

## نمذجة معامل النفاذية للتربة في مواقع مختلفة في سهل عكار باستخدام البرنامج الإحصائي (Ms-statistical).

د.م. وسيم يوسف داؤود\*

(تاريخ الإيداع ٢٠٢٥/١٢/٣٠ . قُبل للنشر في ٢٠٢٦/٢/١٧)

### □ ملخص □

يُعتبر سهل عكار الموجود في جنوب طرطوس منطقة سهلية تتكون تربته في أجزاء منه من تربة رملية وخاصة في المنطقة الغربية من السهل الموازية للشاطئ. وعلى اعتبار أن نفاذية التربة من العوامل المهمة في دراسة جريان الماء في التربة، ونظراً لتغير قيم معاملات النفاذية بين منطقة وأخرى، لذا تناول هذا البحث إيجاد علاقة رياضية لحساب معامل النفاذية لأي نقطة من هذه المنطقة من السهل. ومن أجل محاكاة هذا الاختلاف، تم جلب عدة عينات من عدة مواقع تم اختيارها بشكل عشوائي من هذه المنطقة، وعند أعماق مختلفة. حيث تم إيجاد علاقة رياضية (empirical equation) عامة لحساب معامل النفاذية  $k$  (permeability coefficients) لأي تربة من هذه المنطقة بدلالة  $Cu$  (uniformity coefficient) و  $D_{10}$  (effective diameter) و  $e$  (void ratio)، وذلك باستخدام برنامج إحصائي (Ms-Statistical)، وبالاعتماد على نتائج لقيم معامل النفاذية تم الحصول عليها من المخبر للعينات التي تم إحضارها من مناطق مختلفة، وقورنت هذه المعادلة المستخرجة مع المعادلة النظرية المشتقة من قبل بويسلي، فكانت النتائج التي حصلنا عليها من هذه المعادلة قريبة من المعادلة النظرية المشتقة اعتماداً على فرضيات مع اختلاف طفيف يرجع إلى ظروف التجارب المختلفة عما هو مفروض في الاشتقاق النظري.

**كلمات المفتاحية:** سهل عكار، النفاذية، الحبيبات الخشنة، نسبة الفراغ، معامل الانتظام، نظرية بويسلي، نمذجة، الجهاز ذو الضاغط الثابت.

\*دكتوراه في الهندسة المدنية اختصاص ميكانيك التربة والأساسات (الجيوتكنيك)، جامعة أمير كبير الصناعية (بلي تكتيك طهران)، شارع حافظ، طهران ١٥٨٧٥-٤٤١٣، ايران.

## Optimization the permeability coefficient of the soil at different locations in the Akkar Plain using statistical program (Ms-statistical).

Waseem Yousef Daoud\*

(Received 30/12/2025 . Accepted 17/2/2026)

□ ABSTRACT □

The Akkar Plain, located south of Tartus, is a plain with sandy soil in some west parts near the sea. Soil permeability is a crucial factor in studying water flow, and permeability coefficients vary across different areas of the Akkar Plain. Therefore, this research aimed to find an empirical equation to calculate the permeability coefficient for any area of this area. In order to simulate this variation in the plain's soils, several samples were collected from randomly selected locations in these areas of the plain, at varying depths. A general empirical equation was found to calculate the permeability coefficient for soils in this area in terms of the uniformity coefficient ( $C_u$ ), effective diameter ( $D_{10}$ ), and void ratio ( $e$ ), using a statistical program and depending on results of permeability coefficient values obtained from the laboratory for samples brought from different areas. This extracted equation was compared with the theoretical equation derived by Boisley, and it was found that the equation we obtained gives results close to the theoretical equation derived based on assumptions, with a slight difference due to the different experimental conditions than those assumed in the theoretical derivation.

**Keywords:** Akkar Plain, Permeability, Coarse Particles, void ratio, uniformity coefficient, Poiseuille's Theory, Optimization, Constant head method.

---

\*PhD in civil engineering, Department of Civil & Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Hafez St., Tehran 15875-4413, I. R. Iran.

## ١ - المقدمة:

التربة وسط مسامي يتألف من حبات صلبة وفراغات متصلة يمكن للماء أن يجري ضمنها. ودراسة جريان الماء ضمن التربة ضروري لتقدير مدى التسرب في المنشآت الخاضعة لضغوط. ولمعرفة إمكانية الصّخ في مواقع التنفيد. ويُطلق على خاصية المادة التي تسمح للموائع بالتّرشّح خلالها بالنفاذية (Permeability).

إنّ لمحتوى رطوبة التّربة تأثيره الواضح على خواصها، فعند جريان الماء خلال تربة ما فإنّه يولد قوى تسرب لها أثرها على سلامة المنشآت المائية، ويعتمد معدل هبوط طبقة الغضار المتشددة (Consolidation Settlement) على نفاذيته، كما تعتمد كمية المياه المحجوزة خلف السد الترابي والراشحة خلاله وتحتته على نفاذية تربة السد، وأيضاً عندما يتطلب عمل حفرة لأساس في منطقة تحت منسوب سطح المياه الجوفية فإنّ كمية الماء المترشّح في الحفرة يمكن تقديرها إذا عُرفت نفاذية التربة المجاورة، وبناءً عليه تعدّ النفاذية من خواص التربة المهمة التي تتوجب معرفتها حلّ كثير من المشاكل الهندسية (Ahuja et al, 1980).

الماء يتحرك في التربة دوماً باتجاه الانحدار الهيدروليكي للوصول إلى حالة التوازن أو ما يسمى التوازن الطّاقى للتربة. وعندما يتحرك الماء تحت تأثير تدرّج هيدروليكي ثابت نقول عن الحركة أنّها مستقرة، وعندما يتغير التدرج الهيدروليكي أثناء التدفق مع الزمن نقول عن الحركة أنّها غير مستقرة.

