

تحليل حساسية التسرب عبر سد متجانس ضمن مجال التربة غير المشبعة

ريم برنبو، عز الدين حسن، منذر حماد
قسم الهندسة المائية والري، كلية الهندسة المدنية، جامعة تشرين، سوريا

Reembr1987@Gmail.Com

Received: 29/07/2020

Accepted: 16/10/2020

المستخلص - يتأثر التسرب عبر السدود الترابية بخصائص الترب المكونة لها، وهذه الخصائص تتصف بالاختلاف زمنياً ومكانياً نتيجة تأثير العوامل المختلفة كالعوامل المناخية وتغيرات رطوبتها نتيجة تغيرات منسوب التخزين في البحيرة أمام السد، لذا يجب أخذ العشوائية المحتملة لهذه البارامترات التي تعكس خصائص الترب وتقييم تأثيرها بما يضمن بقاء التسرب بالحدود الدنيا. يأتي هذا البحث استكمالاً للدراسة المطبقة على عدة أنواع من الترب لمعرفة تأثير تباين بعض بارامترات على التسرب عبر السدود الترابية، واتباع أسلوب جديد يلحظ المنطقة غير المشبعة أعلى خط التسرب عند دراسة التسرب عبر السدود الترابية، مما يتيح أفضل نتيجة لمحاكاة الحالة الفعلية لأي منشأة هندسية (حيث يتم افتراضها ذات قيم ثابتة وسطية في الأبحاث الهندسية السابقة لتبسيط الحل إلا أنها ليست كذلك في الواقع). يهدف البحث لتحليل حساسية التسرب المستقر لتباين قيم معامل الناقلية الهيدروليكية ومحتوى المياه المتبقي ومحتوى الإشباع في سد ترابي متجانس نموذجي، عبر بناء نموذج رياضي ببرنامج Seep/W بعد كتابة كود برمجي بلغة c# للمعادلات المستخدمة نموذجي van Genuchten لتحديد كل من معامل الناقلية الهيدروليكية للتربة غير المشبعة ومحتواها المائي، يتيح توليد قيم عشوائية لها اعتماداً على خصائصها الإحصائية من الأبحاث السابقة. تم اعتماد تقنية Monte Carlo لحل عدد كبير جداً من مرات المحاكاة (5500 نموذج)، كما تم بناء نموذج حتمي للمقارنة. أظهر البحث عدم تأثير تباين جميع بارامترات التربة المدروسة Gravelly sand على التسرب، وإمكانية الاعتماد على قيمها الوسطية الثابتة بدلاً من النماذج العشوائية إذ بلغت أعلى نسبة للاختلاف عن النموذج الحتمي 0.1565% وهو مقدار ضئيل جداً يمكن إهماله.

الكلمات المفتاحية: التربة غير المشبعة - سدود ترابية - التسرب المستقر - المحتوى المائي للتربة - الناقلية الهيدروليكية.

ABSTRACT- Seepage through earth dams is affected by the soils characteristics that form them, which are characterized by the difference in time and place by the influence of various factors such as climatic factors and soil moisture variations because of changes in the storage level in the reservoir in front of the dam. Therefore, the possible randomness of these parameters that reflect the characteristics of the soils must be taken and their effect evaluated to ensure the survival of seepage is minimal. This research comes as a continuation of the study applied to several types of soils to find out the effect of the variation of some of their parameters on seepage through earth dams, and by following a new method that observes the unsaturated zone above the seepage line in earthen dams, which provides the best result to simulate the actual situation of any engineering facility (Where it is assumed with average constant values in previous researches to simplify the solution, but they are not constant in the actual case). The aim of the research is to analyze the sensitivity of the steady state seepage for the variation of the hydraulic conductivity, residual water content and saturated water content in a typical homogeneous earth dam, by building a mathematical model with the Seep/W program after writing a program code in c# for the used equations (van Genuchten model to determine the hydraulic conductivity parameter of unsaturated soil, and the van Genuchten to determine the water content). That allows generating random values for those parameters based on their statistical properties from previous research. The Monte Carlo technique was adopted to solve a very large number of simulations (5500 models), and a deterministic model for comparison was also built. The research showed that the variability of all parameters of the studied soil, gravelly sand, did not affect the seepage, and the ability to rely on its fixed average values instead of random models, as the highest percentage of difference from the deterministic model was 0.1565%, which is a very small amount that can be neglected.

المقدمة

أهم بارامترات التربة التي تتصف بعدم التجانس نتيجة للتباين في الحقل وتعتبر مصدراً لعدم اليقين المتوقع Uncertainty الذي قد يؤثر على عملية التسرب.

قد ينجم عدم اليقين في الناقلية الهيدروليكية عن عدم اليقين في أبعاد المسامات ونسبتها، مكونات حبيبات التربة وأبعاد هذه الحبيبات، نسبة الحبيبات الناعمة، وجود الغضار والمواد العضوية، عدم انتظام أشكال الحبيبات والتغيرات في بعض الخصائص بسبب الرص أثناء انشاء السد أو بسبب تغير الضغوط المسامية أثناء الترطيب والتجفيف أيضاً، وهو ما يسبب عدم اليقين بمحتوى المياه في التربة أيضاً، وهنا تتبع أهمية استخدام الأساليب الاحتمالية Probabilistic Methods في تصميم المنشآت الهندسية، فالمشكلة الرئيسية مع الحل الحتمي التقليدي deterministic model أن خصائص التربة تُمثل دائماً باستخدام قيمة واحدة. وهذا الافتراض لا يحدث في الواقع، فالتباين في خصائص التربة أمر لا مفر منه، لذا كان لابد من دراسة عشوائية بعض بارامترات التربة غير المشبعة ضمن السدود الترابية (الناقلية الهيدروليكية ومحتوى الإشباع والمحتوى المتبقي) لمعرفة مدى تأثيرها على التسرب.

أهمية البحث وأهدافه

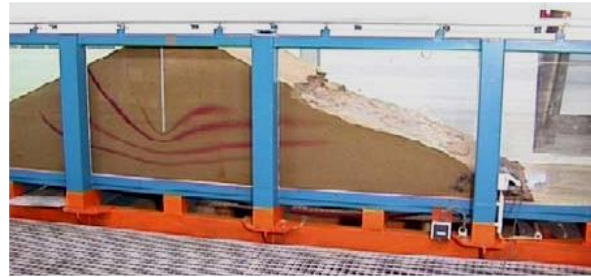
يتأثر تصميم واستثمار السدود الترابية بتسرب كميات كبيرة من المياه، مما يستوجب اتخاذ احتياطات السلامة المرتبطة بالتحكم بمعدل التسرب وحصرها ضمن حدود معينة بما يضمن ديمومة عملها كونها جزء هام من البنية التحتية في سورية^[4]، حيث تبين الإحصاءات العالمية أن مشاكل التسرب السبب الأكثر شيوعاً لانهايار معظم السدود الترابية^[5].

