

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

Dr. Izzeddin Hassan^{*}
Dr. Mounzer Hammad^{**}
Reem Branbo^{***}

(Received 12 / 12 / 2019. Accepted 14 / 6 / 2020)

□ ABSTRACT □

In this paper, we focus on determining the effect of some hydrodynamic soil parameters change (in fact, they are not fixed values) on seepage through earthen dams, thus providing the best result of simulating the actual state of any engineering construction when building a mathematical model, Hence the necessity of studying the randomness of some unsaturated soils parameters and the changes might caused in the seepage values.

A mathematical model of a homogeneous earth dam was performed for steady state conditions using the Seep/W software based on the flow Equation for saturated and unsaturated soils, with the consideration of uncertainty and unreliability of hydraulic conductivity coefficient and saturated water content, after writing a code for the equations used Generate random values based on their statistical characteristics. MCSM technology was adopted to solve a very large number of simulations (4000 models for all cases studied), a deterministic model was also constructed.

The research showed the effect of the obvious and significant hydraulic conductivity variation on seepage rates, while the effect of water saturation content can be neglected.

Keywords : unsaturated soils; earthen dams; water content of soil; hydraulic conductivity.

^{*}Professor -Department of water engineering and Irrigation - Faculty of Civil Engineering - Tishreen University - Lattakia-Syria.

^{**}Professor - Department of water engineering and Irrigation - Faculty of Civil Engineering - Tishreen University - Lattakia-Syria.

^{***}Postgraduate Student (Ph.D.) Department of water engineering and Irrigation- Faculty of Civil Engineering- Tishreen University - Lattakia-Syria.

تحليل تأثير عدم التأكد من الناقلية الهيدروليكية ومحتوى الاشباع للتربة على معدل التسرب ضمن السدود الترابية المتجانسة باستخدام برنامج Seep/W

د. عز الدين حسن*

د. منذر حماد**

ريم برنبو***

(تاريخ الإيداع 12 / 12 / 2019. قُبِلَ للنشر في 14 / 6 / 2020)

□ ملخص □

تركز في هذا البحث على أهمية تحديد تأثير تغير بعض بارامترات التربة الهيدروديناميكية (في الواقع ليست قيم ثابتة) على التسرب عبر السدود الترابية، مما يتيح أفضل نتيجة لمحاكاة الحالة الفعلية لأي منشأة هندسية عند إنشاء نموذج رياضي لتمثيلها، ومنه تتبع ضرورة دراسة العشوائية المحتملة لبعض بارامترات التربة غير المشبعة وما قد تسببه من تغيير على قيم التسرب عبرها.

تم إجراء محاكاة للتسرب عبر سد ترابي متجانس يخضع لظروف الجريان المستقر بإنشاء نموذج رياضي له ببرنامج Seep/W يعتمد على علاقة الجريان في الترب المشبعة وغير المشبعة، مع الأخذ بالاعتبار الشك وعدم الموثوقية بقيم معامل الناقلية الهيدروليكية ومحتوى الإشباع بالمياه، بعد كتابة كود برمجي للمعادلات المستخدمة يتيح توليد قيم عشوائية لها اعتماداً على خصائصها الإحصائية. تم اعتماد تقنية (MCSM) لحل عدد كبير جداً من مرات المحاكاة (4000 نموذج لمجمل الحالات المدروسة)، كما تم بناء نموذج حتمي للمقارنة. أظهر البحث التأثير المهم والواضح لتباين الناقلية الهيدروليكية على التسرب، وإمكانية إهمال تأثير محتوى الاشباع بالمياه.

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

* أستاذ - قسم الهندسة المائية والري، كلية الهندسة المدنية، جامعة تشرين، اللاذقية، سورية/izhassan@scs-net.org.

** أستاذ - قسم الهندسة المائية، كلية الهندسة المدنية، جامعة تشرين، اللاذقية، سورية/mounzer.hammad@gmail.com.

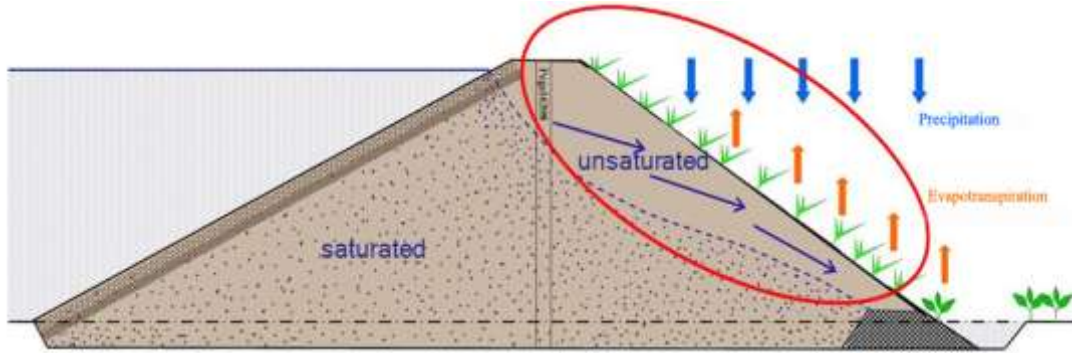
*** طالبة دكتوراه - قسم الهندسة المائية والري، كلية الهندسة المدنية، جامعة تشرين، اللاذقية، سورية/reem.br@gmail.com.

مقدمة:

تُعد السدود والسدات الترابية أهم المنشآت الهندسية للحماية من الفيضان والتحكم به، وتتعرض لتسرب المياه بحكم تماسها المستمر معها، وقد تتعرض لخطر الانهيار بسبب تعدد العوامل التي تؤثر على التسرب عبرها وباستقرارها، كمواد الإنشاء والعوامل الجوية وظروف الاستثمار وغيرها [1، 2] وباعتبار تحديد رطوبة تربة هذه المنشآت ومحتواها من المياه وخصوصاً فوق خط التسرب في مجال المنطقة غير المشبعة أمراً مهماً للغاية لكنه بمنتهى التعقيد، لجأ الباحثون لاستخدام طرائق النمذجة لتوضيح هذه المسائل أسوةً بغيرها من المسائل الهندسية المعقدة.

تعدُّ مدخلات العديد من المسائل الهندسية، كالشروط الأولية والشروط الطرفية والبارامترات المختلفة ذات طبيعة عشوائية على أرض الواقع، 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 أهم بارامترات التربة التي تتصف بعدم التجانس نتيجة للتباين في الحقل وتعتبر مصدراً لعدم اليقين المتوقع 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 (الهيدرولوجيا)، لذا كان لابد من دراسة عشوائية بعض بارامترات التربة غير المشبعة ضمن السدود الترابية (الناقلية المائية ومحتوى الاشباع) لمعرفة مدى تأثيرها على التسرب.

يظهر الشكل (1) رسماً مبسطاً لسد ترابي يوضح توزيع محتوى المياه في مجال المنطقة المشبعة وغير المشبعة يتضح فيه مجال الدراسة محاطاً بالشكل الأحمر [3].



الشكل (1): رسم تخطيطي مبسط لسد ترابي يوضح توزيع محتوى المياه في مجال المنطقة المشبعة وغير المشبعة [3]

أظهر نموذج AIGNER⁽⁶⁾ بوضوح تأثير التربة غير المشبعة بعوامل مختلفة مطبقة على النموذج الفيزيائي كمنسوب التخزين على الوجه الأمامي للسد وحدوث انزلاق لتربة المنحدر الخلفي أعلى خط التسرب في المنطقة غير المشبعة أو المشبعة جزئياً الواضح بالشكل (2) [4]. مما يؤكد أهمية اعتبار المنطقة غير المشبعة عند البحث وتوخي الدقة عند دراسة التسرب عبر السدود الترابية.



الشكل (2): نموذج فيزيائي لسد ترابي تعرض لانزلاق على الوجه الخلفي [4]

أهمية البحث وأهدافه:

تشكل السدود الترابية جزء مهم جداً من البنية التحتية في سورية كونها أهم المنشآت الهيدروليكية الهندسية، وبتأديتها للغرض من إنشائها (درء الفيضانات، تنظيم مجرى النهر، تأمين مياه الري والشرب أو توليد الكهرباء) تدعم قطاعات الزراعة والصناعة وغيرها؛ أي هي جزء أساسي من الاقتصاد الوطني.

يتأثر تصميم واستثمار السدود الترابية بتسرب كميات كبيرة من المياه عبرها، مما استوجب اتخاذ احتياطات السلامة المرتبطة بالتحكم بمعدل التسرب وضغوط المياه المسامية بغية حصرها ضمن حدود معينة، حيث تبين الإحصاءات العالمية أن مشاكل التسرب السبب الأكثر شيوعاً لانهايار معظم السدود الترابية [5]، ناهيك عن الأهمية القصوى لتقليل فواقد المياه بالتسرب في ظل واقع نقص الموارد المائية. كل ما سبق يبين أهمية وضرورة حساب مقدار التسرب بدقة تامة من خلال محاكاة دقيقة و متكاملة للحالة الواقعية.