قام دتيمير (Detmer, 1995) بدراسة النفاذية والمسامية والتوزيع الحبيبي للتربة المترسبة في حوض البكيروك من خلال قياس النفاذية حقلياً لعشرة أماكن للتربة المترسبة في الحوض وتم استخراج المسامية (porosity) ورسم منحنى التحليل الحبي لكل موقع. وجد بأنّ معامل المسامية ليس له تأثير على قيم النفاذية، ووجد بأنّ زيادة درجة الترابط بين الحبيبات تؤدي إلى نقصان معامل النفاذية. إضافة إلى ما تقدّم يمكن الاعتماد على منحنى التوزيع الحبي للتربة المترسبة في تخمين قيم معامل النفاذية في حال أحجام تلك الحبيبات أكبر أو يساوي (2 mm).

هيونج وجماعته (Huang et al, 1998) طوّروا دالة معامل النفاذية للترب غير المشبعة، عموماً معامل النفاذية (k) للترب المشبعة يكون كدالة من نسبة الفراغ (e)، أما معامل النفاذية للترب غير المشبعة فيكون بدلالة درجة التشبع. الموديل النظري قدّم سلوك التربة عند تشوهها بحيث بين أنّ كلّ من نسبة الفراغ ودرجة التشبع تؤثر على معامل النفاذية. تم إجراء دراسة مخبرية على تربة رملية غرينية غير مشبعة، والنتائج التي تم الحصول عليها قورنت مع الموديل النظري المقترح، وقد وُجد هناك توافق كبير في النتائج.

ريد ولوفي (Reed and Lavoie, 2000) قاموا بإيجاد معامل النفاذية (k) والمسامية للرمال البحرية البلورية في الموقع وباستخدام طريقة تجريبية النفاذية بالسكب. كذلك تمّ عمل موديل ثنائي الأبعاد وباستخدام تقنية الوسط الفعّال. قيمة معامل النفاذية الذي تمّ إيجاده في الموقع يكون مساوي تقريباً لقيمة معامل النفاذية المستخرج من الموديل.

توفيق (Toufigh, 2002) قام بدراسة مسائل الجريان حيث قام بفرض أنّ معاملات النفاذية ثابتة في معادلة لابلاس مع الفراغ والزمن، ولكن بالواقع الحقلي تكون تلك القيم متغيرة. تم تعريف معاملات النفاذية العمودية والأفقية بحالتين، الأولى أخذت بعين الاعتبار التغير الحجمي (Volume change)، والثانية تمّ تعريف معاملات النفاذية بدلالة الضاغط الكلي (Total head). وتم استخدام طريقة العناصر المحددة في الحل. وقد وُجد بأنّ التأثير لتغير قيم معامل النفاذية لا يكون ذي تأثير كبير في المنشآت الهيدروليكية الصغيرة ويزداد تأثيره في المنشآت الهيدروليكية الكبيرة ذات الارتفاع العالي.

نغوين وجماعته (Nguyen et al, 2022) طوّر نموذجاً لنفاذية الوسط المسامي باستخدام تقنية التوسيع. ولتحقيق ذلك تصور الوسط المسامي على أنه حزمة من الأنابيب الشعرية ذات توزيع متماثل لأحجام المسام. يرتبط النموذج المقترح في تلك الدراسة بخصائص البنية المجهرية، مثل نصف القطر الأقصى، والمسامية، والتعرّج، وثابت مميز للوسط المسامي. وقد تمّت مقارنة النموذج بنجاح مع البيانات التجريبية المنشورة، وكذلك مع نموذج موجود في الدراسات المرجعية (Jackson, M. D., 2008; Vinogradov et al., 2021). مينغو وجماعته (Minghui et al, 2025) قدّم نموذجاً لحساب النفاذية يمكن من تحديد تأثيرات المسام والشقوق في آن واحد، مع مراعاة الحجم الكامل للخصائص. يأخذ النموذج في الاعتبار بشكل مستقل خصائص التعرّج للشقوق واسعة النطاق، مع مراعاة توزيع وحجم المسامات صغيرة النطاق. وقد طُوّر تعبيرٌ للتعرّج يدمج تأثيرات التلف الحراري باستخدام طريقة المرونة الهندسية للمسامات.

## ٢ - أنواع حركة الماء في التربة:

يوجد لحركة الماء في التربة نوعان: حركة صفائحية (لامنيارية) وحركة مضطربة (توربينية)

a - الحركة الصفائحية:

هنا يتحرك الماء داخل الأنبوب على شكل خطوط متوازية أي طبقات متوازية دون أن تتقاطع مع بعضها البعض وبسرعات مختلفة، وتكون حركة الماء في مركز الأنبوب أعلى منها على سطح الأنبوب الداخلي. وهنا تكون حركة الماء على شكل سهمي، ونلاحظ هذه الحركة في الأتربة الرملية - السلتية - الغضارية، وهي حركة مهمّة جداً لتطبيق كثير من القوانين الفيزيائية مثل قانون ستوكس وقانون دارسي. وكما تسود هذه الحركة فقط عند السرعات المنخفضة وفي الأنابيب الضيقة نسبياً، ومع زيادة قطر الأنبوب وسرعة الجريان يتغير التدفق الطبقي الصفائحي إلى تدفق مضطرب أي تسود الحركة التوربينية (المضطربة).

b - الحركة التوربينية (المضطربة):

هنا تكون قوى الاحتكاك على جدار الأنبوب عالية فينشأ نتيجة لذلك دوامات مائية وفرملة الحركة، وهذا يؤدي إلى تعادل السرعة في الأنبوب ومن ثمّ تجانس سرعة التدفق في مقطع الأنبوب، وعندما تتشكّل الحركة التوربينية يفقد الماء جزءاً من طاقته الحركية، وعلى الرغم من وجود احتكاك أعلى، إلا أنّ السرعة تكون أكبر وهذا يؤدي إلى جعل كمية الماء المنقولة في الحالة التوربينية أكبر منها في الحالة الصفائحية عند التدرج الهيدروليكي نفسه. ومنه في الحركة الصفائحية يكون توزيع سرعة الماء قطع مكافئ (غير متجانس) داخل الأنبوب، أمّا في الحركة التوربينية فيعطي توزيع أكثر تجانس عبر المقطع فيكون توزيع السرعة أكثر تسطحاً (Gumi. K, 2000).