يهدف البحث لتحديد حساسية التسرب عبر سد ترابي نموذجي متجانس لتأثير عدم التأكد Uncertainty ببعض بارامترات تربته غير المشبعة، $(K - \theta_r - \theta_s)$ محتوى الإشباع والمحتوى المتبقي ومعامل الناقلية الهيدروليكية على الترتيب بدءاً من اليسار، وتحديد تابع التوزيع الاحتمالي الأمثل لقيم التسرب الناتجة عن النماذج العشوائية بعد دراستها إحصائياً.

طرائق البحث والمواد المستخدمة

يأتي هذا البحث استكمالاً لتحديد تأثير بعض بارامترات التربة غير المشبعة باعتبارها متغيرات عشوائية على التسرب بعد أن تم إجراء دراسة على تربة متنوعة كالسيلت والرمل الغضاري في أبحاث

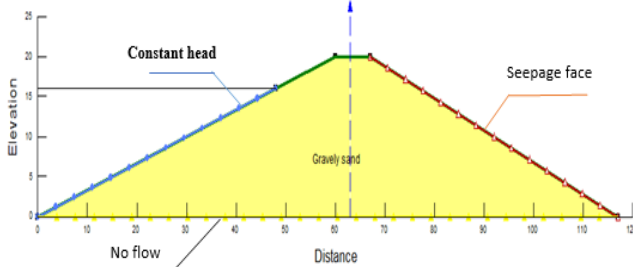
تُعد السدود والسدات الترابية من أهم المنشآت الهندسية للحماية من الفيضان والتحكم به، وتتعرض لتسرب المياه بحكم تماسها المستمر معها، وقد تتعرض هذه المنشآت لخطر الانهيار بسبب تعدد العوامل التي تؤثر على التسرب عبرها وعلى استقرارها كخواص مواد الإنشاء (الجيوتكنيكية والفيزيائية والهيدروديناميكية) والعوامل الجوية وظروف الاستثمار وغيرها^[1,2]، وقد يؤدي التقدير الخاطئ للتسرب خلال جسم السد إلى فشل هذه الأنواع من السدود وأظهرت الإحصاءات أن 43% من حالات الفشل ناجمة عن تشكل الأنابيب، و 66% منها سببها التسرب عبر جسم السد، بالتالي تظهر أهمية تحديد قيم التسرب والعوامل المؤثرة به، وباعتبار تحديد رطوبة تربة هذه المنشآت ومحتواها من المياه وخصوصاً فوق خط التسرب في مجال المنطقة غير المشبعة أمراً هاماً للغاية لكنه بمنتهى التعقيد، فقد لجأ الباحثون لاستخدام طرق النمذجة لتوضيح هذه المسائل أسوةً بغيرها من المسائل الهندسية المعقدة. يُظهر الشكل (1) نموذج AIGNER(6) حيث يتضح تأثر التربة غير المشبعة في المنحدر الخلفي أعلى خط التسرب بعوامل مختلفة مطبقة على النموذج الفيزيائي كمنسوب التخزين على الوجه الأمامي للسد وغيرها مما سبب حدوث الانزلاق^[3]. ومنه تبرز ضرورة تقييم التسرب اعتماداً على بارامترات مواد الإنشاء لمختلف مناطق وأجزاء جسم السد ومن بينها التربة غير المشبعة أعلى خط التسرب التي كانت تهمل سابقاً.



الشكل (1): نموذج فيزيائي لسد ترابي تعرض لانزلاق على الوجه الخلفي^[3]

تعدّ مدخلات العديد من المسائل الهندسية، كالشروط الأولية والشروط الطرفية والبارامترات المختلفة ذات طبيعة عشوائية على أرض الواقع لاسيما بارامترات التربة، وخصائصها الإحصائية معروفة من الملاحظات في الأبحاث السابقة استناداً إلى القياسات الميدانية أو المخبرية، وقد تسبب هذه المتغيرات العشوائية سلوكاً مختلفاً للأنظمة عما هو متوقع، وتعتبر الناقلية الهيدروليكية أحد

يرتكز على أساس كتييم، وذلك لحصر حساب معدل التسرب ضمن جسم السد وبالتالي حصر التأثير المحتمل على التسرب عبره بالمنطقة غير المشبعة، وتمت دراسة قيم التسرب من خلال رسم مقطع للجريان في محور المقطع العرضي السد.



الشكل 3: مقطع عرضي يوضح المواصفات الهندسية والشروط الطرفية.

اختبار حساسية قيم التسرب المستقر *steady state* لتباين بارامترات التربة غير المشبعة باعتبارها متغيرات عشوائية يتطلب اعتبار كل من θ_s , θ_r , k , كمتغيرات عشوائية ضمن برنامج Seep/W (يتم توليدها انطلاقاً من خصائصها الإحصائية (المتوسط ومعامل التباين COV) المتحصل عليها من الدراسات الإحصائية السابقة) كتابة كود برمجي للمعادلات المستخدمة بلغة C# باستخدام برنامج Visual Studio، يتكون الكود من تابعين فرعيين: يهدف الأول هي لحساب معامل الناقلية الهيدروليكية النسبي باستخدام طريقة فان غينوختن، بينما يعمل الثاني على حساب محتوى المياه في التربة باستخدام نموذج Van Genuchten وتم التوليد بطريقة box-muller تم اتباع تقنية Monte Carlo Simulation للحصول على N قيمة لمعدل التسرب وفقاً لعدد الحالات المدروسة، ليصار لمعالجتها احصائياً باستخدام برنامجي Minitab, Easyfit. ويمكن توضيح الأفكار والخطوات أعلاه بما يلي:

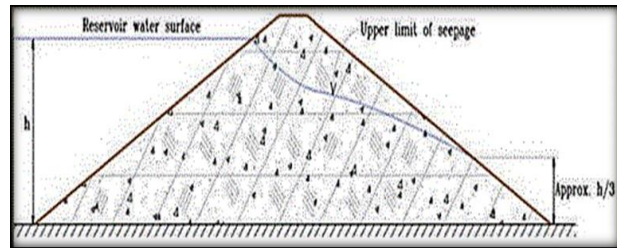
1. تعد معادلة ريتشارد التفاضلية للجريان عبر الترب المشبعة وغير المشبعة (والتي يستخدمها برنامج seep/w)، هي الحاكمة للتسرب ثنائي الأبعاد، كما في مقطع عرضي للسد الترابي، والقائمة على افتراض أن التدفق يتبع قانون دارسي. حيث مجموع تغيرات التدفق بالاتجاهين مع التدفق الخارج يساوي محتوى المياه الحجمي [7,9].