الدراسات السابقة للتسرب كانت تهمل المنطقة غير المشبعة وبارامترات التربة فيها، لذا يهدف البحث لأخذ المنطقة غير المشبعة من السد الترابي بعين الاعتبار وتحديد حساسية معدلات التسرب عبره بدقة من خلال تحديد تأثير عدم التأكد (الشك) uncertainty ببعض بارامترات التربة غير المشبعة (θ_s, K) كمعامل الناقلية الهيدروليكية ومحتوى الاشباع عند تحليل التسرب عبر السدود الترابية.

طرائق البحث ومواده:

يقوم البحث على اختبار حساسية التسرب عبر سد ترابي متجانس لحالة الجريان المستقر steady state لتغير بارامترات التربة غير المشبعة المتمثلة بمعامل الناقلية الهيدروليكية غير المشبع ومحتوى الإشباع من خلال نموذج رياضي مبني ببرنامج Seep/W

سيتم اعتبار (θ_s, K) كمغيرات عشوائية يتم توليدها انطلاقاً من خصائصها الإحصائية (المتوسط ومعامل التباين COV) المتحصل عليها من الدراسات الإحصائية السابقة، اعتماداً على دالات الكثافة الاحتمالية المحددة وتم التوليد بطريقة box -muller. تم اتباع تقنية Monte Carlo Simulation للحصول على N قيمة لمعدل التسرب وفقاً للحالات المدروسة تمت معالجتها احصائياً باستخدام برنامج Minitab.

كي تتمكن من ادخال كل من θ_s, k كمغيرات عشوائية ضمن برنامج Seep/W تم كتابة كود برمجي للمعادلات المستخدمة (سيتم عرض المعادلات في فقرة لاحقة) بلغة C# باستخدام برنامج Visual Studio، يتكون الكود من

تابعين فرعيين: يهدف الأول لحساب معامل الناقلية الهيدروليكية النسبي باستخدام طريقة فان غينوختن، بينما يعمل الثاني على حساب محتوى المياه في التربة باستخدام نموذج Van Genuchten.

1- وصف البرنامج الحاسوبي Seep/W

يحاكي برنامج Seep/w أحد برامج حزمة Geo Studio المصممة من قبل Geo-Slope International Ltd عمليات حركة الماء في التربة سواء المستقرة (Steady-State) أم غير المستقرة (Transient Seepage)، وفي ظروف متغيرة من حيث درجة إشباع الترب (soils saturated/unsaturated)، وشروط طرفية مختلفة [6]. يعتمد طريقة العناصر المنتهية FEM لحل المعادلة التفاضلية الحاكمة غير الخطية للتسرب (ريتشارد) ويتم تنفيذ الحل بطريقة تكرارية. يسمح Seep/W باستخدام الوظائف الإضافية من خلال ميزة إضافة التتابع (Add In function) التي تستخدم لتحديد خصائص التربة، والشروط الطرفية، وما إلى ذلك وهذا هو السبب الرئيسي لاختيار هذا البرنامج كأداة محاكاة لهذه الدراسة [7].

2- الأساس الرياضي والمعادلات الحاكمة للجريان

يمكن تطبيق قانون دارسي لنمذجة التسرب عبر أوساط التربة المشبعة وغير المشبعة للسدود الترابية [8].

$$q = K \cdot I \quad (1)$$

حيث q : هو التصريف الواحد، K : هي الناقلية الهيدروليكية للتربة و I : هو التدرج الهيدروليكي. تعد معادلة ريتشارد التفاضلية للجريان عبر الترب المشبعة وغير المشبعة، هي الحاكمة للتسرب ثنائي الأبعاد، كما في مقطع عرضي للسد الترابي، والقائمة على افتراض أن التدفق يتبع قانون دارسي. [6][8]

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

K_x and K_y : النفاذية الهيدروليكية بالاتجاهين x, y .

H : الضاغط الكلي $H = h + z$ ، ارتفاع المنسوب وارتفاع الضغط.

\dot{Q} : التدفق عبر الشرط الطرفي، θ : محتوى المياه الحجمي في التربة. t : الزمن.

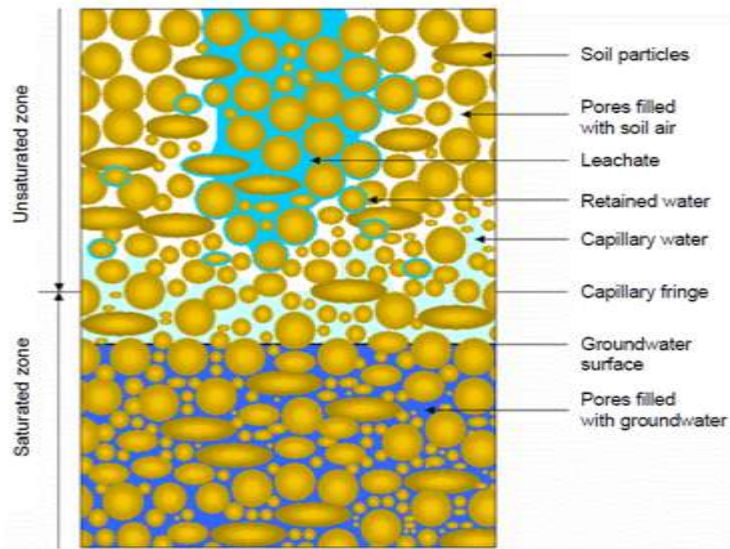
تنص المعادلة على أن الجمع بين تغيير التدفق في الاتجاهات x و y ، مع التدفق الخارجي المطبق يساوي معدل التغيير في تخزين التربة (أي محتوى المياه الحجمي) بالعلاقة مع الزمن.

من أجل حالة الجريان المستقر steady-state تصبح المعادلة بالشكل:

$$\left[\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) \right] + \dot{Q} = 0 \quad (3)$$

3- نموذج التربة غير المشبعة

لا بد من التذكير بحالات تواجد المياه في التربة والتي تختلف حسب درجة ارتباطها بحبيبات التربة والموضحة بالشكل (3):



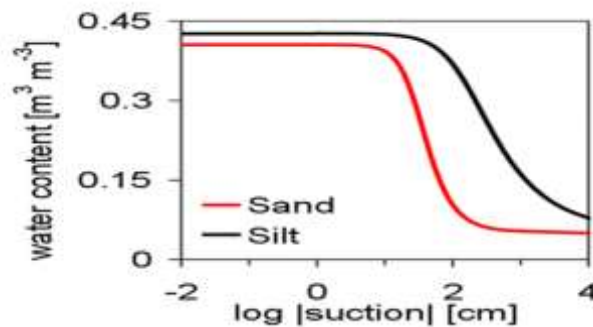
الشكل (3): حالات تواجد المياه في التربة (المشبعة وغير المشبعة).

حسب القانون الأساسي لجريان الماء في التربة يمكن كتابة علاقة دارسي بالشكل:

$$V = K_u \cdot grad \Psi_H \quad (4)$$

حيث: K_u : معامل الناقلية الهيدروليكية للتربة غير المشبعة. $grad \Psi_H$: تدرج الجهد الهيدروليكي.

يطبق قانون دارسي فقط في حالة الجريان الصفحي وبما أنه لا يحدث أي جريان مضطرب في معظم التربة لذا يمكن استعماله وتعميم العلاقة الديناميكية لدارسي على جميع التربة المشبعة وغير المشبعة باعتبار عامل النفوذية تابع للمحتوى المائي θ وأن الضاغط هو الارتفاع الهيدروليكي الكلي أو يعبر عنه بالجهد الهيدروليكي. يمكن من خلال منحنى الشد الرطوبي للتربة، الذي يمثل العلاقة بين المحتوى الرطوبي فيها وجهد الامتصاص suction، يسمى أحيانا منحنى Pf، ويساعد في تفسير وشرح العمليات الجارية أثناء تطور التربة كونه من أهم الخصائص الهيدروديناميكية لها، تحديد المحتوى المائي للتربة عند أي قيمة للشد الرطوبي [9].



