Journal of Water Resources and Geosciences

Vol. 4, No.2, 2025

A Comprehensive and Extensive Review of the Process of Water Infiltration in Soil

Saraa Zaher Moyaser Al-layla*, Ahmed Ali Mohammed Al-Ogaidi

Dams and Water Resources Engineering Department/ College of Engineering/ University of Mosul/ Mosul/ Iraq

*Corresponding author's email: saraazahr98@gmail.com

Abstract

Infiltration is the downward movement of water in the soil due to rain, surface runoff, and irrigation. It is a fundamental component of the water cycle as it has a direct influence on water use efficiencies and loss estimation. The current paper aims to investigate the process of infiltration and the forces behind the process, the mathematical and numerical models that were implemented by scientists to consequently estimate the infiltration rate and the amount of infiltration. Furthermore, the most common artificial intelligence methods used to model the process will also be explored. The findings from this review have established that the soil physical properties play a crucial role in soil infiltration behavior, as an increase in sand content and porosity is directly related to the high infiltration level while an increase in clay content, bulk density or initial water content is associated with the decrease in the infiltration rates. It was also reported that the Kostiakov model of all its forms and Philip and Horton's were the most common and other commonly used models in the description of the infiltration process. The Hydrus-1D computational model was identified with high accuracy in regards to the modelling of the water flow, as the values of the soil parameters are to be determined with high accuracy. On the other hand, using the data produced by the researches, machine learning methods such as ANN, GEP, M5P, RF, and PINN could have the potential to provide a higher degree of accuracy in modelling the infiltration process in comparison to the classical models in terms of their predictive ability, due to their ability to fit nonlinear data and the nonlinearity of the inherent soil. Such methods can be implemented to solve the above-mentioned challenges of field measurements and the problem of the physical parameters estimation, especially in precision farming and water resource management.

Keywords: Infiltration rate, Soil properties, Empirical equations, Numerical models, Bulk density.

Journal of Water Resources and Geosciences

Vol. 4, No.2, 2025

مراجعة شاملة وموسعة لعملية ارتشاح الماء في التربة

سراء زاهر ميسر الليلة*، احمد علي محمد العكيدي

جامعة الموصل/ كلية الهندسة/ قسم هندسة السدود والموارد المائي

*البريد الالكتروني للمؤلف المراسل: saraazahr98@gmail.com

الملخص

تشير عملية الارتشاح الى حركة المياه عمودياً داخل التربة بفعل الأمطار، والجريان السطحي، وممارسات الري، وتمثل عنصراً اساسياً في الدورة المائية لما لها من دور مباشر في تحديد كفاءة استخدام المياه وحساب الفواقد. تهدف هذه الدراسة الى التعرف على عملية الارتشاح والعوامل المؤثرة عليها، بالإضافة الى مراجعة النماذج الرياضياتية والعددية المقترحة من قبل الباحثين لإيجاد كل من معدل الارتشاح والارتشاح التراكمي. كما سيتم تسليط الضوء على أبرز تقنيات الذكاء الاصطناعي التي اعتمدت لنمذجة هذه العملية. تبين من خلال هذه المراجعة ان الخصائص الفيزيائية للتربة تعد عامل مهماً في سلوك ارتشاح التربة، إذ ترتبط زيادة نسبة الرمل والمسامية بارتفاع معدلات الارتشاح، في حين يؤدي ارتفاع نسبة الطين او الكثافة الظاهرية او المحتوى الرطوبي الابتدائي الى خفضه. كما اوضحت الدراسات ان نموذج كوستياكوف بمختلف اشكاله، وفيليب، وهورتين كانت الاكثر شيوعاً واستخداماً في توصيف عملية الارتشاح. اما النماذج العددية مثل Hydrus-1D فأظهرت دقة عالية في محاكاة حركة الماء، لكونها تتطلب تحديداً دقيقاً لمعاملات التربة. وفي المقابل، تشير نتائج الدراسات الى ان تقنيات التعلم الآلي مثل (ANN, GEP, M5P, RF, PINN) توفر دقة اعلى في نمذجة عملية الارتشاح مقارنة بالنماذج التقليدية من حيث تفوقها في التنبؤ بفضل قدرتها على التعامل مع البيانات غير الخطية وتعقيد التربة، وتمثل هذه التقنيات اداة فعالة للتغلب على قيود القياسات الحقلية وصعوبة تقدير المعاملات الفيزيائية، خاصة عند تطبيقها في الزراعة الدقيقة وادارة الموارد المائية.