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) \right] + \dot{Q} \quad (1)$$

سابقة. سيتم تطبيق مسألة البحث على سد ترابي متجانس لاختبار حساسية التسرب المستقر *steady state* كما في الشكل (2) يستند إلى أساس كتييم، يتكون من تربة خشنة Gravelly Sand (GS)، وتبعاً للتربة المدروسة سيتم تحديد الخصائص الهندسية للسد باستخدام مواصفات التصميم للسدود (United States Bureau of Reclamation (USBR) 1987) [5]، من حيث ارتفاعها وأنواع المواد المكونة لها، وسيتم تقييم التسرب عبر جسم السد فقط لتبيان تأثير بارامترات المنطقة غير المشبعة على التسرب. يوضح الجدول (1) مواصفاته الهندسية.

الجدول 1: مواصفات السد المدروس

ميل الجوانب	الارتفاع (m)	نوع التربة	نوع السد
الوجه الأمامي: 1:3 الوجه الخلفي: 1:2.5	20m	Gravelly Sand (GS)	متجانس (Homogeneous)



الشكل 2: مقطع عرضي في سد تصميمي متجانس يستند إلى أساس كتييم

بناء النموذج الحاسوبي

تم بناء النموذج الحاسوبي للسد المدروس ومسألة البحث الموضحة سابقاً باستخدام برنامج Seep/W، يبين الشكل (3) مقطعاً عرضياً للسد يوضح مواصفاته الهندسية والشروط الطرفية المطبقة. ارتفاع السد 20 m، وعمق الماء الطبيعي في بحيرة التخزين 16 m، وبناء على نوع التربة المدروسة (Gravelly Sand)، وبحسب مواصفات متطلبات تصميم السدود الأمريكية (USBR) لسد ترابي متجانس على أساس كتييم فإن ميل الوجه الأمامي 1:3، وميل الوجه الخلفي 1:2.5، عرض قاعدة السد 117 m، وعرض القمة 7 m.

تم اعتبار الوجه الأمامي كشرط طرفي بضغوط ثابت يمثل ارتفاع المياه في بحيرة التخزين، (1) الوجه الخلفي منحدر التصريف، ولا يحدث أي تصريف عبر قاعدة السد باعتبار السد

عند الإشباج، θ : الرطوبة الفعلية، n : ثابت تجريبي يتعلق بمنحني الشد الرطوبي [10 11].

4. يعتبر توليد المدخلات العشوائية أحد الأجزاء الرئيسية لطريقة محاكاة مونتني كارلو، وقد اتبنا طريقة بوكس مولر (Box and Muller 1958) لتوليد المتغيرات العشوائية موضوع الدراسة (معامل الناقلية الهيدروليكية ومحتوى الإشباج والمحتوى المتبقي)، وهي تتبع التوزيع اللوغاريتمي الطبيعي (log-normal distribution) لأنواع عديدة من التربة حسب دراسات سابقة معتمدة عالمياً [12, 13]. ويمكن تعريف دالة الكثافة الاحتمالية

للتوصيل الهيدروليكي المشبع بالمتوسط μ_{K_s} والتباين $\sigma_{K_s}^2$ ، ثم بأخذ اللوغاريتم الطبيعي لهما يمكننا اعتباره يتبع التوزيع الطبيعي به (5) μ_{lr} ، وتباين $\sigma_{\ln K_s}^2$ [14, 15].

$$k_s = \exp(\mu_{\ln K_s} + \sigma_{\ln K_s} r') \quad (9)$$

حيث r' : هو رقم عشوائي قياسي موزع طبيعياً حسب Box and Muller (1958):

$$r' = (-2 \ln u_1)^{1/2} \sin 2\pi u_2 \quad (6)$$

حيث u_1 و u_2 متغيران عشوائيان مستقلان من نفس دالة كثافة الاحتمالات الموحدة على المجال (0,1).

5. تم تنفيذ خوارزمية توليد الرقم العشوائي الموصوفة بالإضافة للمعادلات المستخدمة لكل من محتوى المياه ومعامل الناقلية غير المشبع بـ كود برمجي مكتوب بلغة C# باستخدام برنامج Visual Studio. ثم يتم تشغيل التعليمات البرمجية المضافة Seep/W.

6. استخدمت محاكاة مونتني كارلو Monte Carlo Simulation (MCS) فهي الأكثر استخداماً في التحليل العشوائي لتسرب المياه في أوساط مسامية ونمذجته باستخدام متغيرات عشوائية متولدة صناعياً من خصائصها الإحصائية المعروفة (كما في البند السابق) لتحديد خصائص المخرجات من الأنظمة المعقدة التي تتطلب دراستها افتراضات غير واقعية. [18-16]. لذا ببناء عدد كبير من نماذج المحاكاة (بحل كل محاكاة يعطي ناتج (مخرجات))، يمكن الحصول على مجموعة كبيرة من النواتج، ثم يمكن تحليل النواتج إحصائياً لفهم سلوك النظام كما في أبحاث عديدة [19]، مما يتيح وصفاً تفصيلياً للنظام دون استخدام أي افتراضات أو تبسيط. وذلك بعد كتابة الكود البرمجي

K_x and K_y : النفاذية الهيدروليكية بالاتجاهين x, y : H : الضاغظ الكلي $H = h + z$ ، \dot{Q} : التدفق عبر الشرط الطرفي، θ : محتوى المياه الحجمي في التربة، t : الزمن.

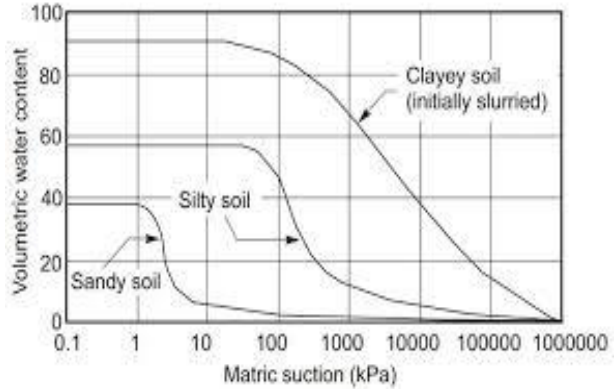
من أجل حالة الجريان المستقر steady-state تصبح المعادلة:

$$\left[\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) \right] + \dot{Q} = 0 \quad (2)$$

2. تم استخدام نموذج van Genuchten لتمثيل منحني الشد الرطوبي للتربة غير المشبعة (water retention curve) كما في الشكل (4)، وتحديد العلاقة بين المحتوى (المائي) الرطوبي فيها وجد الامتصاص [10].

$$\theta_\psi = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha \psi)^n]^m} \quad (3)$$

حيث أن θ_ψ : المحتوى الرطوبي (m^3/m^3) المقابل لارتفاع جهد الماء ψ (m)، θ_s : محتوى الماء عند الإشباج. θ_r : محتوى الماء المتبقي. (α, n, m) : عوامل تجريبية تؤثر على شكل المنحني، وتم كتابة الكود البرمجي لها.