الشكل (4): رسم توضيحي لمنحنيات الشد الرطوبي لتربة رملية وأخرى سيلتية

اقترحت عدة معادلات تجريبية لوصف منحنى الشد الرطوبي ضمن مجالات محددة للرطوبة ومن هذه العلاقات علاقة (Brooks and Corey 1964)، كما اقترح Van Genuchten العلاقة التالية لتعيين منحنى الشد الرطوبي للتربة وهي النموذج المستخدم في هذا البحث [9]:

$$\theta_{\psi} = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha \cdot \psi)^n]^m} \quad (5)$$

حيث أن θ_{ψ} : المحتوى الرطوبي (m^3/m^3) المقابل لارتفاع جهد الماء ψ (m)، θ_s : محتوى الماء عند الإشباع. θ_r : محتوى الماء المتبقي عند الحد الأعلى لجهد الماء ضمن حدود صلاحية المعادلة فتستخدم قيمة $Pf=4.2$ أو أكثر α, n, m : عوامل تجريبية تؤثر على شكل المنحني. وهي المعادلة التي سيتم استخدامها وتم كتابة الكود البرمجي لها بحيث يتم توليد القيم العشوائية وفق طريق box - muller.

4- العلاقة بين معامل الناقلية الهيدروليكية المشبع وغير المشبع

تحدد العلاقة بين معامل الناقلية الهيدروليكية المشبع وغير المشبع بعلاقات حسابية تعتمد على بعض الخصائص الفيزيائية للتربة ومنحني الشد الرطوبي، كنموذج van genuchten, 1980 وفق العلاقة:

$$K_u = K_s \cdot \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^l \cdot \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{\frac{1}{1-n}} \right]^n \right\}^2 \quad (6)$$

حيث أن: K_u : معامل الناقلية الهيدروليكية للتربة غير المشبعة، K_s : معامل الناقلية الهيدروليكية للتربة المشبعة، θ_s : الرطوبة عند الإشباع، θ : الرطوبة الفعلية، n : ثابت تجريبي يتعلق بمنحني الشد الرطوبي [9, 10].

5- توليد المتغيرات العشوائية

الهدف من نمذجة متغيرات عملية التسرب كمتغيرات عشوائية هو معالجة أوجه الشك (أو عدم موثوقية-عدم اليقين) في المسألة المدروسة، ففي المشاكل المتعلقة بالتسرب قد يكون هناك عدم يقين في خصائص التربة كالناقلية الهيدروليكية، المسامية، بارامترات منحنيات الشد الرطوبي، الخ. أيضاً، قد تكون الظروف الابتدائية أو الشروط الطرفية غير ثابتة، حيث أن التدفق الداخل إلى بحيرة تخزين السدود الترابية غير مؤكد بوجه عام بسبب العشوائية للبارامترات الهيدرولوجية (Vanmarcke 2010). ويمكن تمثيل هذه الشكوك بالقيم باستخدام المتغيرات العشوائية، ويعتبر توليد المدخلات العشوائية أحد الأجزاء الرئيسية لطريقة محاكاة مونت كارلو

يتم بناء نموذج عدم اليقين للتربة من خلال اعتبار معامل الناقلية الهيدروليكية ومحتوى الاشباع كمدخلات عشوائية (في هذا البحث الذي يعد جزءاً من نتائج تناولت بارامترات أخرى متممة). ولها دالات كثافة احتمالية مختلفة لذا تم استخدام طريقة بوكس مولر المستخدمة لهذه الحالة (Box and Muller 1958). بالنسبة لدالات الكثافة الاحتمالية (PDFs) للبارامترات المدروسة في البحث (معامل الناقلية الهيدروليكية، محتوى الإشباع)، والمعزفة بالمتوسط الحسابي ومعامل التباين لكل منها، فهي تتبع تابع التوزيع اللوغاريتمي الطبيعي (log-normal distribution) لأنواع عديدة من الترب حسب دراسات سابقة معتمدة عالمياً [11, 12].

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 بمتوسط $\mu_{\ln K_s}$ وتباين $\sigma_{\ln K_s}^2$.

ويمكن استخدام التحولات التالية للحصول على متوسط وتباين أقرب للطبيعي PDF دالة الكثافة الاحتمالية [13, 14]

$$\sigma_{\ln K_s}^2 = \ln \left(1 + \frac{\sigma_{K_s}^2}{\mu_{K_s}^2} \right) \quad (7)$$

$$\mu_{\ln K_s} = \ln(\mu_{K_s}) - \frac{1}{2} \sigma_{\ln K_s}^2 \quad (8)$$

يمكن الحصول على المتحولات العشوائية للنفاذية الهيدروليكية (معامل الناقلية الهيدروليكية المشبع) التابعة للتوزيع اللوغاريتمي الطبيعي على النحو التالي

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

حيث r' : هو رقم عشوائي قياسي موزع طبيعياً تم الحصول عليها طريقة تحويل (Box and Muller 1958):

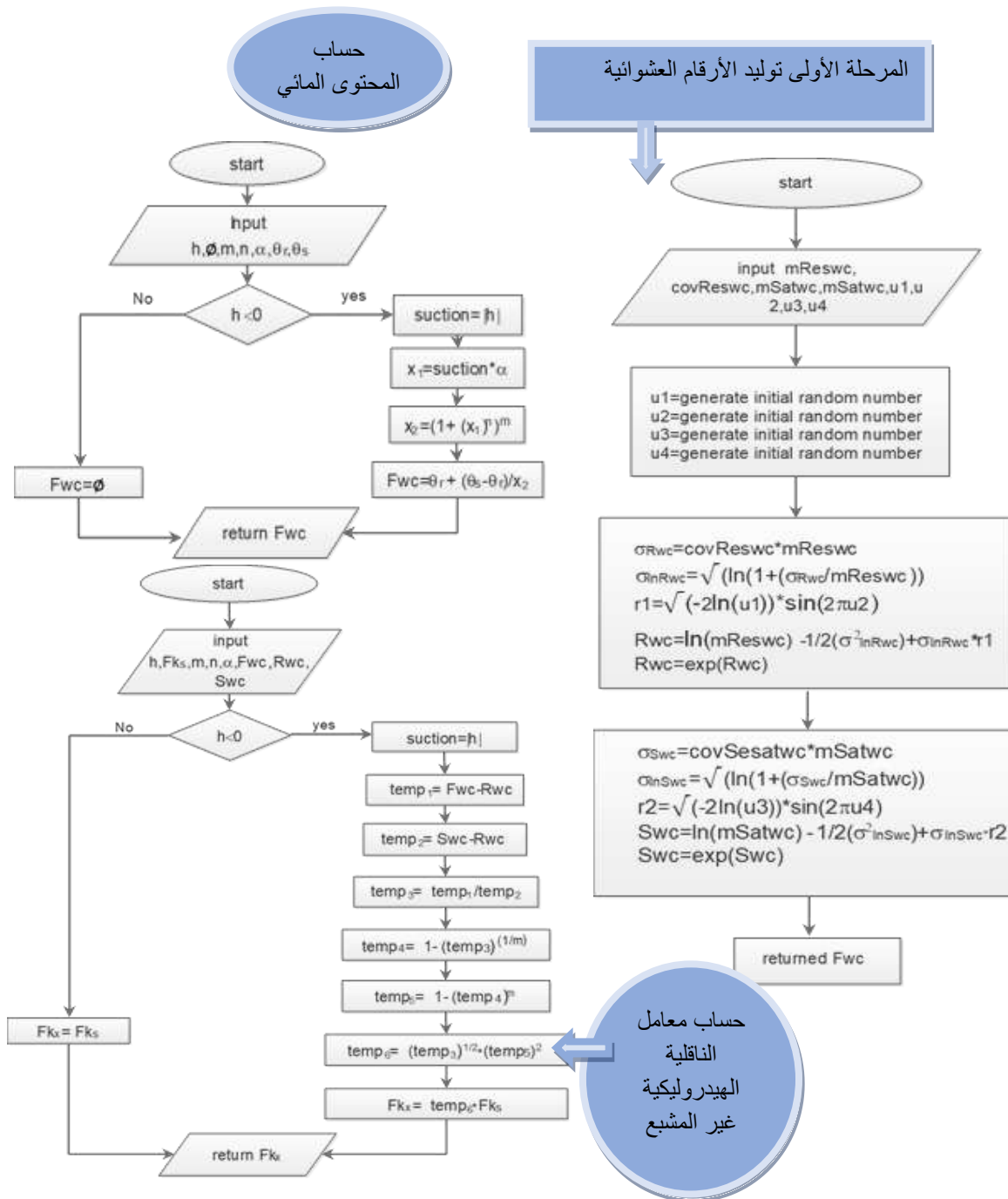
$$r' = (-2 \ln u_1)^{1/2} \sin 2\pi u_2 \quad (10)$$

حيث u_1 و u_2 متغيران عشوائيان مستقلان من نفس دالة كثافة الاحتمالات الموحدة على المجال (0، 1). يتم تنفيذ خوارزمية توليد الرقم العشوائي الموصوفة هنا برمز مكتوب بلغة C#. ثم يتم تشغيل التعليمات البرمجية كإضافة في برنامج Seep/W.