## ٣ - أهمية البحث وأهدافه:

نظراً لتغير قيم معامل النفاذية من منطقة إلى أخرى في سهل عكار وفي نفس الوقت تغيره أفقياً أو عمودياً في المنطقة الواحدة، سيتمّ في هذا البحث إيجاد علاقة رياضية عامة لحساب معامل النفاذية (k) لأيّ نقطة من المنطقة المدروسة في سهل عكار، وعند أي عمق حيث التربة ذات حبيبات خشنة وغير متماسكة (Cohesionless soil)، وذلك باستخدام برنامج إحصائي، وبالاعتماد على نتائج لقيم معامل النفاذية تمّ الحصول عليها من المخبر باستخدام تجربة الضاغط الثابت لعدّة عينات تمّ استحضارها من أربعة مناطق، صنّفت كالاتي (A و B و C و D)، وذلك حسب قيم الأقطار الفعّالة ( $D_{10}$ )، ولقد وضعت تلك العينات في خلية فحص النفاذية عند كثافات رص جافة مختلفة أي عند

نسب فراغ مختلفة، ثم تم تكرار تلك التجارب لعدة قيم من معامل الانتظام (Cu). حيث النموذج الذي تم إيجاده لمعامل النفاذية في هذه الدراسة يرتبط بكل من القيم التالية (Cu) و (D<sub>10</sub>) و (e). والفرق بين المعادلتين التجريبية والنظرية هو إدخال معامل الانتظام لحبيبة التربة في المعادلة التجريبية التي حصلنا عليها، مما يجعلها أقرب إلى تمثيل الواقع الحقلية، حيث أخذ بعين الاعتبار كون التربة المدروسة هي تربة مفككة، حيث أن معامل الانتظام يُعتبر عامل مهم في هذا النوع من الترب، بينما المعادلة النظرية تُعتبر معادلة عامة لأنواع التربة المختلفة ذات المسامات المتصلة، والتي تكون أشبه ما يكون بالأنبوب الشعري الذي له قطر (d).

#### ٤ - قياس النفاذية:

يُطلق على الأنواع المختلفة من الأجهزة المستخدمة في تعيين معامل النفاذية للتربة مخبرياً بأجهزة قياس النفاذية (Permeameter). وهناك نوعان من هذه الأجهزة:

- a- الجهاز ذو الضاغط المتغير (Falling head method): تُستعمل هذه التجربة لقياس عامل النفاذية في التربة المتماسكة ذات النفوذ المنخفضة (ASTM D 3385 – 09, 2009).
- b- الجهاز ذو الضاغط الثابت (Constant head method): وهذا الجهاز الذي تم استخدامه في البحث الحالي. توضع عينة التربة بحالتها الجافة بداخل أسطوانة عمودية حيث يوجد قرص مسامي في أعلى وأسفل العينة (Porous screens) الشكل (١)، ويتم التحكم بدرجة الرّص (الكثافة الجافة) عن طريق تغيير مسافة السقوط لحبيبات التربة من قمع (Vessel)، يعتمد حجم خلية الفحص على حجم حبيبات التربة المختبرة وأن نسبة قطر الخلية إلى قطر الحبيبة الأكبر يجب أن يكون أكبر من (١٢) (ASTM D2434 – 68, 2006).

$$Q\Delta = V . A . \Delta t \text{ ----- (1)}$$

من علاقة دارسي:  $V = K i$

حيث:  $V$  السرعة الوسطية لجريان الماء في التربة

$i$  الميل المائي ويمثل نسبة ضياع الضاغط الكلي بين نقطتين موجودتين على مسار الجريان إلى المسافة بينهما.

$K$  عامل النفوذ، وله وحدة سرعة مثل سم/ثا أو مم/ثا، وتعتبر له قيمة ثابتة في مجال الجريانات السطحية.

$$Q\Delta = K . i . A . \Delta t \text{ -----(2)}$$

$$\text{But } q = \frac{V}{t} \text{ \& } i = \frac{h}{L}$$

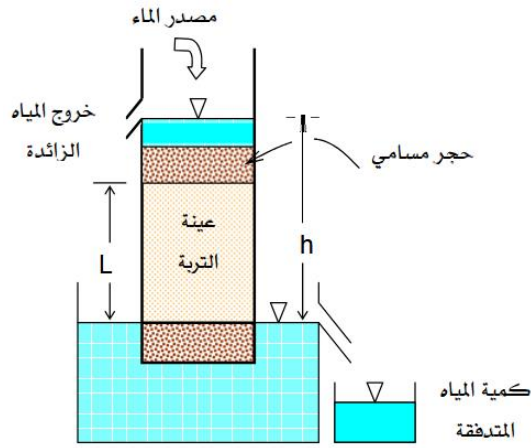
$$K = \frac{V.L}{A.h.t} \text{ -----(3)}$$

(L): ارتفاع العينة (Soil height).

(h): ارتفاع الماء الثابت (Constant head).

(A): مساحة مقطع العينة (Cross sectional area).

(q): التصريف عندما يكون الجريان هادئ (Discharge at steady state).



الشكل (1) جهاز قياس النفاذية ذو الضاغظ الثابت.

### ٥- هيدروليكية الجريان الصفائحي (الطبقي) (Laminar flow):

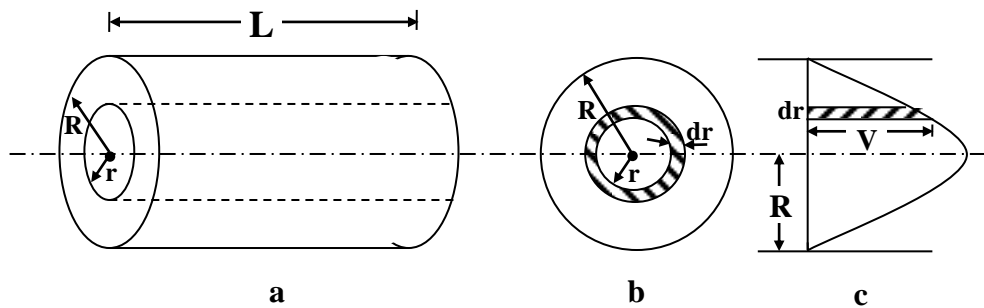
مما تقدم عرّفنا أنّ الجريان خلال فراغات التربة هو طباقياً، وهو بذلك يشبه في طبيعته الجريان خلال أنابيب ثابتة المقطع، ولما كان من المتعدّر تعيين الجريان خلال فراغات التربة المفردة، فإنّ دراسة الجريان الطبقي في الأنابيب سيفيد في تأكيد العوامل التي تؤثر في الجريان خلال الفراغات (Terzagli et al, 1996).