الشكل 4: منحنيات الشد الرطوبي لتربة رملية وأخرى سيلتية وغضارية.

3. تم استخدام نموذج van genuchten, 1980 لتوصيف العلاقة بين معامل الناقلية الهيدروليكية المشبع وغير المشبع وفق العلاقة التالية:

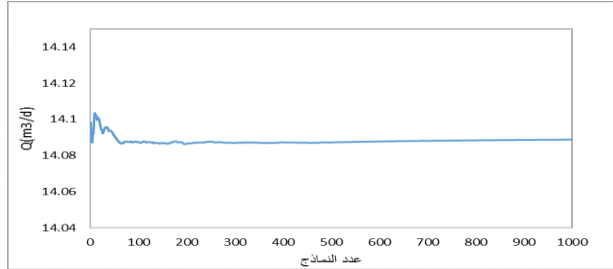
$$K_u = K_s \cdot \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^i \cdot \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{\frac{1}{1-n}} \right]^n \right\}^2 \quad (4)$$

حيث أن K_u : معامل الناقلية الهيدروليكية للتربة غير المشبعة، K_s : معامل الناقلية الهيدروليكية للتربة المشبعة، θ_s : رطوبة

يبين الشكل (5) نتائج النمذجة للنموذج الحتمي ببرنامج Seep/W، يوضح توزيع الضواغط ضمن جسم السد المتجانس وتوضع خط التسرب لحالة الجران المستقر باعتبار بارامترات الدراسة كقيم ثابتة، حيث تظهر قيمة معدل التسرب عبر مقطع الجريان بمقدار $14.09 \text{ m}^3/\text{day}$.

تحليل حساسية النماذج العشوائية

يقدم هذا الجزء من البحث تحليلات الحساسية للتسرب المستقر للحالة الثابتة عبر السدود الترابية ذات النواة الغضارية. سيتم إجراء تحليلات حساسية واحدة في كل مرة للتحقيق في التأثيرات الافردية لكل من K و θ_s و θ_r باعتبارها متغيرات عشوائية وفق نموذج Van Genuchten، أي سيتم رصد حساسية قيمة التدفق الناتج لتغير هذه البارامترات. ولتحديد عدد النماذج التي سيتم بناؤها لتطبيق تقنية مونتني كارلو في كل حالة دراسة، تم بناء 1000 نموذج بواسطة برنامج Seep/W، أدخلت البارامترات كمتغيرات عشوائية معاً، وتم حساب قيمة التسرب عبر مقطع الجريان (حصلنا على 1000 قيمة للتسرب كمخرجات)، حُسبت قيم معامل التباين لكمية المياه المتسربة للوصول إلى نموذج مستقر، ونتج ذلك بعد 500 نموذج تقريباً بشكل مشابه لحالة السد المتجانس الشكل (6).



الشكل 6: تغير معامل تباين معدل التسرب بالعلاقة مع عدد مرات المحاكاة.

يتم إنشاء النماذج لتقييم الحالة المستقرة باستخدام batch files، التي تسمح بتحديد العدد وفق الحالة المطلوبة. خلال حل النماذج يتم إنشاء المتغيرات العشوائية بشكل فردي لكل نموذج محاكاة باستخدام كود C# المضاف إلى Seep/W، فينتج (1000) قيمة لمعدل التسرب يتم تجميعها في ملف ميكروسوفت إكسيل نهائي واحد باستخدام رمز مكتوب بلغة Visual Basic يتم إضافته إلى Visual Basic for Application الملحق بمكونات Office، بحيث نتمكن من فتح ملفات اكسل واستيراد قيم التدفق ولصقها إلى ملف اكسل نهائي بشكل متسلسل وحفظها بما ينتج معالجتها إحصائياً لاحقاً.

للمعادلات المستخدمة في البحث وبعد توليد الأرقام العشوائية وإضافتها لبرنامج seep/w.

7. تم استخدام عدة برامج بغرض التحليل الإحصائي كبرنامج Excel، Minitab لإيجاد مقاييس الإحصاء الوصفي Descriptive Statistics [20]. بينما يوفر برنامج Easyfit نفس الإمكانيات السابقة بالإضافة لما يتيح من اختبارات جودة ملائمة البيانات لمجموعة واسعة من التوزيع الاحتمالية بسرعة وسهولة Goodness of fit tests. أبرزها اختبار كالموغروف سميرنوف Kolmogorov-Smirnov، واختبار كاي تربيع Chi-square test، واختبار أندرسون دارلينغ Anderson Darling.

النتائج والمناقشة

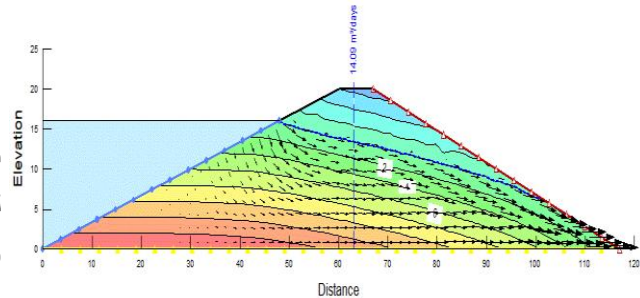
النموذج الحتمي (التقليدي) Deterministic Model

بداية تم حل مسألة النموذج الحتمي (التقليدي) القائم على أخذ القيم الوسطية لكل من معامل التوصيل الهيدروليكي ومحتوى الماء المتبقي كقيم ثابتة كما هو شائع ومتبع في أغلب دراسات التسرب عبر السدود (قيم ثابتة وسطية)، لاستخدام نتيجته للمقارنة لاحقاً عند بناء النماذج العشوائية، يبين الجدول (2) قيم بارامترات فان غينوختن ومعامل التوصيل الهيدروليكي لترية Gravelly Sand

الجدول 2: البارامترات الهيدروديناميكية للحالة غير المشبعة لترية

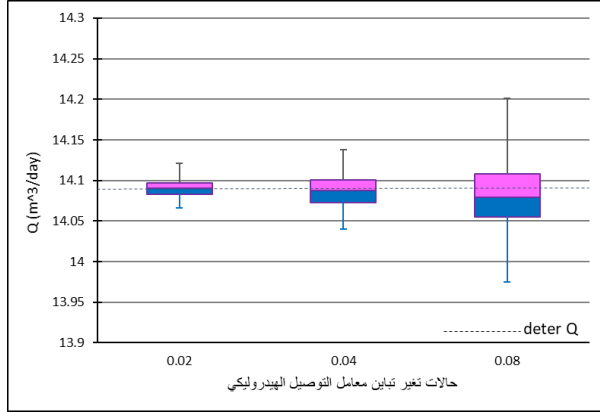
.Gravelly Sand

	K (m/d)	θ_s	θ_r	α (cm ⁻¹)	m	n
Gravelly Sand	7.6	0.2	0.031	0.08	0.5918	2.45



الشكل 5: نتائج نمذجة النموذج الحتمي للسد الترابي المتجانس لحالة الجران المستقر.