6- محاكاة مونت كارلو (MCS) Monte Carlo Simulation

تستخدم محاكاة مونت كارلو عموماً لتحديد خصائص المخرجات من الأنظمة المعقدة ذات السلوك غير الخطي، والتي قد يحتاج تطبيق الحلول التحليلية لها إلى افتراضات غير واقعية أو حتى قد لا تكون ممكنة، بينما من الممكن أن تكون النظم قريبة جداً من الواقع باستخدام MCS. [17,16,15]

تعد هذه المحاكاة النهج الأكثر استخداماً في التحليل العشوائي لتسرب المياه في أوساط مسامية ونمذجته، التي تطلب تعريف مفصل للخواص الهندسية للمسألة المدروسة، خصائص التربة، كمعامل الناقلية الهيدروليكية، محتوى الماء الحجمي، والشروط الابتدائية والطرفية. يمكن إجراء محاكاة باستخدام متغيرات عشوائية متولدة صناعياً من خصائصها الإحصائية المعروفة. حل كل محاكاة يعطي ناتج (مخرجات)، يمكن الحصول على مجموعة من النواتج عند إجراء عدد كبير من المحاكاة، ثم يمكن تحليل النواتج إحصائياً لفهم سلوك النظام كما في أبحاث عديدة [18]، ويسهل ذلك استخدام إحدى البرمجيات الإحصائية Excel، Minitab، مما يتيح وصفاً تفصيلياً للنظام دون استخدام أي افتراضات أو تبسيط، وهذه هي الميزة الرئيسية لهذا النهج، تم اعتماد هذه الطريق لكل من θ_s ، k_s ، ويبيّن الشكل (5) بعض المخططات النهجية الجزئية للكود البرمجي المكتوب للمعادلات المستقلة المستخدمة في البحث فيما يتعلق بتابع توليد الأرقام العشوائية وكل من تابع المحتوى المائي ومعامل الناقلية الهيدروليكية غير المشبع.



الشكل(5): بعض المخططات النهجية للكود البرمجي للمعادلات المختلفة المستخدمة

7- برنامج Minitab وبعض المفاهيم الإحصائية

يعتبر Minitab أحد البرامج الإحصائية الرائدة والتميزة في مجال دراسة علوم الإحصاء وتقنيات صنع القرار والتخطيط والتحليل الإحصائي، استخدم في البحث لإيجاد مقاييس الإحصاء الوصفي وتابع التوزيع وجودة تمثيل البيانات، حيث يوفر مجموعة من مقاييس الإحصاء الوصفي Descriptive Statistics منها: الوسط الحسابي (المتوسط) (Mean)، الخطأ المعياري للوسط الحسابي (SE of Mean)، الإنحراف المعياري (Standard

(Deviation)، الوسيط (Median)، التباين (Variance)، مجموع القيم (Sum)، أصغر قيمة (Minimum)، أكبر قيمة (Maximum)، المدى (Range)، الالتواء (Skewness)، التقطح (Kurtosis)، متوسط مربعات الفروقات المتتابة (MSSD)، ويتضمن البرنامج اختبار أندرسون دارلينغ (يرمز له AD)، لتحديد تابع التوزيع اعتماداً على الدالة الاحتمالية التراكمية CDF [19].

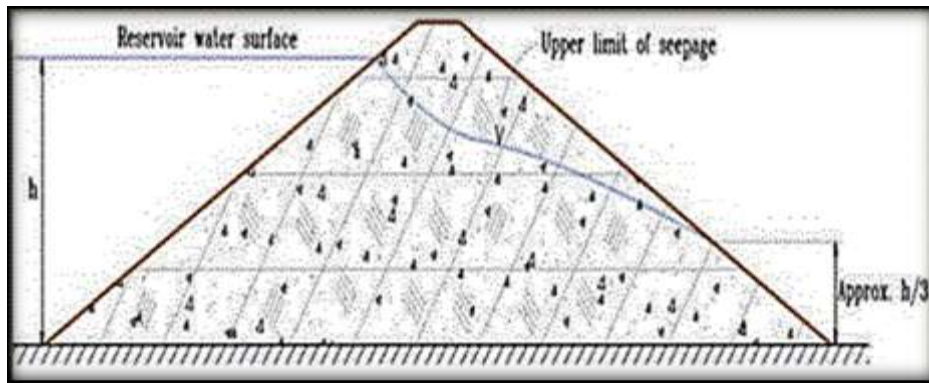
النتائج والمناقشة:

1- المواصفات الهندسية للسد المدروس

سيتم تطبيق مسألة البحث على سد ترابي متجانس كما في الشكل (6) يستند إلى أساس كتيم، مكون من تربة غضار رملي (Sandy Clay (SC)، وتبعاً للتربة المدروسة سيتم تحديد الخصائص الهندسية للسد باستخدام مواصفات التصميم للسدود (United States Bureau of Reclamation (USBR) 1987) [20]، من حيث ارتفاعها وأنواع المواد المكونة لها وسيتم تقييم التسرب من خلال جسم السد فقط لتبيان تأثير بارامترات المنطقة غير المشبعة المدروسة في هذه المسألة على التسرب. يوضح الجدول (1) مواصفات السد المدروس

الجدول (1): المواصفات الهندسية للسد المدروس

ميل الجوانب	الارتفاع (m)	نوع التربة	نوع السد
الوجه الأمامي: 1:3 الوجه الخلفي: 1:2	25m	Sandy Clay (SC)	متجانس (Homogeneous)

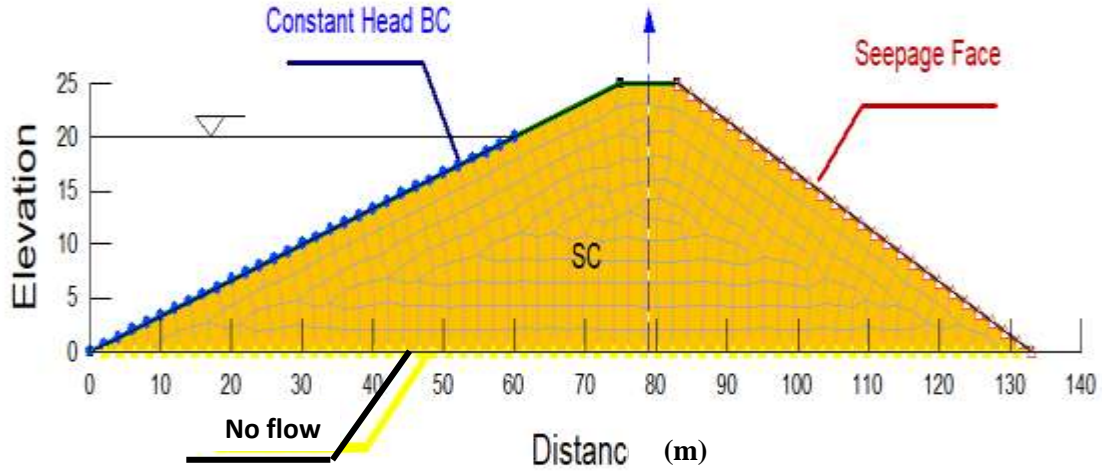


الشكل (6): مقطع عرضي في سد تصميمي متجانس يستند إلى أساس كتيم [20]

تم بناء النموذج الحاسوبي للسد المدروس ومسألة البحث الموضحة سابقاً باستخدام برنامج Seep/W، يبين الشكل (7) مقطعاً عرضياً للسد يوضح مواصفاته الهندسية والشروط الطرفية المطبقة. ارتفاع السد 25 m، وعمق الماء الطبيعي في بحيرة التخزين 20 m، وبناء على نوع التربة المدروسة (غضار رملي)، وبحسب مواصفات متطلبات تصميم السدود الأمريكية (USBR) لسد ترابي متجانس على أساس كتيم فإن ميل الوجه الأمامي 1:3، وميل الوجه الخلفي 1:2، عرض قاعدة السد 133 m، وعرض القمة 8 m.

تم اعتبار الوجه الأمامي كشرط طرفي بضاعط ثابت يمثل ارتفاع المياه في بحيرة التخزين، بينما شكل الوجه الخلفي منحدر التصريف، ولا يحدث أي تصريف عبر قاعدة السد باعتبار السد يرتكز على أساس كتيم، وذلك لحصر حساب

معدل التسرب ضمن جسم السد وبالتالي حصر التأثير المحتمل على التسرب عبره بالمنطقة غير المشبعة، و تمت دراسة قيم التسرب من خلال رسم مقطع للجريان في محور المقطع العرضي السد.



الشكل (7): مقطع عرضي يوضح المواصفات الهندسية والشروط الطرفية.