اشتقّ العالم بويسلي (Poiseuille) (Look. B. G, 2007) معادلة للجريان الطبقي في الأنابيب، وهذه المعادلة تعرف بمعادلة بويسلي (Poiseuille's equation)، واعتمد على فرض أنّ جريان السائل يكون خلال أنبوب نصف قطره (R) وطوله (L)، بفرض أنّ الضّغط الداخل عند إحدى النهايتين هو (P) وإنّ الضّغط الخارج عند النهاية الأخرى هو (P + ΔP) وكما هو مبين في الشكل (٢). ومن فرض أنّ القوة الصّافية لحفظ الجريان (S) تساوي إلى

$$S = \pi r^2 \Delta p \text{ ----- (٤)}$$

وهذه تتعادل مع المقاومة اللزّوجية على الأسطوانة والمساوية لـ

$$\text{Viscous Resistance} = -\mu \cdot \frac{dv}{dr} \cdot 2\pi r L \cdot L \text{ ----- (5)}$$



الشكل (٢): الجريان الطبقي (الصفائحي) في أنبوب

وبالتالي سنجد توزيع السرعة في الجريان الطبّاقى من المعادلة (6)، والتي تكون بشكل قطع مكافئ كما بالشكل (c٢) (Look. B. G, 2007).

$$V = \frac{\gamma_w \cdot i}{4\mu} (R^2 - r^2) \text{ حيث أن } i \text{ : (6)}$$

هو الميل (الانحدار) المائي.

كذلك فان كمية الجريان مساوية لـ:

$$Q = \frac{\gamma_w \cdot i \cdot \pi \cdot R^4}{8\mu} \text{ (7)}$$

وبالإمكان كتابة المعادلة (٧) كما يلي:

$$Q = \frac{1}{2} m^2 \frac{\gamma_w}{\mu} i \cdot a \text{ (8)}$$

حيث أنّ (a): مساحة مقطع الجريان  $(\pi R^2)$  ، (m): معدل نصف القطر المائي  $(R/2)$  ويمكن الحصول على معادلة تشبه المعادلة (٨) لمقاطع أخرى غير دائرية وتختلف عنها في القيمة العددية للمعامل فقط، ومن هنا فان المعادلة العامة للجريان خلال الأنابيب الشعرية تُكتب كما يلي:

$$Q = C_s \cdot m^2 \frac{\gamma_w}{\mu} i \cdot a \text{ (9)}$$

تعتمد قيمة المعامل  $C_s$  على شكل المقطع العرضي. وفي حالة التربة تكون المساحة الفعلية للجريان (a) هي المسامية (n) مضروبة بالمساحة الكلية (A) وبناءً عليه يكون الجريان الطبّاقى خلال التربة هو:

$$Q = C \cdot m^2 \cdot \frac{\gamma_w}{\mu} n \cdot i \cdot A \text{ (10)}$$

وُضعت المعادلة (10) بشكل مماثل لقانون دارسي للجريان  $(Q=k \cdot i \cdot A)$  لتوضح العوامل التي تشكّل معامل دارسي للنفذية  $(k = C \cdot m^2 \cdot \frac{\gamma_w}{\mu} \cdot n)$ . يتغير المعامل  $C_s$  إلى معامل أكثر شمولاً وهو C ليشمل نسبة طول مسار الجريان

حيث يُقاس من المسار الفعلي المتعرّج الذي يسلكه الماء. وهذه النسبة ستكون خاصية لبنية التربة وقياس الحبيبات ونسبة الفراغ، أمّا نصف القطر المائي (m) لكتلة التربة فإنّ له معنى فيزيائي حيث يُعرّف نصف القطر المائي بأنه

نسبة المساحة (a) إلى محيط الجريان (P) أو إنّ  $(m = \frac{a}{p} = \frac{aL}{pL})$ ، حيث يمثّل (L): طول الأنبوب وبناءً عليه فإنّ

(m) هي النسبة بين حجم قناة الجريان إلى المساحة السطحية لقناة الجريان. يكون حجم قناة الجريان في كتلة التربة مساوياً لحجم الفراغات وتكون المساحة السطحية مساوية للمساحة السطحية لحبيبات التربة. وبناءً عليه فإنّ

(e) حيث  $(m = \frac{eV_s}{A_s})$ : تمثل نسبة الفراغات و(Vs) يمثّل حجم حبيبات التربة (Volume of soild)، وتمثّل (As)

المساحة السطحية لحبيبات التربة. فإذا فرضنا أنّ (d) هو قطر الحبيبة الكروية المفترضة التي لها نسبة الحجم إلى المساحة يكون:

$$m = e \frac{V_s}{A_s} = e \frac{\pi \cdot d^3}{6\pi \cdot d^2} = \frac{1}{6} e \cdot d \text{ (11)}$$

وبتعويض المعادلة (11) بالمعادلة (10) وكذلك  $n = \frac{e}{1+e}$  نحصل على:

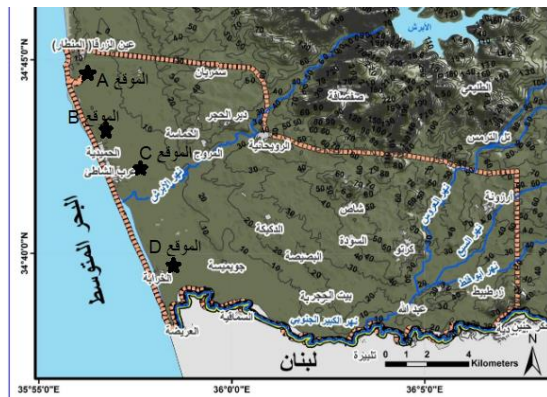
$$Q = \left[ C.d^2 \frac{\gamma_w}{\mu} \cdot \frac{e^3}{1+e} \right] i.A \text{-----(12)}$$

$$k = C.d^2 \cdot \frac{\gamma_w}{\mu} \cdot \frac{e^3}{1+e} \text{-----(13)}$$

يمثل العامل C القيمة العددية. إن محتويات الأقباس في المعادلة (12) تكافئ معامل دارسي وبذلك نحصل على المعادلة (13) التي تعتبر المعادلة النظرية لإيجاد معامل النفاذية. وتُظهر هذه المعادلة تأثير العوامل المختلفة في معامل النفاذية.