الكلمات المفتاحية: معدل الارتشاح، خصائص التربة، معادلات تجريبية، نماذج عددية، الكثافة الظاهرية.

المقدمة

عندما يتم تسليط الماء على التربة من خلال الامطار المتساقطة او استخدام طرق الري، يتخلل جزءاً منه سطح التربة ويتوزع في الفراغات بين جزيئات التربة (المسامات)، في حين يتم تصريف جزء آخر من منطقة الجذور نحو اعماق التربة بفعل الجاذبية الارضية (Lal & Shukla, 2004). تسمى هذه العملية، اي حركة الماء عمودياً من سطح التربة الى الاسفل، بالارتشاح (Abdul-Rahman et al., 2011). ويعد الارتشاح مكوناً اساسياً في الدورة المائية لما له تأثير على العديد من جوانبها (Liu et al., 2001)، كما يساهم في الربط بين المياه السطحية والجوفية، مما يجعلها عاملاً مهماً في الحفاظ على التوازن البيئي (Xiao D A, 2009).

تعد الادارة الفعالة للمياه ضرورية للسيطرة على عملية الارتشاح، اذ ان التحكم فيها يساعد في مواجهة مشكلات كبرى مثل الفيضانات، وتلوث المياه السطحية والجوفية، وانخفاض منسوب المياه الجوفية، فضلاً عن تحسين كفاءة الري، وتقليل الهدر المائي (Rashidi et al., 2014). تشكل مياه التربة المخزونة في المسام والمتاحة لامتصاص الجذور المصدر الاساسي الذي تعتمد عليه النباتات في نموها وانتاجيتها (Song et al., 2018). يحدث الارتشاح نتيجة لتأثير مشترك بين قوة الجاذبية والقوة الشعرية التي تحفز الارتشاح عمودياً نحو الاسفل (Haghnazari et al., 2015a).

تعد المعرفة الكافية بمعدل ارتشاح التربة امراً ضرورياً للتنبؤ بالمخاطر البيئية المتعلقة بالتربة والماء والتحكم فيها. كما ان التنبؤ بالارتشاح التراكمي يمثل عنصراً هاماً لتقدير كمية المياه الداخلة وتوزيعها في التربة. وتلعب الخصائص الفيزيائية للتربة مثل نسجة التربة (soil texture)، وبناؤها (soil structure)، وكثافتها الظاهرية (bulk density)، ومحتواها الرطوبي (soil moisture) دوراً اساسياً في الكثير من العمليات الزراعية والهيدرولوجية. ويعتبر الارتشاح من بين العمليات الاكثر تأثراً بهذه العوامل، حيث تتحكم هذه الخصائص في معدل الارتشاح، مما يجعلها ذات اهمية كبيرة عند تصميم وتشغيل وادارة الانظمة الهيدروليكية في الري والذي يعتمد بالدرجة الاساس على سلوك ارتشاح التربة، حيث يتم تحديد المتغيرات الاساسية مثل معدل الجريان الداخل، وطول مسار الجريان، وزمن الاضافة، وعمق الارتشاح التراكمي، وجريان المياه الذيلي (tailwater) في انظمة الري(Adeniji et al., 2013). نظراً للتباين الواسع في نسجة التربة، ونوعها، والظروف الاخرى، فان خصائص الارتشاح تختلف من موقع الى اخر (Vand et al., 2018).

تواجه القياسات الحقلية للارتشاح صعوبات لكونها معقدة وتستغرق وقتاً وجهداً كبيرين، مما يجعل التنبؤ بمعدل الارتشاح قبل عملية الري امراً صعباً. لهذا اتجه الباحثون الى تطوير نماذج رياضياتية مبسطة تعتمد على خصائص التربة التي يمكن قياسها بسهولة في المختبر، وربطها بمعدل الارتشاح. ومن اشهر هذه النماذج: نموذج كوستياكوف الاعتيادي والمعدل، ونموذج فيليب (Dagadu & Nimbalkar, 2012;Ekhmaj, 2010).

في السنوات الاخيرة اصبحت خوارزميات التعلم الالي بديلاً فعال للاساليب التقليدية في دراسة العمليات المرتبطة بالتربة والماء. وتمتاز هذا الخوارزميات بقدرتها على تحديد العلاقة بين المتغيرات المؤثرة المدخلة والمتغيرات الناتجة دون الحاجة الى افتراض وجود روابط فيزيائية محددة بينهما (Devia et al., 2015).