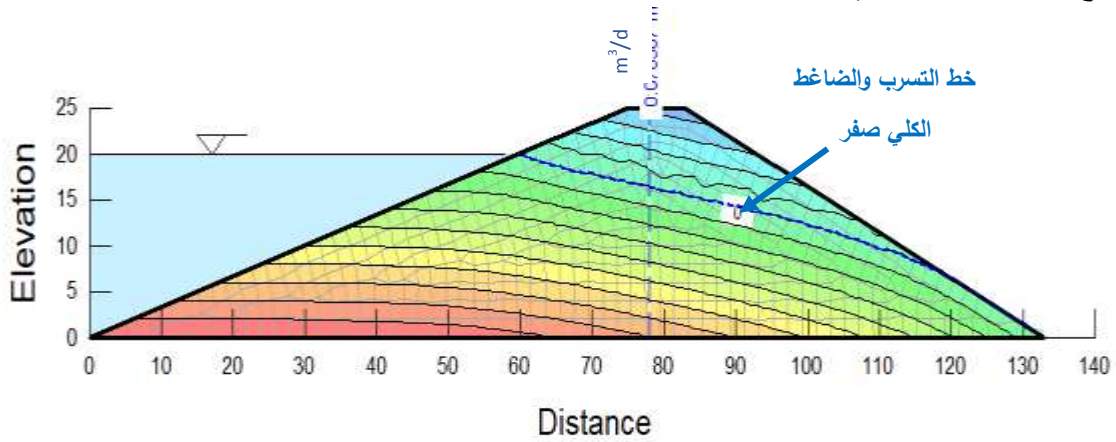
2- النموذج الحتمي (التقليدي) Deterministic Model

بداية تم حل مسألة النموذج الحتمي (التقليدي) القائم على أخذ القيم الوسطية لكل من معامل الناقلية الهيدروليكية ومحتوى الاشباع 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 الناقلية الهيدروليكية لتربة الغضار الرملي [12]

الجدول (2): البارامترات الهيدروديناميكية للحالة غير المشبعة لتربة الغضار الرملي.

	K(m/d)	θ_s	θ_r	$(\text{cm}^{-1})\alpha$	m	n
Sandy clay	0.0288	0.38	0.1	0.027	0.187	1.23

يبين الشكل (8) نتائج النمذجة للنموذج الحتمي ببرنامج Seep/W، يوضح توزع 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 $0.0765 \text{ m}^3/\text{day}$



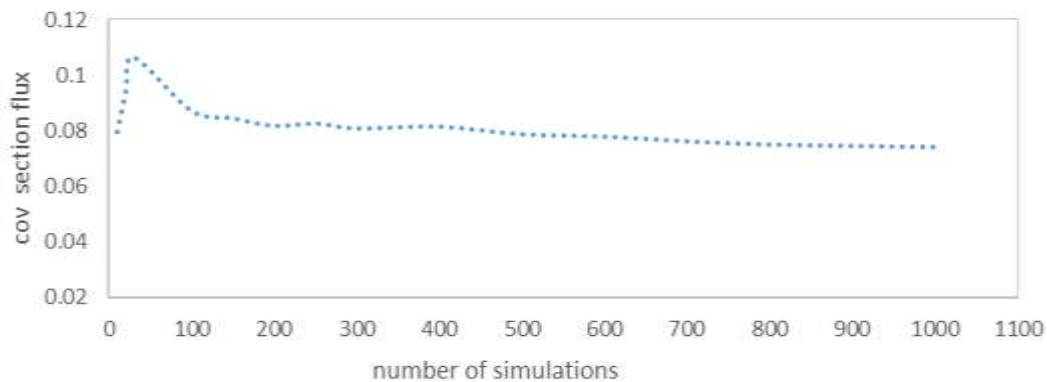
الشكل (8): نتائج نمذجة النموذج الحتمي للسد الترابي المتجانس لحالة الجران المستقر.

3- تحليل حساسية النماذج العشوائية

يقدم هذا الجزء من البحث تحليلات الحساسية للتسرب المستقر للحالة الثابتة عبر السدود الترابية المتجانسة. سيتم إجراء تحليلات حساسية واحدة في كل مرة للتحقيق في التأثيرات الفردية لكل من K و θ_s 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 مونت كارلو في كل حالة دراسة، تم بناء 1000 نموذج بواسطة برنامج Seep/W، أُدخلت 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، حيث تبين حصول ذلك بعد 500 نموذج تقريباً الشكل (8).

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 تتمكن من فتح ملفات اكسل واستيراد قيم التدفق ولصقها إلى ملف اكسل نهائي بشكل متسلسل للنماذج وحفظها بما يتيح معالجتها والتعامل معها سواء ضمن برنامج Excel أو ضمن البرامج الإحصائية الأخرى.



الشكل(8): تغير معامل تباين معدل التسرب بالعلاقة مع عدد مرات المحاكاة.

في كل مجموعة من إجراءات 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 الإشباع وباقي البارامترات في معادلات Van Genuchten فثوابت، وبالمثل في الحالات الثلاث الأخيرة فإن محتوى الإشباع متغير عشوائي وباقي البارامترات ثوابت.

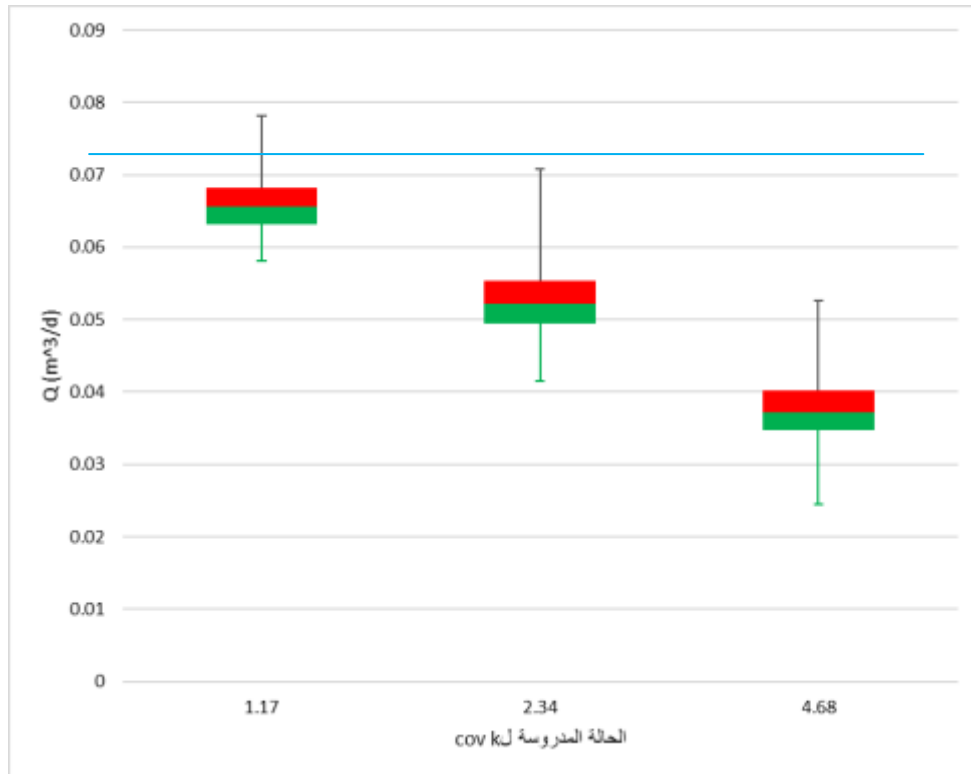
الجدول (3): الحالات المدروسة لتوضيح حساسية التسرب للبارامترات المستخدمة.

Case description	Parameter			
	K(m/d)		θ_s	
	Mean value	COV معامل التباين	Mean value	COV معامل التباين
Rnd K-(Cov k=1.17)	0.0288	1.17	0.38	-----
Rnd K- (Cov k=2.34)	0.0288	2.34	0.38	-----
Rnd K- (Cov k=4.68)	0.0288	4.68	0.38	-----
Rnd θ_s - (Cov θ_s =0.07)	0.0288	-----	0.38	0.07
Rnd θ_s - (Cov θ_s =0.14)	0.0288	-----	0.38	0.14
Rnd θ_s - (Cov θ_s =0.28)	0.0288	-----	0.38	0.28

تم إجراء 3000 (6 × 500) محاكاة للحالات الست، بالنسبة لحالة تغير معامل الناقلية الهيدروليكية تم تجميع قيم التدفق للحالات الثلاث الأولى (1500 قيمة) في ملف اكسل واحد ورسم المخطط الصندوقي لعرض النتائج بشكل واضح في الشكل (9)، وتم تمثيل معدل التسرب المحسوب بالنموذج الحتمي بالخط المتواصل باللون الأزرق. يظهر الجدول (4) إحصاءات وصفية لمعدل التسرب Descriptive Statistics في هذه الحالات المحسوبة ببرنامج Minitab بعد استيرادها من Excel.