الأزرق في كل الأشكال. يظهر الجدول (4) إحصاءات وصفية لمعدل التسرب Descriptive Statistics في هذه الحالات المحسوبة ببرنامج Minitab بعد استيرادها من Excel .



الشكل 7: قيم معدل التسرب للحالات المدروسة لتغير معامل التوصيل الهيدروليكي كمتغير عشوائي.

تظهر النتائج أن التباين في معامل التوصيل لم يؤثر على القيمة الوسطية للتسرب (قيمة المتوسط الحسابي المحسوبة للخمسائة قيمة للتسرب الناتجة بالنمذجة لكل حالة من الحالات) بشكل ملحوظ، فعندما أخذ معامل تباين التوصيل الهيدروليكي $cov k$ القيم من (0.02-0.04-0.08) (العمود الأول بالجدول) كانت النتائج المحسوبة للمتوسط Mean بشكل متقابل (14.08-14.09-14.087)، أي بقيت متوسطات التسرب لكل مجموعة (الخمسائة نموذج) متقاربة جداً.

في كل مجموعة من اجراءات المحاكاة لتحديد الحساسية، سيتم الاحتفاظ بالبارامترات كافة ثابتة عند قيمها الوسطية، إلا بارامتر واحد سيتم اعتباره متغير عشوائي تتفاوت قيم معامل التباين له من النصف حتى الضعف. وذلك وفق الجدول(3) ففي الحالات الثلاث الأولى اعتبر k متغير عشوائي، أما محتوى المياه المتبقي وباقي البارامترات فتوابت، وبالمثل في الحالات الثلاث الأخيرة فإن محتوى المياه المتبقي متغير عشوائي وباقي البارامترات ثابتت.

تم إجراء 4500 (9 × 500) محاكاة للحالات التسعة وبعد معالجتها إحصائياً، تم استعراض النتائج بالجدول (5) المتضمن إحصاءات وصفية لمعدل التسرب Descriptive Statistics في الحالات المحسوبة ببرنامج Minitab بعد استيرادها من Excel. بالنسبة لحالة تغير معامل التوصيل الهيدروليكي تم تجميع قيم التدفق للحالات الثلاث الأولى (1500 قيمة) في ملف اكسل واحد ورسم المخطط الصندوقي لعرض النتائج بشكل واضح في الشكل (7).

وبشكل مماثل بالنسبة لحالة تغير محتوى الماء المتبقي θ_r تم تجميع قيم التدفق للحالات الثلاث الثانية الواردة بالجدول (3) (1500 قيمة ناتجة عن حل 1500 نموذج) ورسم المخطط الصندوقي لعرض النتائج بشكل واضح في الشكل (8). أما الشكل (9) فيمثل المخطط الصندوقي لنتائج قيم التسرب الناتجة عن اعتبار محتوى الإشباع كمتغير عشوائي (1500 قيمة ناتجة عن الحالات الثلاث الأخيرة بالجدول (3))، كما تم تمثيل معدل التسرب المحسوب بالنموذج الحتمي بالخط المتواصل باللون

الجدول 3: الحالات المدروسة لتوضيح حساسية التسرب للبارامترات المستخدمة

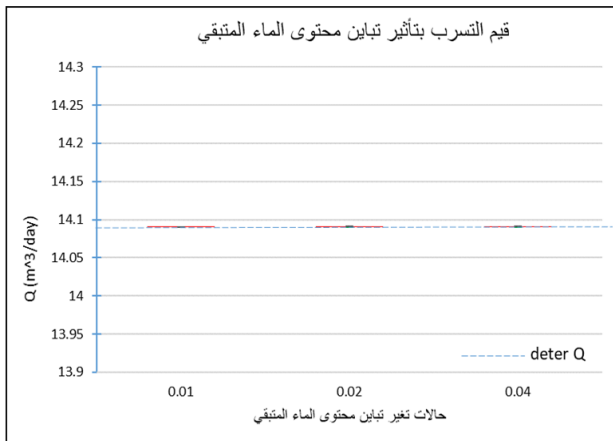
Case description	Parameter					
	K(m/d)		θ_r		θ_s	
	Mean value	COV معامل التباين	Mean value	COV معامل التباين	Mean value	COV معامل التباين
Rnd K-(Cov k=0.02)	7.6	0.02	0.031	-----	-----	-----
Rnd K- (Cov k=0.04)	7.6	0.04	0.031	-----	-----	-----
Rnd K- (Cov k=0.08)	7.6	0.08	0.031	-----	-----	-----
Rnd θ_r - (Cov θ_r =0.01)	7.6	-----	0.031	0.01	-----	-----
Rnd θ_r - (Cov θ_r =0.02)	7.6	-----	0.031	0.02	-----	-----
Rnd θ_r - (Cov θ_r =0.04)	7.6	-----	0.031	0.04	-----	-----
Rnd θ_s - (Cov θ_s =0.015)	7.6	-----	0.031	-----	0.2	0.015
Rnd θ_s - (Cov θ_s =0.03)	7.6	-----	0.031	-----	0.2	0.03
Rnd θ_s - (Cov θ_s =0.06)	7.6	-----	0.031	-----	0.2	0.06

الجدول 4: قيم الإحصاء الوصفي محسوبة ببرنامج Minitab لحالات تغير معامل تباين k فقط.

Case number	Variable Statistics	Descriptive Statistics							
		N	Mean	معامل التباين	Min	Max	Skew	Kurt	Differ%
1	covk=0.02	500	14.09	0.0	14.059	14.121	-0.14	0.032	0
2	covk=0.04	500	14.087	0.0	14.025	14.138	-0.05	-0.162	0.02
3	covk=0.08	500	14.08	0.0	13.95	14.200	-0.01	0.165	0.07
4	cov θ_r =0.01	500	14.09	0.0	14.09	14.0905	-0.042	-0.068	0.0
5	cov θ_r =0.02	500	14.09	0.0	14.09	14.0907	-0.035	-0.41	0.0
6	cov θ_r =0.04	500	14.09	0.0	14.089	14.0909	-0.041	-0.081	0.0
7	cov θ_s =0.015	500	14.0837	0.0	14.0776	14.0895	-0.22	-0.127	0.044
8	cov θ_s =0.03	500	14.0776	0.0	14.0645	14.0882	-0.11	-0.082	0.0877
9	cov θ_s =0.06	500	14.0679	0.0	14.0365	14.0829	-1.08	3.23	0.1565

فيما أظهرت أنواع أخرى من الترب حساسية التسرب لعشوائية معامل التوصيل (التي تم التوصل لها في أبحاث سابقة منشورة وكمثال تربة الغضار الرملية التي بلغ نسبة الاختلاف فيها 50%^[21]، ويدعم ذلك نتائج باحثين آخرين لحالات جريان أخرى^[22] -^[25].

