



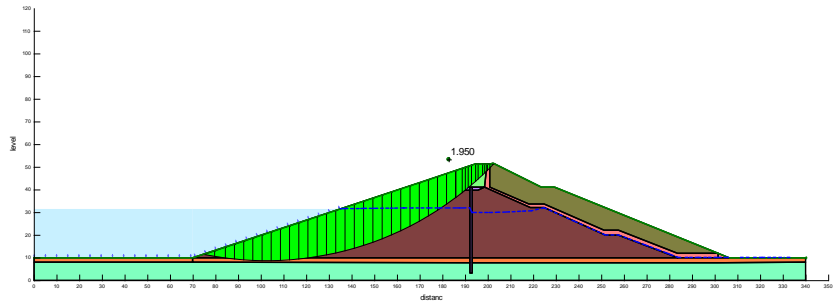
الشكل (6) يبين سطح الانزلاق للوجه الخلفي للسد قبل التأهيل



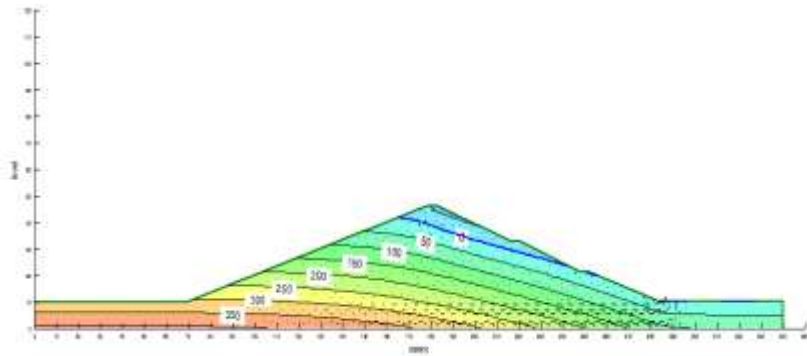
الشكل (7) يبين سطح الانزلاق للوجه الأمامي للسد قبل التأهيل حالة التفريغ السريع



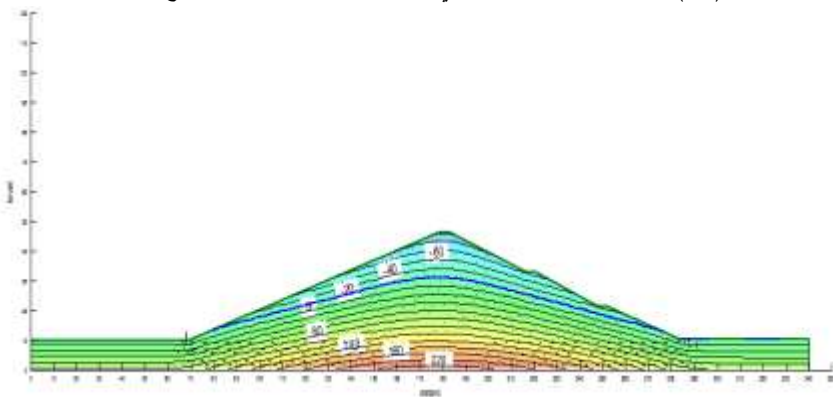
الشكل (8) يبين سطح الانزلاق للوجه الخلفي للسد وخط الرشح بعد التأهيل



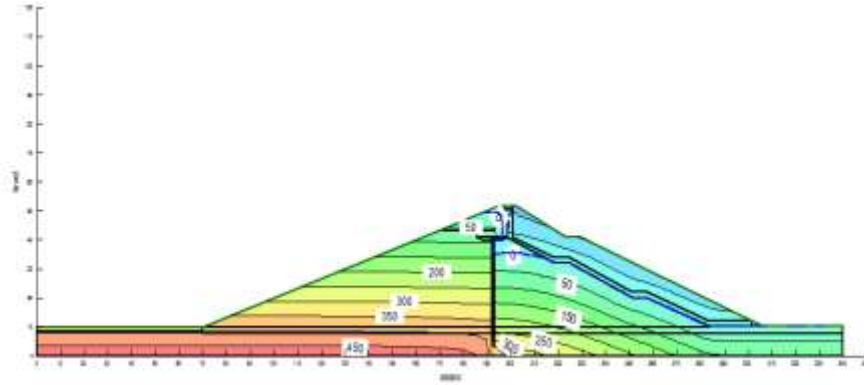
الشكل (9) يبين سطح الانزلاق للوجه الأمامي للسد وخط الرشح بعد التأهيل حالة التفريغ السريع



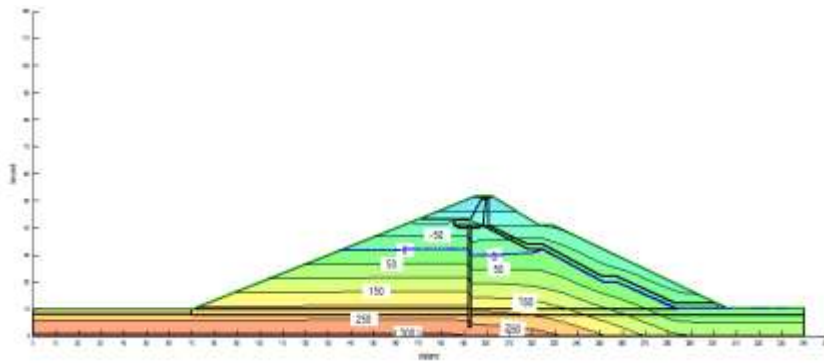
الشكل (10) يبين ضغوط الماء المسامي حالة التسرب المستقر بالبرنامج قبل التأهيل