على الرغم من تزايد الدراسات التي تناولت عملية ارتشاح الماء في التربة والعوامل المؤثرة عليها اونمذجتها باستخدام الاساليب التقليدية، فان عدداً محدوداً منها منها ركز على تقييم دور خصائص التربة الفيزيائية المؤثرة على الارتشاح اوعلى المقارنة بين النماذج الرياضياتية والعددية. فضلاً عن شح الابحاث التي تطرقت الى تقنيات التعلم الالي في هذا المجال، على الرغم من امكانيتها العالية في تحسين ورفع دقة نمذجة الارتشاح. وعليه، تهدف هذه الدراسة الى التعرف على اهم العوامل المؤثرة في عملية الارتشاح، مع التركيز على الخصائص الفيزيائية للتربة، ومراجعة النماذج الرياضياتية والعددية المقترحة من قبل الباحثين لتقدير معدل الارتشاح. اضافة الى تسليط الضوء على دور تقنيات التعلم الالي في تحسين نمذجة عملية الارتشاح.

يقتصر هذا البحث، كونه مراجعة للأدبيات السابقة، على عرض ومناقشة مجموعة من نماذج الارتشاح الشائعة في المجال الزراعي دون التطرق الى جميع النماذج المطورة او المستخدمة في تقدير الارتشاح، اذ توجد نماذج اخرى قد تكون ملائمة لظروف اوتطبيقات زراعية مختلفة لم يتم تناولها ضمن نطاق هذه المراجعة.

1. العوامل المؤثرة على الارتشاح

يتم تحديد معدل الارتشاح نتيجة لتفاعل عدد من خصائصها الفيزيائية والكيميائية، والتي تختلف باختلاف الموقع وتتغير بمرور الزمن بسبب الممارسات الزراعية (كالحراثة والرص)، إضافة الى إدارة المياه والعمليات البيولوجية مثل نشاط الكائنات الحية الدقيقة (Haghnazari et al., 2015b). وفقاً ل(Rashidi et al., 2014) فقد طورت علاقات خطية متعددة بين معدل ارتشاح وعدد من الخصائص الفيزيائية للتربة شملت المحتوى الرطوبي، ونسبة الغرين والطين، والكثافة الظاهرية، باستخدام بيانات 100 اختبار ارتشاح حقلي. وبالمثل، طور (Patle et al., 2019) علاقات خطية متعددة بين معدل الارتشاح الاساس وبعض الخصائص الفيزيائية، بما في ذلك محتوى الرطوبة، ونسب مكونات التربة من الرمل والغرين والطين، والكثافة الظاهرية والحقيقة، باستخدام بيانات 25 اختباراً حقلياً في انواع مختلفة من الترب (طينية، ورملية، ورملية المزيجية). كما توصل (Girei et al., 2016) الى ان العوامل الاكثر تأثير على الارتشاح هي القوام، والنسجة، والمواد العضوية، والمسامية، والكثافة الظاهرية، والكثافة الحقيقية، فضلاً عن المحتوى الرطوبي.

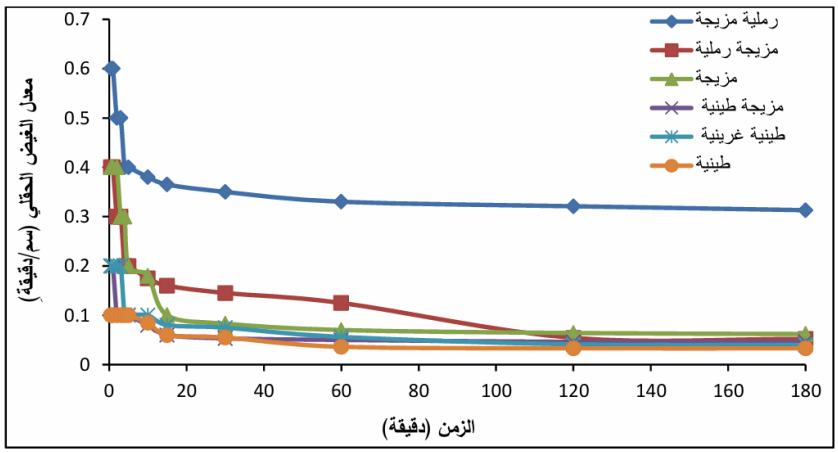
يقدم البحث الحالي ملخصاً لعدد من العوامل المختلفة التي تؤثر على معدل ارتشاح التربة:

1.1. نوع ونسجة التربة

تعد نسجة التربة من الخصائص الفيزيائية الاساسية المؤثرة على معدل ارتشاح الماء (Bajirao & Vishnu, 2023). اذ تختلف قيم معاملات الارتشاح باختلاف نوع التربة (Ieke Wulan Ayu et al., 2013). وتعرف النسجة التربة بأنها النسبة المئوية للطين، والغرين، والرمل، وهي خاصية ثابتة لايمكن تغييرها ولها اثر واضح على عملية الارتشاح (Haghnazari et al., 2015b). كما ان قدرة التربة على الاحتفاظ بالمياه ترتبط بنسجتها وبناءها (Al-Azawi, 1985). إذ يتحرك الماء بسرعة اكبر عبر المسام الكبيرة للتربة الرملية مقارنة بالتربة الطينية التي تتميز بمسام صغيرة، خاصة اذا كانت الاخيرة مرصوصة ولها بنية ضعيفة او معدومة. تعتبر جزيئات الطين مهمة بشكل خاص لان صغر حجمها يجعلها قادرة على ملئ الفراغات بين الجسيمات الاكبر مما

يؤدي الى انخفاض معدل الارتشاح في التربة الطينية. وهذا ما يجعل التربة الطينية لها معدلات ارتشاح بطيئة. تشير المسامية الى النسبة بين المكونات الصلبة الى السائلة في التربة، غير ان العامل الاكثر تأثيراً هو متوسط حجم المسام وتوزيعها واتصالها، حيث يجب ان تكون المسام واسعة ومتصلة لتسمح بمرور الماء بحرية (Iwata et al., 2020). كما اوضحت نتائج (Al-Somaedai et al., 2017) في الشكلين 1 و 2 وجود فروقات في كل من معدل الارتشاح والارتشاح التراكمي بين الترب المدروسة، اذ تفوقت التربة الخشنة النسجة بسبب انخفاض نسبة الطين وكبر حجوم المسامات وبالتالي سهولة حركة المياه.

الشكل 1: العلاقة بين عمق الارتشاح التراكمي والزمن لترب مختلفة النسجة (Al-Somaedai et al., 2017)



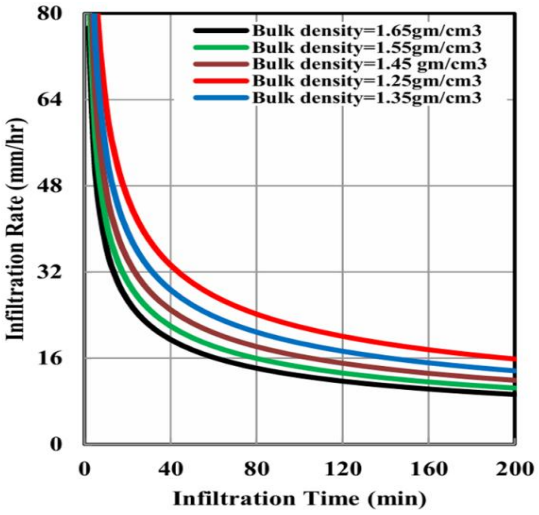
الشكل 2: العلاقة بين معدل الارتشاح والزمن لترب مختلفة النسجة (Al-Somaedai et al., 2017).

2.1. المحتوى الرطوبي الابتدائي

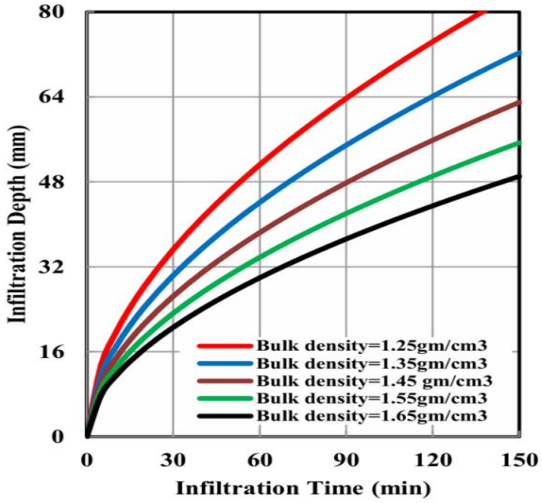
يكون معدل الارتشاح مرتفعاً في المراحل الاولى نتيجة لانخفاض المحتوى الرطوبي الابتدائي للتربة، الامر الذي يسمح للماء بالتخلل بسرعة. ومع مرور الزمن يتناقص معدل الارتشاح تدريجياً بسبب تراجع الشد الشعري داخل التربة، مما يؤدي الى تقليل قدرتها على نقل الماء من المناطق الرطبة الى الجافة. وبالتالي تنخفض سعة الارتشاح وتضعف قدرة التربة على امتصاص كميات اضافية من الماء (Hachum & Yasin, 1992).