بالنسبة لحالة تغير محتوى الماء المتبقي θ_r يتضح من نتائج الحالات 4 إلى 6، أن التغيرات الفردية لمحتوى الماء المتبقي θ_r لا تسبب أي أثراً على معدل التسرب في الحالة الثابتة المستقرة. وفي هذه الحالات، تكون معدلات التسرب المتوسطة والدنيا والقصى قريبة جداً من بعضها البعض وكذلك الأمر من معدل التسرب الحتمي كلها تقريباً $14.09 \text{ m}^3/\text{day}$ (الشكل 8) والاختلاف معدوم.



الشكل 8: قيم معدل التسرب للحالات المدروسة لتغير θ_r كمتغير عشوائي.

بمقارنة قيم متوسط التدفق للحالات الثلاث لتباين k بقيمة التسرب للنموذج الحتمي ($14.09 \text{ m}^3/\text{day}$)، نلاحظ عدم تأثير تباين معامل التوصيل الهيدروليكي على متوسط التسرب المحسوب عن تسرب النموذج الحتمي وقيمة الاختلاف %Differ لم تتجاوز 0.07% عند أعلى تباين 0.08. يمكن مناقشة القيم الأعظمية والأصغرية حيث نلاحظ تزايد القيمة الأعظمية للتسرب مع تزايد تباين معامل التوصيل بقيمة ضئيلة جداً من -14.2 إلى $14.121 \text{ m}^3/\text{day}$. كما سبب تزايد تباين معامل التوصيل الهيدروليكي تناقصاً بالقيمة الأصغرية للتسرب الناتج من -13.95 إلى $14.059 \text{ m}^3/\text{day}$ وهو مقدار ضئيل جداً.

تجدر الإشارة إلى أن النتائج أعلاه يمكن تفسيرها نتيجة للتباين المنخفض في خصائص هذه التربة والذي انعكس على قيم التسرب في النماذج المولدة عشوائياً، فقيم معامل التباين للتوصيل الهيدروليكي متقاربة وتتراوح بين 0.02 و 0.08؛ ويمكننا تقريب معامل تباين قيم التسرب $\text{cov}(Q)$ للصفر للتربة الخشنة Gravelly Sand. لذلك، يمكن القول أن تباين معامل التوصيل للتربة الخشنة له أثر مهمل ومعدوم على تباين المخرجات المتمثلة بمعدل التسرب لحالة الجريان المستقر.

أي عند اعتبار معامل الناقلية الهيدروليكية متغيراً عشوائياً نجد أن لتباينه أثراً مهماً على قيمة التسرب لحالة الجريان المستقر، حيث أن الزيادة في تباين K لم تسبب أي تغير في معدل التسرب المستقر عبر السد الترابي المتجانس المدروس المكون من تربة Gravelly Sand، وبالتالي يمكن استخدام القيمة الوسطية لهذا المعامل ولهذا النوع من الترب عند دراسة التسرب المستقر فقط.

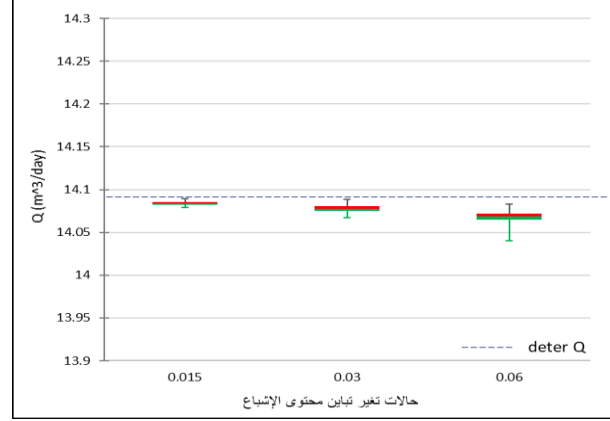
الجدول 5: الإحصاءات الوصفية لقيم التسرب عبر جسم السدالمدرس 1000 نموذج عشوائي.

Variable	Descriptive Statistics (N=1000 model)							
	Mean	StDev	COV%	Min	Med	Max	Skew	Kurt
Flux(Q) m ³ /d	14.087	0.0206	0.1	14.025	14.088	14.138	-0.06	-0.17

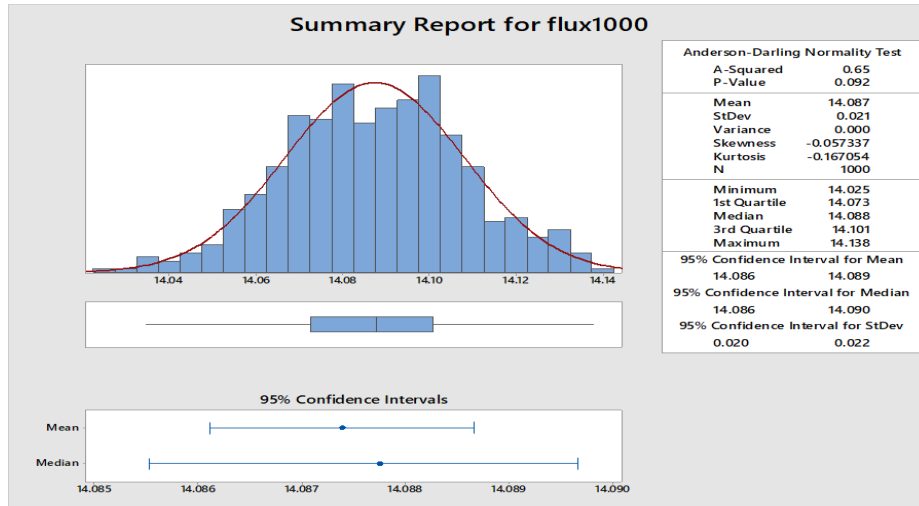
ومعامل الناقلية الهيدروليكية للتربة الخشنة (θ_s & θ_r & K_{GS}) كبارامترات عشوائية معاً لتقييم تأثير عشوائيتها المحتملة على معدل التسرب، والتأثير المحتمل على التوزيع الاحتمالي الذي تتبعه قيم التسرب الناتجة.

يبين الجدول (5) مقاييس الإحصاء الوصفي لقيم التدفقات الناتجة عن النماذج الموضحة أعلاه، وقد تبين أن تباين معدل التسرب ($Cov(Q)$ هو 0.1% صغير جداً والقيم الأصغرية والمتوسطة والأعظمية متساوية تقريباً، أي أن عشوائية البارامترات الثلاث معاً لم يسبب أي فروق عن قيمة تسرب النموذج الحتمي الذي استخدمنا فيه القيم الثابتة للبارامترات المذكورة عند قيمها الوسطية لتربة Gravelly sand، يُعزى ذلك لقيم التباين المنخفضة لبارامترات التربة الخشنة كما ورد في الجدول (2).