## ٦- العمل المخبري:

تم إحضار التربة التي أُجري عليها هذا البحث من مناطق مختلفة من غرب سهل عكار الموازية للشاطئ والتي تبعد عنه مسافات تتراوح من ٥٠ إلى ١٥٠ متر، وتمّ انتخاب أربع مواقع من أماكن مختلفة من هذه المناطق كما هو موضح في الشكل (٣)، وتم قياس القطر الفعّال للعينات المأخوذة من كل موقع فوجدنا قيمة القطر الفعّال متقاربة جداً لتربة كلّ موقع، قسّمنا هذه المواقع إلى أربع مجموعات لكلّ مجموعة قطر فعال خاص بها، وتمّ اعتماده كقيمة متوسطة للقيم المتقاربة التي حصلنا عليها للعينات المأخوذة من كل مجموعة كان لها قيم متقاربة للقطر الفعّال، وهذه المجموعات هي (A,B,C and D) والتي القطر الفعّال لكلّ منها ( $D_{10}=0.012, 0.035, 0.05$  and  $0.064$  cm) على التوالي.

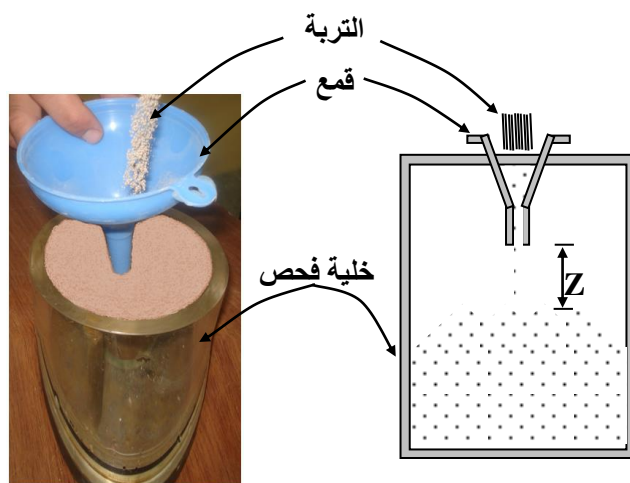


الشكل (٣): صورة فضائية لسهل عكار توضح مناطق أخذ العينات.

إنّ متوسط الوزن النوعي لعينات التربة مساوي إلى (٢,٦٥) لكل موقع من المواقع الأربعة. كذلك وجد بأنّ لكلّ منطقة قيم نسب فراغ تتراوح تقريباً بين (٠,٣٣٣) إلى (٠,٨٩١)، ومعامل الانتظام يأخذ قيم غير ثابتة في كلّ موقع، لذا من أجل تمثيل جميع العينات المأخوذة إلى المختبر تمّ إجراء تجربة النفاذية ذات الضاغط الثابت لعينات من التربة الجافة، حيث تمّ التحكم بكتافة التربة الجافة ( $\gamma_d$ ) عن طريق استخدام الطريقة المطرية بهدف تحضير عينات بكتافات مختلفة، وذلك من خلال تغيير مسافة السقوط لحبيبات التربة الجافة (Z) داخل القمع. ومن أجل تحقيق قيم نسبة الفراغ الحقلية في المختبر فلقد تمّ رص كلّ عينة من عند مسافات سقوط مناظرة إلى كثافة جافة ( $\gamma_d=19.88\text{kN/m}^3$ ) و ( $\gamma_d=17.72\text{kN/m}^3$ ) و ( $\gamma_d=15.77\text{kN/m}^3$ ) و ( $\gamma_d=14.014\text{kN/m}^3$ )، ثمّ تمّ حساب نسب الفراغ (e) بناءً على قيم

الكثافات الجافة المستخرجة أعلاه حسب العلاقة التالية:  $\gamma_d = \frac{G \cdot \gamma_w}{1+e}$  وكانت  $e$  مساوية إلى (0.333) و (0.495) و (0.68) و (0.891) على التوالي.

عند إعداد النموذج تبقى مسافة سقوط الحبات (Z) من فتحة القمع إلى سطح التربة ثابتة، ونقوم بعملية تحريك القمع يساراً ويميناً إلى أن تُملأ خلية تجربة النفاذية إلى الأعلى كما موضح بالشكل (٤). حيث أنه تم التحكم بقيمة الكثافة الجافة في المختبر لجميع العينات المأخوذة من مواقع التربة (A) و (B) و (C) و (D) من خلال تغير ارتفاع سقوط الحبيبات لكل عينة.



الشكل (٤): تحضير عينة التربة بالطريقة المطرية.

التربة في الموقع (A) التي قطرها الفعال ( $D_{10} = 0.0124 \text{ cm}$ ) تتغير فيه قيم القطر ( $D_{60}$ ) لتصبح قيم معامل الانتظام مساوية إلى (0.95, 1.51, 2, 3.95, 7.1, 14.89 and 21.11)، بعد ذلك سننصر التربة عند أربع كثافات جافة مختلفة تماماً والتي تكون مناظرة إلى نسب فراغ مقدارها (0.333, 0.495, 0.68 and 0.891) وذلك لكل عينة ذات معامل انتظام معين، لذلك فإن عدد عينات التربة التي سيتم قياس معاملات النفاذية (k) من تجربة النفاذية المعتمدة في هذا البحث لتربة هذا الموقع هو (٢٨) عينة.