الشكل (11) يبين ضغوط الماء المسامي في جسم السد المتجانس أثناء التفريغ السريع قبل التأهيل



الشكل (12) يبين ضغوط الماء المسامي حالة التسرب المستقر في جسم السد بعد التأهيل



الشكل (13) يبين ضغوط الماء المسامي أثناء التفريغ السريع بعد التأهيل

الاستنتاجات والتوصيات:

- 1- أعطت عوامل الأمان المحسوبة حاسوبياً للوجه الخلفي قبل التأهيل قيمة مقبولة ومتوافقة مع الواقع، حيث لم يحصل أي انهيار رغم وجود مناطق رطوية عالية على هذا الوجه، مع أن القيم المقدمة من الجهة الدارسة أعطت القيمة 1.16 ، التي تعتبر أقل من المسموحة حسب الكود الروسي.
- 2- أعطت عوامل الأمان المحسوبة حاسوبياً للوجه الخلفي بعد التأهيل قيمة أصغر من المسموحة، وهذا يتطلب إعادة النظر بالميل المعطى لهذا الجانب. أما عوامل الأمان المحسوبة حاسوبياً للوجه الأمامي فهي مقبولة ومتوافقة مع الواقع.
- 3- تتراوح قيم ضغط الماء المسامي للسد المتجانس قبل التأهيل لحالة التسرب المستقر بين $0-350$ KN/m^3 بينما يحصل تبيد للضغط المسامي أثناء التفريغ السريع، وقيمته العظمى 220 KN/m^3 ، و تتراوح قيم ضغط الماء المسامي للسد بعد التأهيل عند التسرب المستقر بين $0-450$ KN/m^3 ، ويحصل تبيد للضغط المسامي أثناء التفريغ السريع، ويصل لقيمة عظمى مقدارها 300 KN/m^3 .

المراجع:

- [1]- Al-sinn Project, *Final Detailed Design Report. Second Phase*. 13/95-05-09. Moscow, 1997.
- [2]- BATHE, K-J., *Finite Element Procedures in Engineering Analysis*. Prentice-Hall, 1982, Pp. 200-230.
- [3]- BERILGEN M. M., *Investigation of stability of slopes under drawdown conditions*, Computers and Geotechnics, 2007, 34(2), 81-91.
- [4]- CHILDS, E. C.; COLLIS-GEORGE, N. *The Permeability of Porous Materials*. Proceedings of the Royal Society, 1950, pp.392-405.
- [5]- FREDLUND, D.G.; RAHARDJO, H., *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. John Wiley & Sons, .Prentice-Hall, 1993.
- [6]-FREDLUND, D.G.; MORGENSTERN, N.R., *Constitutive Relations for Volume Change in Unsaturated Soils*. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 13, 1976, pp. 261-276.
- [7]- FREDLUND, D. G.; MORGENSTERN, N.R., *Stress State Variables for Unsaturated Soils*. ASCE, Vol.103, 1977, pp. 447-464.
- [8]- GILBERT GEDEON, P.E., *Slope Stability, Engineering and Design*, US Army Corps of Engineers, 2003, EM1110-2-1902.
- [9]- HUANG M. S; JIA C. Q., *Strength reduction FEM in stability analysis of soil slopes subjected to transient unsaturated seepage*, Computers and Geotechnics, 36(2), 2009, 93-101.
- [10]- HO,P. G., *The Prediction of Hydraulic Conductivity from Soil Moisture Suction Relationship*. B.Sc. Thesis, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada, 1979.
- [11]- LANE P. A., GRIFFITHS D. V., *Assessment of stability of slopes under drawdown conditions*, J. Geotech. Geoenviron. Eng., ASCE, 2000 , 126(5), 443-450.
- [12]- MURTHY N.S., *Geotechnical Engineering, Principles and Practices of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2006, New York
- [13]- RICHARD, L.A., *Capillary Conduction of Liquids Through Porous Mediums. Physics*, Vol. 1.Canadian Geotechnical Journal, 1931. Vol. 22.
- [14] - *Seepage Modeling with SEEP/W An Engineering Methodology*. 2010-4 Edition.
- [15] - *Stability Modeling with SLOPE/W An Engineering Methodology*.2010-4 Edition.
- [16]-*Stress-Deformation Modeling with SIGMA/W An Engineering Methodology*. 2010- 4 Edition.
- [17]- SEGENLIND, L.J., *Applied Finite Element Analysis*. John Wiley and Sons.1984, Pp.183-185.
- [18]- USER'S GUIDE, *GEO-SLOPE International Ltd*, Calgary, Alberta, Canada, 2002.
- [19]- ZHENG, Y. R.; SHI, W. M.; Kong W. X, et al. *Calculation of seepage forces and phreatic surface under drawdown conditions*, Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 23(18), 2004, 3203-3210.
- [20]- ZHENG, Y. R.; SHI, W. M.; Kong W. X, et al. *Determination of the phreatic line under reservoir drawdown conditions*. GSP 140 Slope and Retaining Structures under Seismic and Static Conditions, Proceeding of ASCE, 2005, 1-10.