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

Variable Statistics	Descriptive Statistics						
	N	Mean (Q)	COV(Q) معامل التباين %	Minimum (Q)	Maximum (Q)	Skew الالتواء	Kurt التفرطح
covk=1.17	500	0.065790	5.59	0.055671	0.078217	0.26	0.03
covk=2.34	500	0.052492	8.67	0.038742	0.070813	0.32	0.48
covk=4.68	500	0.037516	11.58	0.022086	0.052562	0.26	0.63



الشكل (9): المخطط الصندوقي لقيم معدل التسرب للحالات المدروسة لتغير معامل الناقلية الهيدروليكية كمتغير عشوائي.

تظهر النتائج أن التباين في معامل التوصيل يخفض القيمة الوسطية للتسرب (قيمة المتوسط الحسابي المحسوبة للخمسائة قيمة للتسرب الناتجة بالنمذجة لكل حالة من الحالات)، عندما أخذ معامل تباين الناقلية الهيدروليكية cov k القيم من (1.17-2.34-4.68) (العمود الأول بالجدول) كانت النتائج المحسوبة للمتوسط Mean بشكل متقابل (0.0658-0.0525-0.0375)، أي انخفض متوسط التسرب للخمسائة نموذج عندما cov k=1.17 من 0.0658 m^3/day إلى القيمة 0.0525 m^3/day (متوسط التسرب للخمسائة نموذج عندما أصبح معامل تباين الناقلية الهيدروليكية covk=2.34)، ثم تابع متوسط التسرب الانخفاض إلى القيمة 0.0375 m^3/day مع تزايد معامل تباين إلى القيمة 4.68. إذاً نجد تناقص قيم متوسط التسرب مع تزايد تباين معامل الناقلية الهيدروليكية إلى النصف تقريباً. يمكن مناقشة القيم الأعظمية والأصغرية حيث نلاحظ تناقص القيمة الأعظمية للتسرب مع تزايد تباين معامل التوصيل من 0.078-0.052 m^3/day . بشكل مشابه يسبب تزايد تباين معامل الناقلية الهيدروليكية تناقص القيمة الأصغرية للتسرب الناتج من 0.055-0.022 m^3/day .

تجدر الإشارة إلى أن قيم معامل التباين للتوصيل الهيدروليكي تتراوح بين 1.17 و 4.68؛ ومع ذلك، تبين أن معامل تباين التسرب (cov(Q)) يتراوح بين (5.59-11.58) (الجدول (4))، العمود الثالث للإحصاءات الوصفية). لذلك، يمكن القول أن النظام لديه القدرة على تقليل تأثير تباين بارامترات الإدخال على قيم معامل تباين التسرب ومتوسط التسرب (كمخرجات) والذي انعكس بانخفاضها مع تزايد معامل تباين المدخلات.

بمقارنة قيم متوسط التدفق للحالات الثلاث لتباين k بقيمة التسرب للنموذج الحتمي (0.0765 m^3/day)، نلاحظ تأثير تباين معامل الناقلية الهيدروليكية بتخفيض متوسط التسرب المحسوب عن تسرب النموذج الحتمي.

عندما covk=1.17، متوسط التسرب 0.0658 m^3/day مقدار التخفيض عن النموذج الحتمي 10.45%.

عندما $covk=2.33$ ، متوسط التسرب $0.0525 \text{ m}^3/\text{day}$ ← مقدار التخفيض عن النموذج الحتمي %31.37.
عندما $covk=4.66$ ، متوسط التسرب $0.0375 \text{ m}^3/\text{day}$ ← مقدار التخفيض عن النموذج الحتمي %51.

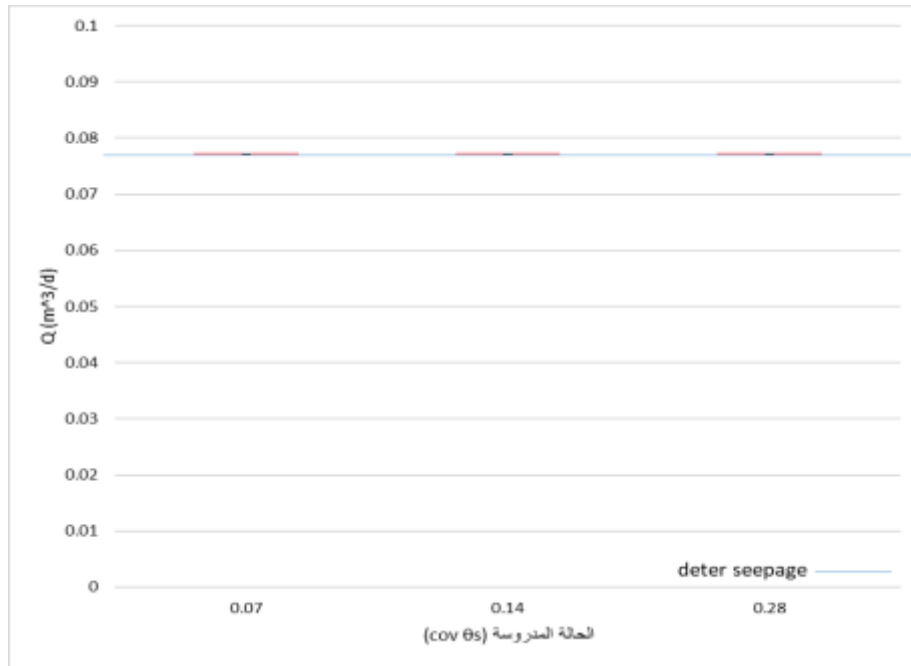
أي عند اعتبار معامل التوصيل متغيراً عشوائياً نجد أن لتباين الناقلية الهيدروليكية آثار كبيرة على التسرب المستقر، حيث أن الزيادة في تباين K سيسبب انخفاض حاد في معدل التدفق. كما أن تباين $COV(Q)$ يزداد بزيادة تباين المدخلات، كما لوحظت فروق ذات دلالة إحصائية بين معدل التدفق المحسوب حتمياً ومتوسط معدلات التدفق للحالات من 1 إلى 3، ويصل الفرق بينهما إلى %51 عند مضاعفة معامل تباين K .

بالنسبة لحالة تغير محتوى الإشباع θ_s تم تجميع قيم التدفق للحالات الثلاث الأخيرة (1500 قيمة) في ملف Excel واحد ورسم المخطط الصندوقي لعرض النتائج بشكل واضح في الشكل (10)، كما تم تمثيل معدل التسرب المحسوب بالنموذج الحتمي بالخط المتواصل باللون الأزرق. كما تبين في الجدول (5) إحصاءات وصفية لمعدل التسرب Descriptive Statistics في الحالات المحسوبة ببرنامج Minitab بعد استيرادها من Excel.

يتضح من نتائج الحالات 4 إلى 6، أن التغيرات الفردية لمحتوى الإشباع θ_s تسبب آثاراً ضئيلة 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 $0.077 \text{ m}^3/\text{day}$. ولا يلاحظ أي تأثير على معامل تباين معدلات التسرب للنماذج المدروسة التي تعتبر مخرجات الدراسة وبالتالي الطبيعة الاحتمالية للتسرب (التوزيع الطبيعي)، وهذا يعني أن عدم اليقين من θ_s له آثار ضئيلة على حالة التسرب المستقر.

الجدول (5): الإحصاءات الوصفية لمعدل التسرب لحالات تغير معامل تباين θ_s فقط ببرنامج Minitab.

Variable Statistics	N	Mean	COV(Q)	Minimum	Maximum	Skew	Kurt
$cov\theta_s=0.07$	500	0.0771	0.0	0.077125	0.077251	0.58	0.07
$cov\theta_s=0.14$	500	0.0771	0.0	0.077102	0.077244	1.08	1.77
$cov\theta_s=0.28$	500	0.0771	0.0	0.077097	0.077174	0.93	0.41



الشكل (10): المخطط الصندوقي لقيم معدل التسرب للحالات المدروسة لتغير θ_s كمتغير عشوائي.

تجدر الإشارة إلى أن قيم معامل التباين تتراوح بين 0.07 و 0.28؛ ومع ذلك، تبين أن معامل التباين لمتوسط التسرب (Q) قيمته معدومة، لذلك، يمكن القول أن تأثير تباين محتوى الإشباع صغير جداً على تباين المخرجات ويمكن إهماله لحالة الجريان المستقر.