تربة الموقع (B) الذي له قطر فعال ( $D_{10} = 0.035 \text{ cm}$ ) نأخذ عينات ذات قيم معامل انتظام مساوية لـ (0.95, 1.23, 2, 2.505, 3.98 and 5.03)، وكذلك سنقوم برص التربة عند كثافات مناظرة إلى نسب الفراغ التي مقدارها (0.333, 0.495, 0.68 and 0.891)، لذلك فإن عدد العينات من هذا الموقع سيكون مساوي إلى (24) عينة. التربة في الموقع (C) لها قطر فعال ( $D_{10} = 0.05 \text{ cm}$ ) وقيم معامل انتظام مساوي إلى (0.95, 1.24, 1.5, 2.15, 2.55, 3.1, 3.99 and 5.1) وكذلك سنقوم برص التربة وذلك لكل عينة ذات معامل انتظام معين عند كثافات مناظرة إلى نسب الفراغ التي مقدارها (0.333, 0.495, 0.68 and 0.891)، لذا فإن عدد العينات في هذا الموقع تكون مساوية إلى (32). التربة (D) لها قطر فعال ( $D_{10} = 0.064 \text{ cm}$ ) وقيم معامل الانتظام التالية (0.95, 1.24, 1.5, 2.15, 2.55, 3.1 and 3.99) وبنفس الأسلوب نرص التربة عند كثافات مناظرة إلى نسب الفراغ السابقة، لذا فإن عدد عينات فحص النفاذية لهذا الموقع تكون مساوية إلى (٢٨) عينة.

## ٧- النتائج والمناقشة:

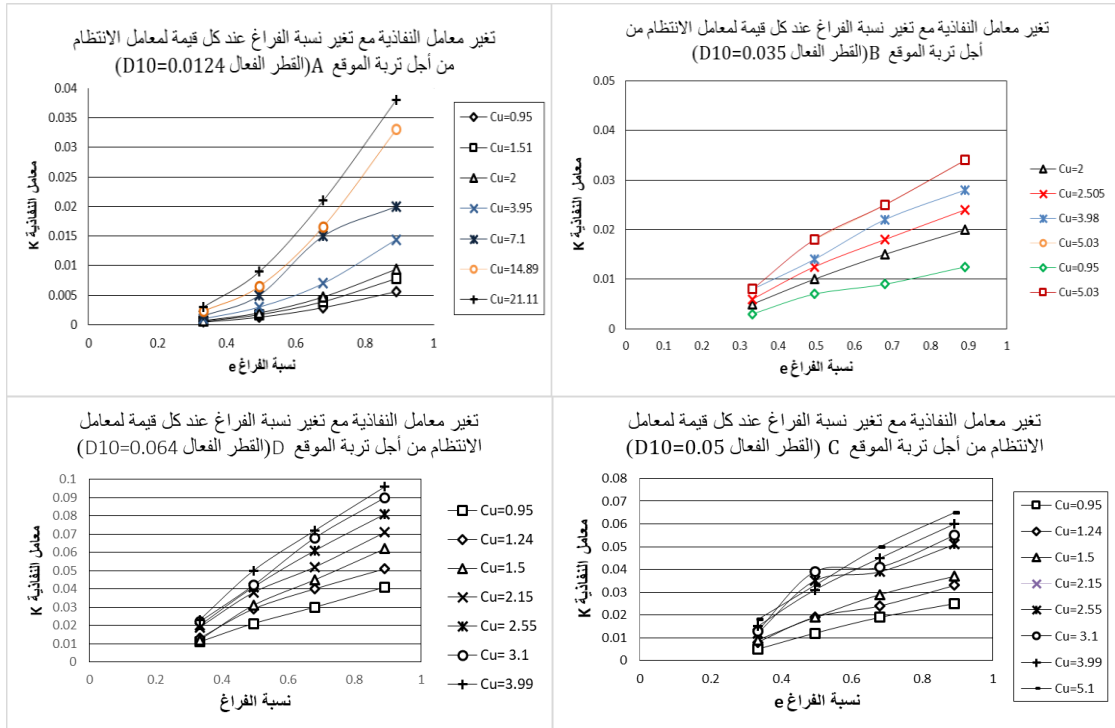
قيم معامل النفاذية (k) للمواقع الأربعة والتي تم الحصول عليها من تجربة النفاذية ذات الضاغط الثابت للعينات المذكورة مبينة في الجدول (١)، وتلك القيم تبين بأنه كلما ازدادت قيم معامل الانتظام Cu كلما ازداد قيم معامل النفاذية (k)، تفسير هذه أنه كلما كانت الحبيبات منتظمة الشكل كلما أدى ذلك إلى عدم تداخل لحبيبات التربة وبالتالي تتشكل فراغات كبيرة يمرّ الماء من خلالها، وبذلك يزداد معامل النفاذية (k). كذلك القيم بينت أنه عند قيمة محدّدة لمعامل الانتظام فإنّ النفاذية تزداد مع زيادة نسبة الفراغ الشكل (٥)، وهذا يوافق كثير من الدراسات المرجعية التي درست تأثير عوامل مختلفة منها نسبة الفراغ ودرجة الإشباع وغيرها على قيم معامل النفاذية للتربة في حالاتها المختلفة، وفي هذه الدراسة تمّ إدخال تأثير معامل الانتظام كون التربة المدروسة تربة مفككة.

الجدول (١): نتائج تجارب المخبر لقيم معامل النفاذية (k) المقابلة لقيم مختلفة لمعامل الانتظام (Cu) لعدة نسب فراغ (e) عند قطر فعال معين.

بيانات الموقع B				بيانات الموقع A			
D10 (Cm)	Cu	E	K(Cm/sec)	D10 (Cm)	Cu	e	K(Cm/sec)
0.035	0.95	0.891	0.0404	0.0124	0.95	0.891	0.0056
		0.68	0.024			0.68	0.0029
		0.495	0.0092			0.495	0.00127
		0.333	0.0032			0.333	0.00044
	1.23	0.891	0.049		1.51	0.891	0.0078
		0.68	0.029			0.68	0.0039
		0.495	0.0108			0.495	0.0017
		0.333	0.004			0.333	0.00058
	2	0.891	0.067		2	0.891	0.0094
		0.68	0.034			0.68	0.0047
		0.495	0.0146			0.495	0.002
		0.333	0.005			0.333	0.0007
	2.505	0.891	0.077		3.95	0.891	0.0144
		0.68	0.039			0.68	0.007
		0.495	0.0169			0.495	0.003
		0.333	0.006			0.333	0.001
	3.98	0.891	0.1		7.1	0.891	0.02
		0.68	0.05			0.68	0.015
		0.495	0.022			0.495	0.005
		0.333	0.008			0.333	0.0015
5.03	0.891	0.12	14.89	0.891	0.033		
	0.68	0.06		0.68	0.0166		
	0.495	0.026		0.495	0.0065		
	0.333	0.008		0.333	0.0023		
				21.11	0.891	0.038	
					0.68	0.021	
					0.495	0.009	
					0.333	0.003	