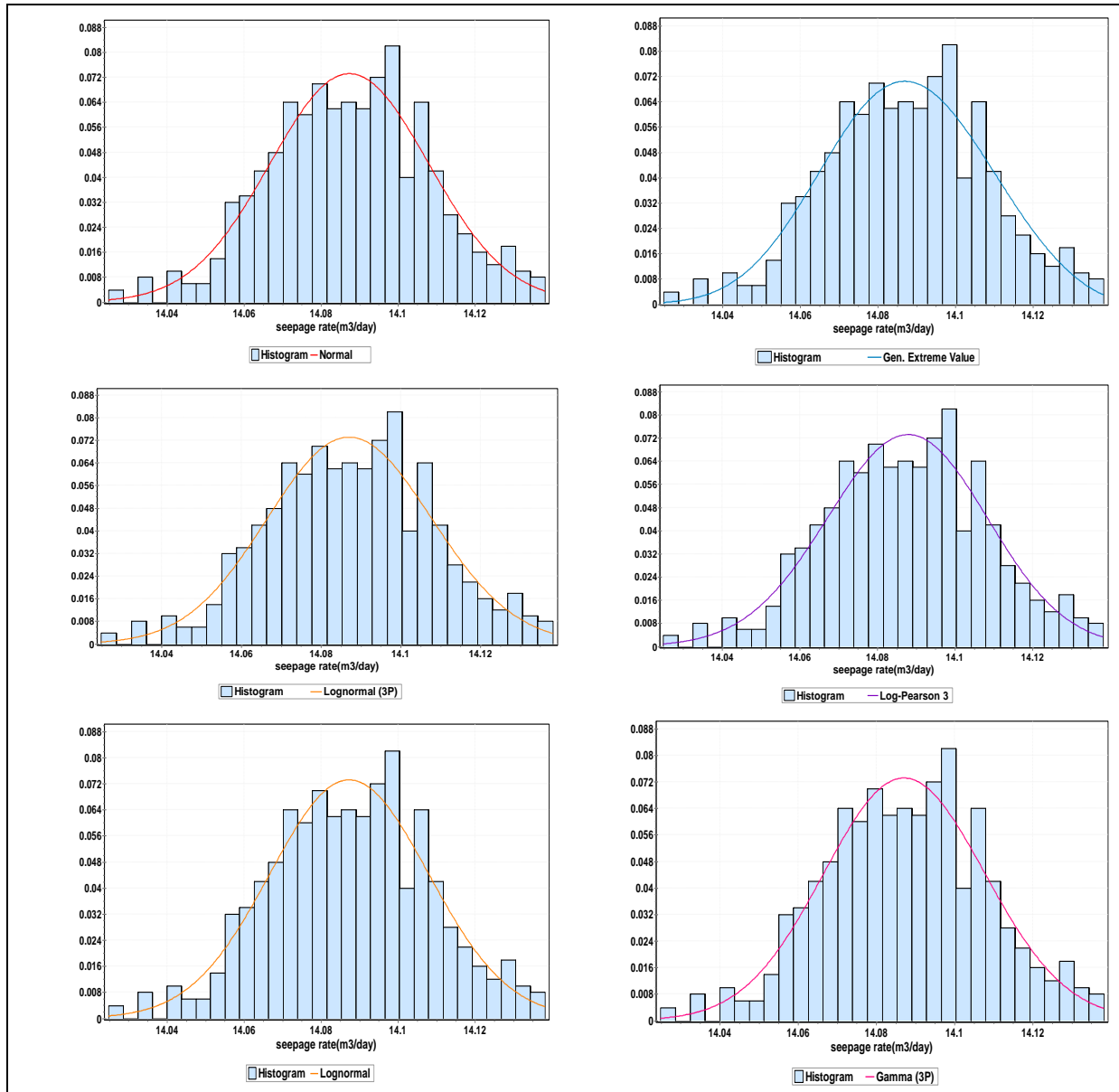
ويُظهر الشكل (10) التدرج التكراري لقيم تدفقات التسرب عبر مقطع الجريان المدروس للسد الترابي المتجانس لحالة الجريان المستقر، حيث يتضح أن متوسط قيم التسرب (Q) يتراوح بين (14.086-14.089 m³/d) عند درجة ثقة 95%، و يتراوح الانحراف المعياري لقيم معدل التسرب بين (-0.02-0.022) عند درجة ثقة 95%.

الشكل 9: قيم معدل التسرب للحالات المدروسة لتغير θ_s كمتغير عشوائي.

أما في الشكل (9) المتضمن المخطط الصندوقي لحالات تباين محتوى الإشباع θ_s ، فنجد تناقص قيم متوسط التسرب في الحالات 7 إلى 9 بشكل طفيف مع تزايد تباين محتوى الإشباع θ_s وفق القيم (14.0679-14.0776-14.0837)، والاختلاف عن التسرب الحتمي لا يتجاوز 0.1565%، وهذا يعني أن عدم اليقين من θ_s ليس له أثر على حالة التسرب المستقر عبر تربة Gravelly Sand. الدراسة الإحصائية لتسرب النماذج العشوائية تم في هذا الجزء من البحث بناء 1000 نموذج ببرنامج Seep/W، تم فيها اعتبار محتوى الماء المتبقي ومحتوى الإشباع



الشكل 10: التدرج التكراري ومنحني التوزيع الطبيعي لبيانات التدفق عبر مقطع السد المدروس للنماذج العشوائية ال 1000.



الشكل 11: بعض التوزيعات الاحتمالية لبيانات التسرب باستخدام Easyfit.

لتابع التوزيع الأمثل، واستعرضت النتائج بالجدول (6) من الجدول السابق نستنتج أنه إذا تم الاعتماد على اختبار Kolmogorov-Smirnov، واختبار Anderson-Darling واختبار Chi-square، فيمكن القبول بمنحني توزيع القيم القصوى المعممة (Gen. Extreme Value) كأفضل منحني توزيع تتبع له قيم معدل التسرب العشوائية المتولدة من قيم عشوائية لكل من معامل الناقلية الهيدروليكية ومحتوى الإشباع ومحتوى المياه المتبقي لترتبة Gravelly sand حيث يلاحظ قيم p-value الأصغر مقارنة بباقي التوزيعات.

تم استخدام برنامج Easyfit لرسم توزيعات احتمالية عديدة، كتاب التوزيع الطبيعي (N) ، تابع لوغاريتم الطبيعي-log normal (LN) ، تابع لوغاريتم الطبيعي ثلاثي البارامترات-three parameter log-normal (LN-3P) ، تابع بيرسون-log Pearson (LPT3) ، تابع غاما three-parameter gamma (G-3P) ، تابع القيمة القصوى المعممة generalized extreme value (GEV) . و تم عرض بعضها بالشكل (11). تم اجراء اختبارات جودة الملاءمة كاختبار أندرسون دارلينغ واختبار كموغروف سميرنوف واختبار كاي تربيع لمطابقة البيانات

الجدول 6: تقييم جودة تمثيل بيانات التسرب بالتوزيعات المختلفة باستخدام برنامج Easyfit.