4- الدراسة الإحصائية لتسرب النماذج العشوائية

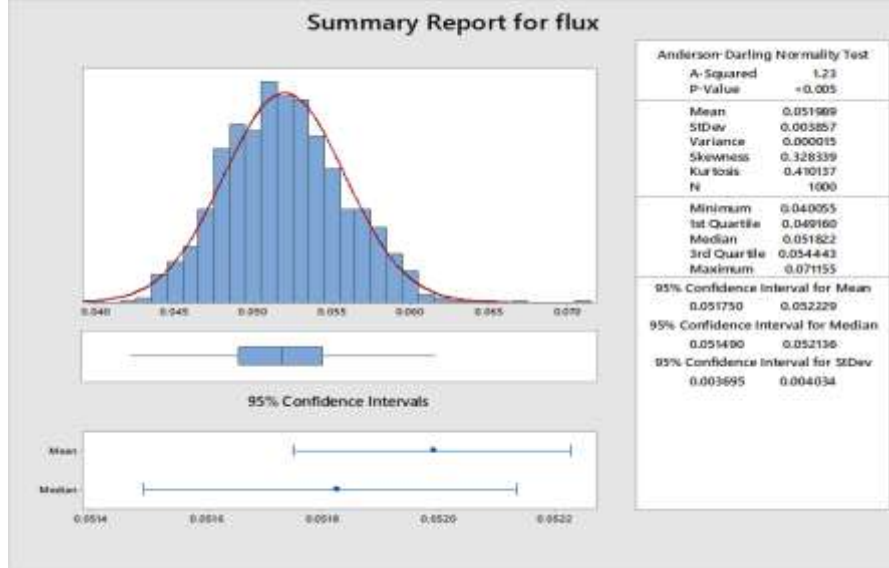
تم في هذا الجزء من البحث بناء 1000 نموذج ببرنامج Seep/W، تم فيها اعتبار جميع البارامترات كمتغيرات عشوائية لتقييم تأثير العشوائية المحتملة للمدخلات على معدل التسرب والتأثير المحتمل على التوزيع الاحصائي الذي تتبعه المخرجات.

يبين الجدول (6) مقاييس الإحصاء الوصفي لقيم التدفقات عبر السد المدروس والتي حصلنا عليها كنواتج نمذجة 1000 نموذج مبني ببرنامج SEEP/W كما ذكرنا سابقاً باستخدام برنامج Minitab.

الجدول (6): الإحصاءات الوصفية لقيم التسرب عبر جسم السد المدروس 1000 نموذج عشوائي باستخدام Minitab

Variable	Descriptive Statistics				
	N	Mean	Minimum	Median	Maximum
Flux(Q) m ³ /d	1000	0.051989	0.040055	0.051822	0.071155
Variable	Descriptive Statistics				
	StDev	CoefVar	Skewness	Kurtosis	MSSD
Flux(Q) m ³ /d	0.003857	7.42	0.33	0.41	0.000015

ويظهر الشكل (11) التدرج التكراري لقيم تدفقات التسرب عبر السد الترابي المتجانس المدروس لحالة الجريان المستقر، حيث يتضح أن متوسط قيم معدل التسرب Mean يتراوح بين (0.05175–0.052229 m³/d) عند درجة ثقة 95%، ووسيط قيم معدل التسرب Median يتراوح بين (0.05149–0.052136 m³/d) عند درجة ثقة 95%، و يتراوح الانحراف المعياري لقيم معدل التسرب بين (0.00369–0.004) عند درجة ثقة 95%.

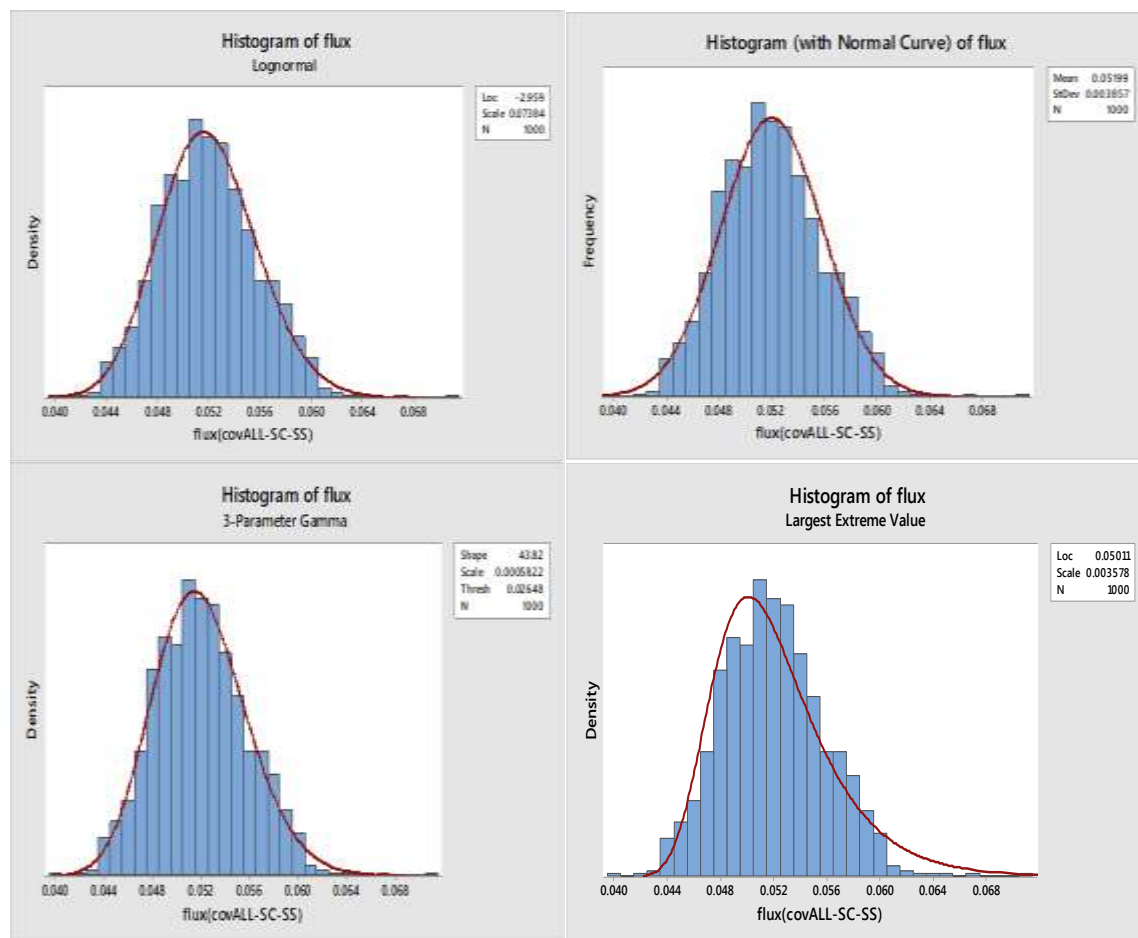


الشكل (11): التدرج التكراري ومنحني التوزيع الطبيعي لبيانات التدفق عبر مقطع السد المدروس للنماذج العشوائية ال 1000.

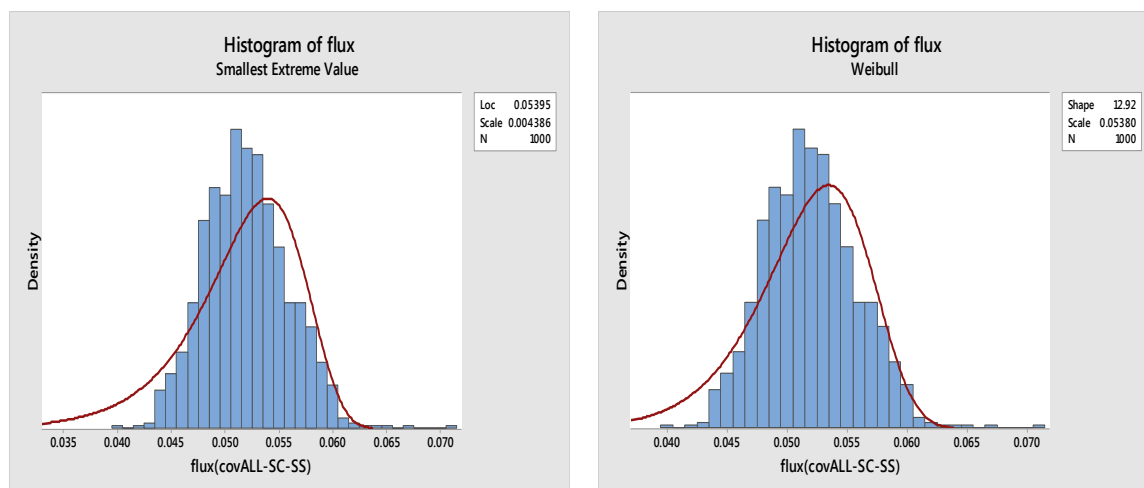
ولإيجاد تابع التوزيع الأمثل لبيانات التسرب يتم استعمال مخطط رسم الاحتمالات (probability plots) ويتم الحكم فيما إذا كان تابع التوزيع يناسب البيانات اعتماداً على الشروط التالية:

- النقاط المرسومة سوف تشكل خطاً مستقيماً تقريباً؛
- النقاط المرسومة سوف تقترب من خط التوزيع الملائم fitted distribution line؛
- إحصائية أندرسون دارلينج (Anderson–Darling) ستكون صغيرة وقيمة (P–value) الموافقة ستكون أكبر من مستوى قيمة a المختارة (سنعتمد a=0.05).