بيانات الموقع D			
D10 (Cm)	Cu	e	K(Cm/sec)
<b>0.064</b>	0.95	0.891	0.13
		0.68	0.067
		0.495	0.029
		0.333	0.01
	1.24	0.891	0.15
		0.68	0.08
		0.495	0.034
		0.333	0.0117
	1.5	0.891	0.18
		0.68	0.089
		0.495	0.038
		0.333	0.013
	2.15	0.891	0.22
		0.68	0.111
		0.495	0.043
		0.333	0.016
	2.55	0.891	0.25
		0.68	0.12
		0.495	0.054
		0.333	0.018
	3.1	0.891	0.28
		0.68	0.126
		0.495	0.061
		0.333	0.02
	3.99	0.891	0.329
		0.68	0.175
		0.495	0.071
		0.333	0.024

بيانات الموقع C			
D10 (Cm)	Cu	e	K(Cm/sec)
<b>0.05</b>	0.95	0.891	0.093
		0.68	0.045
		0.495	0.0181
		0.333	0.0063
	1.24	0.891	0.097
		0.68	0.0562
		0.495	0.0214
		0.333	0.0071
	1.5	0.891	0.11
		0.68	0.062
		0.495	0.023
		0.333	0.0075
	2.15	0.891	0.135
		0.68	0.07
		0.495	0.03
		0.333	0.009
	2.55	0.891	0.15
		0.68	0.072
		0.495	0.034
		0.333	0.0115
	3.1	0.891	0.175
		0.68	0.088
		0.495	0.039
		0.333	0.0118
	3.99	0.891	0.189
		0.68	0.102
		0.495	0.044
		0.333	0.013
5.1	0.891	0.24	
	0.68	0.12	
	0.495	0.052	
	0.333	0.0165	



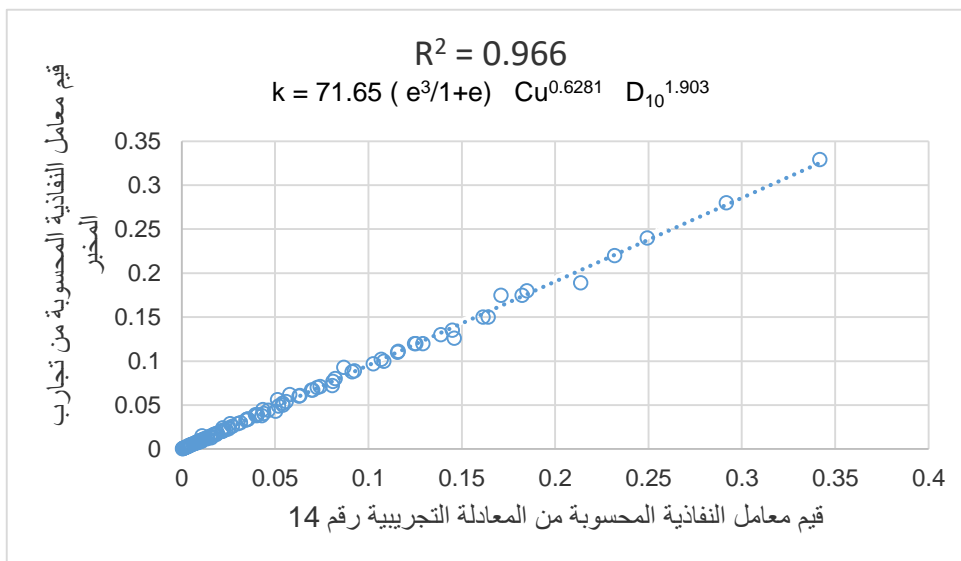
تم إدخال البيانات المخبرية لمعامل النفاذية والموجودة في الجدول (١) ببرنامج إحصائي (Ms-statistical)، وتم إيجاد العلاقة الرياضية (١٤)، والتي من خلالها يمكن تقدير قيمة معامل النفاذية لأي نقطة وفي أي موقع وعند أي عمق في المنطقة المدروسة من سهل عكار، وذلك من خلال معرفة قيمة معامل الانتظام (Cu) والقطر الفعال (D<sub>10</sub>) ونسبة الفراغات (e). ودقة هذه العلاقة الرياضية (R<sup>2</sup> = 0.966) وهي تُكتب بالشكل:

$$k = 71,65 \left( \frac{e^3}{1+e} \right) Cu^{0,6281} D_{10}^{1,903} \text{----- (14)}$$

تم مقارنة هذه المعادلة التجريبية التي حصلنا عليها مخبرياً مع المعادلة (١٣) المشتقة نظرياً من قبل العالم بويسلي والخاصة بالجريان الصفائحي في الأنابيب الشعرية فلوحظ أنّ المعادلة (١٤) بالمقارنة مع المعادلة النظرية (١٣) التي تم اشتقاقها في الفقرة الخامسة نجد أنّها مشابهة لها. نلاحظ أنّ (D<sub>10</sub><sup>1,903</sup>) في المعادلة (١٤) يقابل (d<sup>2</sup>) في المعادلة (١٣)، وبين هذين الحدين نجد فرق في قيمة الأسين (١,٩٠٣) و (٢) وهو فرق ليس بالمقدار الكبير، ونعزو هذا الفرق إلى تقريب مسامات التربة المتصلة وجعلها أقرب إلى الأنبوب، وأمّا الحد الثاني (  $\frac{e^3}{1+e}$  ) فهو نفسه

في المعادلتين، وأمّا الثابت (٧١,٦٥) في المعادلة التجريبية فيكون مقابل للثابت (C ×  $\frac{\gamma_w}{\mu}$ ) في المعادلة النظرية،

أمّا الفرق الوحيد بين المعادلتين فهو معامل الانتظام لحبات التربة (Cu) والذي تم إدخاله في المعادلة التجريبية بسبب كون إنّ تلك المعادلة خاصة بالتربة المفككة الغير متماسكة (Cohesionless)، حيث أنّ معامل الانتظام يُعتبر عامل مهم في التربة المفككة، بينما المعادلة النظرية تُعتبر معادلة عامة لأنواع التربة المختلفة ذات المسامات المتصلة والتي تكون أشبه ما يكون بالأنبوب الشعري الذي له قطر (d). الشكل (٦) يوضح مقارنة قيم معامل النفاذية (k) التي حصلنا عليها من التجارب في المخبر مع القيم التي حصلنا عليها من المعادلة (١٤). حيث نجد أنّ هناك تقارب مقبول، وهذا الشكل يمثل دقة تلك المعادلة (R<sup>2</sup>).