Pdf type	Kolmogorov-Smirnov (Dmax), Critical value for $\alpha'=0.1$ is 0.039, Critical value for $\alpha'=0.05$ is 0.043			Chi-square (X2), Critical value for $\alpha'=0.1$, is 14.684, Critical value for $\alpha'=0.05$ is 16.919			AD-statistic (Anderson-Darling), Critical value, for $\alpha'=0.1$, is 1.9286, Critical value for $\alpha'=0.05$ is 2.5018		
	Computed value	Decision		Computed value	Decision		Computed value	Decision	
		$\alpha'=0.1$	$\alpha'=0.05$		$\alpha'=0.1$	$\alpha'=0.05$		$\alpha'=0.1$	$\alpha'=0.05$
GEV	0.02318	OK	OK	10.035	OK	OK	0.63278	OK	OK
LN-3p	0.02986	OK	OK	10.477	OK	OK	0.65517	OK	OK
Normal	0.02839	OK	OK	10.812	OK	OK	0.6474	OK	OK
LN	0.02869	OK	OK	10.041	OK	OK	0.6506	OK	OK
LPT3	0.02527	OK	OK	14.424	OK	OK	0.67821	OK	OK
Gamma 3P	0.03011	OK	OK	10.462	OK	OK	0.66013	OK	OK

يتعلق ببارامترات التربة الخشنة، ولا ضرورة للتعامل معها كمتغيرات عشوائية مع مراعاة تحقيقها للمواصفات التصميمية الأخرى.

من التوصيات نوصي بالاتي:

قيم التدفق لمعدل التسرب المستقر عبر السد المدروس يمكن اعتبارها تتبع تابع التوزيع القيمة القصوى المعممة وفقاً لاختبارات جودة الملاءمة المطبقة في البحث. دراسة حساسية معدلات التسرب المستقر عبر السدود الترابية ذات النواة الغضارية لتغير بارامترات تربة النواة. ضرورة دراسة تأثير التسرب غير المستقر كحالة التخفيض السريع لمنسوب التخزين أمام السد الترابي بالقيم العشوائية المحتملة لبارامترات التربة غير المشبعة

References

- [1] Hasan, i. (2005). Brief in floods - impacts and protection. The arab center for translation, and publication, damascus – syria, 723.
- [2] Awdeh, s. (2015). The most important problems faced the earth dams and monitoring. Al-baath university journal vol.73, issue 8.
- [3] Aigner, d. (2004). Auswertung von untersuchungen über den einsatz einer gummispundwand sowie einer sickerleitung an einem durchströmten modelldamm. Institut für wasserbau und technische hydromechanik. Dresden, technische universität dresden.
- [4] Yilmaz, a. (2017). Assessment of performance of drainage systems in earth-fill dams., m. Sc. Thesis, civil engineering dept, middle east technical univ.
- [5] Usbr., u.s.b.o.r. (1987). Design of small dams.usbr, washington.

الخلاصة والتوصيات

الحساسية البسيطة لمعدلات التسرب المستقر عبر السد الترابي المتجانس المدروس لتباين كل بارامترات تربة Gravelly Sand المدروسة (معامل الناقلية الهيدروليكية المشبع محتوى المياه المتبقي ومحتوى الإشباع)، إذ تبين تغير طفيف على قيم متوسط التسرب مع تزايد معامل تباين بارامترات الدراسة. التباين في معدل التسرب الناتج عن اعتبار محتوى الماء المتبقي ومحتوى الإشباع والناقلية الهيدروليكية للتربة المدروسة كمتغيرات عشوائية صغير جداً، ويمكن اهماله والتعامل معها كبارامترات ثابتة بأخذ قيمها الوسيطة للتربة المدروسة. يمكن الاعتماد على النماذج الحتمية (التي تستخدم القيم الوسيطة لبارامترات هذا البحث) أثناء تصميم وتنفيذ السدود الترابية فيما

- [6] Ibraheem, i. (2011). The effect of soil swelling factors on its permeability. Al-baath university journal.
- [7] Ltd, g-s.i. (2014). Seepage analysis with seep/w.
- [8] Ltd, g-s.i. (2012). Geostudio add-ins programming guide and reference.
- [9] Richards, I.a. (1931). Capillary conduction of liquids through porous mediums. Physics, 1(5): p. 318-333.
- [10] Ibraheem, j. (2012-2013). Soil physics. Books and publications directorate, tishreen university, syria.
- [11] Van genuchten, m.t., (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils 1. Soil science society of america journal, 44(5): p. 892-898.
- [12] Jiang, s. H., et al., (2014). Efficient system reliability analysis of slope stability in spatially variable

- soils using monte carlo simulation. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering.
- [13] Carsel, r.f. and parrish, r.s., (1988). Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. Water resources research, 24(5): p. 755-769.
- [14] Riker, r. E, anderson, l. R and jeppson, r. W., (1978). Engineering properties and slope stability settlement analysis related to phosphate mine spoil dumps in southeastern idaho.
- [15] Mohamed M. Ahmad, (2019), "The importance of Training on Engineering Control of Hazardous", Vol 20, No 1.
- [16] mohamed Esmail Fenton, g.a and griffiths, d., (1996). Statistics of free surface flow through stochastic earth dam. Journal of geotechnical engineering.
- [17] Metropolis, n., (1987). The beginning of the monte carlo method. Los alamos science.
- [18] Metropolis, n and ulam, s., (1949). The monte carlo method. Journal of the american statistical association.
- [19] Munir, a.u.k., (2013). Series representations and approximation of some quantile functions appearing in finance. Ucl (uc london).
- [20] Le, t.m.h., et al., (2012). Stochastic analysis of unsaturated seepage through randomly heterogeneous earth embankments. International journal for numerical and analytical methods in geomechanics.
- [21] Osama, s., (2007). Data statistical analysis using minitab. Mnofia university.
- [22] Rabab Mohammed Hamdan, Awad S. Hassan, Salma Y. Mohammed, Arwa M. Lemhi, Tawasol A. Elgany, Rooa M. Ahmed, (2020), "The Key Performance Indicator for Five Construction Projects in Khartoum State: Case Study", Vol 21, No 2.
- [23] Saifeldeen A. Mahmood, (2019), "Performance Evaluation of Natural Scenes Features to create Opinion Unaware-Distortion Unaware IQA Metric", Vol 20, No 3.
- [24] Hasan, i, et al., (2020). Analyze the effect of uncertainty of hydraulic conductivity and saturated water content of soil within homogeneous earthen dams on seepage values using seep / w software. tishreen university journal, 2020.
- [25] Calamak, m and yanmaz, m., (2016). Uncertainty quantification of transient unsaturated seepage through embankment dams. American society of civil engineers.