بعد رسم التوزيعات المختلفة لبيانات معدلات التسرب باستخدام Minitab، حيث تم عرض بعضها بالشكل (12)، كتابع التوزيع الطبيعي ولوغاريتم الطبيعي، توزيع غاما، توزيع ويبيل، توزيع القيم العظمى والصغرى، قمنا بتطبيق الاختبارات الإحصائية التي توفر تقييم جودة تمثيل البيانات كاختبار أندرسون دارلينج باستخدام Minitab وتم استعراض النتائج بالجدول (7):



الشكل (12): بعض التوزيعات الاحتمالية لبيانات التسرب باستخدام Minitab

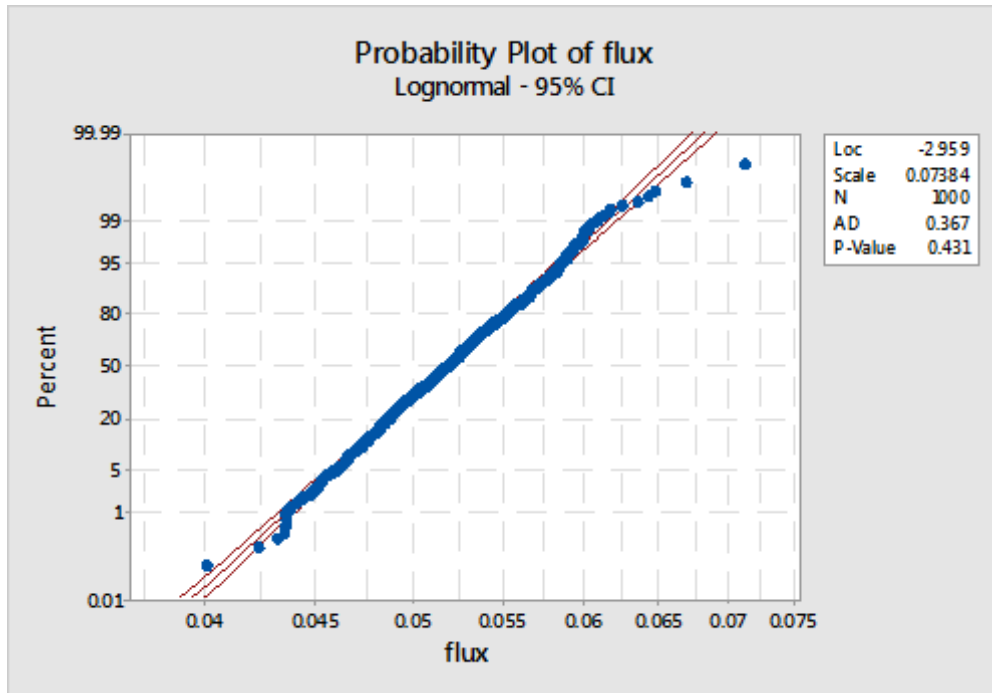


تابع الشكل (12): بعض التوزيعات الاحتمالية لبيانات التسرب باستخدام Minitab

الجدول (7): تقييم جودة تمثيل بيانات التسرب بالتوزيعات المختلفة باختبار أندرسون دارلينغ باستخدام Minitab.

p-value	AD-statistic (Anderson-Darling)	Distribution Type
*	0.30108	lognormal-3p
0.341	0.36893	lognormal
0.005>	1.2251	normal
0.01>	4.2341	Largest Extreme Value
*	0.28873	Gamma (3P)
0.005>	1.658	Weibull-3p

من الجدول السابق نستنتج أنه إذا تم الاعتماد على اختبار أندرسون دارلينغ فقط، فيمكن القبول بمنحني التوزيع لوغاريتم الطبيعي كمنحني توزيع تتبع له قيم معدل التسرب العشوائية المتولدة من قيم عشوائية لكل من معامل الناقلية الهيدروليكية ومحتوى الإشباع في التربة، ويظهر ذلك بالشكل (13).



الشكل (13): تابع توزيع لوغاريتم الطبيعي لبيانات التسرب.

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات

1. الحساسية الكبيرة لمعدلات التسرب المستقر عبر السد الترابي المتجانس المدروس لمعامل الناقلية الهيدروليكية المشبع، إذ تبين انخفاض قيم التسرب مع تزايد معامل التباين، وبالتالي يمكن استخدام ترب تباين معامل توصيلها الهيدروليكي مرتفع بما يسمح بتخفيض التسرب عبر جسم السد أثناء التصميم والتنفيذ بدلاً من الاعتماد على قيمته الوسطية مع مراعاة تحقيقها للمواصفات التصميمية الأخرى.

2. الحساسية البسيطة لمعدلات التسرب المستقر عبر السد الترابي المتجانس المدروس بمحتوى رطوبة الاشباع لتربة الغضار الرملي، إذ بقي معدل التسرب قريباً من القيمة الوسطية بالرغم من تغير معامل تباين محتوى الاشباع.
3. قيم التدفق لمعدل التسرب المستقر عبر السد الترابي المتجانس يمكن اعتبارها تتبع تابع التوزيع لوغاريتم الطبيعي وفقاً لاختبار أندرسون دارلينغ.

التوصيات

1. دراسة حساسية معدلات التسرب المستقر عبر السدود الترابية لتغير باقي بارامترات التربة غير المشبعة كمحتوى المياه المتبقي.
2. 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. *Brief in Floods - Impacts and Protection*. The Arab Center for translation, and Publication, Damascus – Syria, 2005, 723.
2. AWDEH, S. *The most important problems faced the Earth dams and monitoring*. Al-Baath University Journal Vol.73, Issue 8, 2015.
3. HASAN, I., et al., *Simulation of the hydrological regime in earth dams and dikes as a basis for stability analysis using the software PCSiWaPro®*. III Ogólnopolska Konferencja naukowo–Techniczna Zarzdzanie Kryzysowe–Nauka I Praktyka nt. Retencja Wodna Na Obszarach Wiejskich, Opole, Jarnoltowek, Poland, 2012.
4. AIGNER, D. *Auswertung von Untersuchungen über den Einsatz einer Gummispundwand sowie einer Sickerleitung an einem durchströmten Modelldeich*. Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik. Dresden, Technische Universität Dresden, 2004.
5. YILMAZ, A. *Assessment of performance of drainage systems in earth-fill dams.*, M. Sc. thesis, Civil Engineering Dept, Middle East Technical Univ, 2017
6. LTD, G-S.I. *Seepage Analysis with SEEP/W*. 2014.
7. LTD, G-S.I. *GeoStudio Add-Ins Programming Guide and Reference*. 2012.
8. RICHARDS, L.A. *Capillary conduction of liquids through porous mediums*. Physics, 1931. 1(5): p. 318-333.
9. IBRAHEEM, J. *Soil Physics*. Books and Publications Directorate, Tishreen University, Syria, 2013-2012.
10. VAN GENUCHTEN, M.T. *A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils 1*. Soil science society of America journal, 1980, 44(5): p. 892-898.
11. JIANG, S. H., et al., *Efficient system reliability analysis of slope stability in spatially variable soils using Monte Carlo simulation*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2014, 141(2): p. 04014096.
12. CARSEL, R.F. and PARRISH, R.S. *Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics*. Water resources research, 1988. 24(5): p. 755-769.
13. RIKER, R. E, ANDERSON, L. R and JEPPSON, R. W. *Engineering properties and slope stability settlement analysis related to phosphate mine spoil dumps in southeastern Idaho*. 1978. Reports. Paper 133.
14. FENTON, G.A and GRIFFITHS, D. *Statistics of free surface flow through stochastic earth dam*. Journal of geotechnical engineering, 1996.

15. METROPOLIS, N. *The beginning of the Monte Carlo method*. Los Alamos Science, 1987.
16. METROPOLIS, N and ULAM, S. *The monte carlo method*. Journal of the American statistical association, 1949.
17. MUNIR, A.U.K., *Series representations and approximation of some quantile functions appearing in finance*. UCL (University College London), 2013,
18. LE, T.M.H., et al. *Stochastic analysis of unsaturated seepage through randomly heterogeneous earth embankments*. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2012.
19. OSAMA, S. *Data Statistical Analysis using Minitab*. Mnofia University, 2007.
20. USBR., U.S.B.o.R. *Design of Small Dams*. USBR, Washington, 1987.