الشكل (٦): المقارنة بين معامل النفاذية (k) المحسوب من تجارب المخبر مع القيم المحسوبة من المعادلة التجريبية.

## ٨-الاستنتاجات:

- (١) -هناك تقارب كبير بين قيم معامل النفاذية الناتجة عن تطبيق المعادلة التجريبية (١٤) وقيم معامل النفاذية المقاسة مخبرياً لعينات مأخوذة من المواقع الأربعة التي تم اختيارها عشوائياً.
- (٢) -المعادلة التجريبية (١٤) التي تم استخراجها بالاعتماد على القيم المخبرية يمكن اعتبارها معادلة عامة لإيجاد معامل النفاذية لأي نقطة من منطقة سهل عكار الموازية للشاطئ والتي تتميز تربتها بالطبيعة الرملية، وعند العمق المحدد في حال توفر المعطيات المطلوبة للمعادلة في تلك النقطة.
- (٣) -المعادلة التجريبية مشابهة إلى حد كبير إلى المعادلة النظرية التي اشتقها العالم بويسلي (Poiseuille)، التي اعتمد في اشتقاقها على فرض أن جريان السائل خلال مسامات التربة أشبه بالجريان في أنبوب متصل، والفرق بين المعادلتين هو إدخال معامل الانتظام لحبات التربة في المعادلة التجريبية حيث أخذ بعين الاعتبار كون التربة المدروسة هي تربة مفككة.
- (٤) -معامل النفاذية (k) يتناسب طردياً مع معامل الانتظام (Cu) لحبات التربة، وكذلك الحال بالنسبة إلى نسبة الفراغات، وأيضاً نلاحظ معامل النفاذية يزداد مع زيادة قيمة القطر الفعال (D10).

## ٩-التوصيات:

- (١) - يمكن الاستعانة بالمعادلة التجريبية (١٤) في إيجاد معامل النفاذية (k) لأي تربة غير متماسكة ذات خصائص مشابهة للتربة التي أخذت منها العينات من السهل بدل من استخراجها مخبرياً أو حقلياً.
- (٢) حساب معامل النفاذية بالطريقة الحقلية في المواقع التي استخرجت منها العينات الترابية التي أجريت عليها الدراسة، ومقارنة هذه النتائج الحقلية مع القيم التي تعطيها المعادلة التجريبية لنفس النقط التي تجرى فيها التجارب الحقلية لإعطاء موثوقية أكبر لهذه العلاقة.
- (٣) - إجراء دراسة مشابهة على منطقة أخرى تربتها متماسكة واستخدام معاملات خاصة بالتربة المتماسكة.

## المراجع:

1. AHUJA, L.R., GREEN, R.E., AND CHONG, S. K. 1980 *A simplified functions approach for determining soil hydraulic conductivities and water characteristics in situ*. Water Resources Research. vol.16, 947–953.
2. ASTM D 3385 – 09 (2009), “*Standard Test Method for Infiltration Rate of Soils in Field Using Double – Ring Infiltrometer*”.
3. ASTM D2434–68 (2006), “*Standard Test Method for permeability of Granular Soils*”.
4. DETMER, D. M. 1995, *Permeability, porosity, and grain – size distribution of selected Pliocene and quaternary sediments in the Albuquerque basin*, New Mexico Geology, CA 93023, PP. 79- 87.
5. GUMI, K. 2000, *In-situ permeability test method and permeability coefficient measuring device*, JP 2000-352042 A.
6. HUANG, S., BARBOUR, S. L., AND FREDLUND, D. G. 1998, *Development and verification of a coefficient of permeability function for a deformable unsaturated soil*, Canadian Geotechnical Journal, Vol 35, PP. 411-425.
7. JACKSON, M. D., 2008, *Characterization of multiphase electrokinetic coupling using a bundle of capillary tubes model*, J. Geophys. Res.: Solid Earth, 113 (B4), 005490.
8. LOOK, B., G. 2007, *Handbook of Geotechnical Investigation and Design Tables*, Chapter Eight, Taylor and Francis, PP. 91-100.
9. MINGHUI, L., BANGHONG, Z., ZHOUQIAN, W., SHAOCHEN, L., JUN, L., DONG MIG, Z., HEPING, X., 2025, *A novel permeability calculation model to simultaneously quantify the impacts of pore and fracture with full feature size*. International Journal of Mining Science and Technology. vol. 35, No. 4. Pages 609-618.
10. NGUYEN, V. N., DAO, T. Q., LUONG, D. T., 2022, *A model for permeability estimation in porous media using a capillary bundle model with the similarly skewed pore size distribution*. Journal of Water Resources & Environmental Engineering. vol. 12, No. 82.
11. RAMAMURTHY, T.N. AND SITHARAM, T.G. 2008, *Geotechnical engineering (basics of soil mechanics)*", Bangalore, Indian.
12. REED, A. H., AND LAVOIE, D. 2000, *Quantification of Darcy's coefficient of permeability in siliciclastic marine sands using image analysis and effective medium theory modeling*, Journal of the Acoustical Society of America, Vol 108, Issue 5, PP. 2535-2540.
13. TERZAGHI, K., PECK, P. B., AND MESRI, G. 1996, *Soil mechanics in engineering practice*, Third Edition, United State of America.
14. TOUFIGH, M. M. 2002, *Seepage with Nonlinear Permeability by Least Square FEM*, IJE Transactions, Vol 15, No. 2, PP 125- 134.
15. VINOGRADOV, J., HILL, R, JOUGNOT, D. 2021, *Influence of pore size distribution on the electrokinetic coupling coefficient in two-phase flow conditions*, Water, 13, 2316.