3.1. الكثافة الظاهرية

تعد الكثافة الظاهرية من اهم الخصـــائص الفيزيائية المؤثرة على مســـامية التربة، اذ يؤدي اي تغير فيها الى تغير في حجم وترتيب المسام، وبالتالي في عملية الارتشاح (Alegre & Cassel, 1996). غالباً ما تستخدم الكثافة الظاهرية كمؤشـــر على رص التربة، والذي يعتبر مشـــكلة نشـــاط زراعي يجب معالجتها (Warkentin, 1971). وعلى الرغم من أن الرص قد يســـتخدم احياناً للحد من الارتشـــاح العميق في انظمة الري بالمروز، الا أنه غالباً ما يضعف خصائص التربة. فالمرور المتكرر للآلات الزراعية يزيد من الكثافة الظاهرية ويقلل المسامية والحجم الكلي للمســـام ويغير توزيعها (Servadio et al., 2001). كما ان تســـوية الحقول تؤثر بشـــكل واضـــح على بنية التربة، حيث تزيد متوســـط الكثافة الظاهرية بنســـبة 3% في التربة المزيجية الطينية و12% في التربة المزيجية، مع تقليل التباين بفعل مواجهة طبقات تحت ســـطحية اكثر كثافة (Brye, Slaton and; Jabbar & Jasim, 2021 Norman, 2006). وبينت نتائج (Al-Ogaidi et al., 2023) ان زيادة الكثافة الظاهرية للتربة تؤدي الى انخفاض كل من معدل الارتشـــاح وعمق الارتشـــاح التراكمي في التربة الناعمة والخشـــنة، وكما مبين في الشـــكل 3 والشكل 4.



الشـــكل 3: يظهر العلاقة بي معدل الارتشـــاح والزمن عند قيم مختلفة من الكثافة الظاهرية. ويتضـــح ان معدل الارتشـــاح ينخفض بمرور الزمن، كما ينخفض بزيادة الكثافة الظاهرية.



الشـــكل 4: يظهر العلاقة بي عمق الارتشـــاح التراكمي والزمن عند قيم مختلفة من الكثافة الظاهرية. ويلاحظ ان عمق الارتشـــاح التراكمي يزداد بمرور الزمن، كما يزداد مع انخفاض الكثافة الظاهرية.

(Ghazal & Yasin, 2021)

قدم الباحثون العديد من الدراســـات التي تناولت تأثير العوامل المختلفة في عملية الارتشـــاح. هدفت دراســـة (Ma et al., 2016) الى فهم ارتشـــاح المياه في الاراضـــي المســـتصـــلحة او المضـــطربة (disturbed) ذات القوام المختلف، بـالاضـــافة الى اثبات اعتماده على الخصـــائص الفيزيائية للتربة. أظهرت النتائج ان معدل الارتشـــاح والارتشـــاح التراكمي كانا أعلى في الترب الرملية مقارنة بالمزيجية، كما تبين أن الارتشـــاح ينخفض مع زيادة عمق

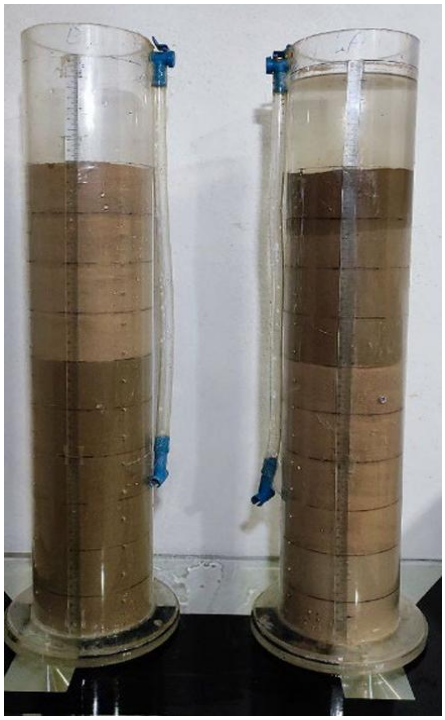
التربة في الأراضي غير المضطربة. من جهة اخرى ركزت الدارسة التي اجراها الباحثون (Khaerudin et al., 2017) على تأثير الكثافة الظاهرية وانحدار السطح على معدل الارتشاح من خلال تجارب حقلية لعينات من التربة ذات خصـــائص مختلفة. اظهرت النتائج ان كل من الانحدار والكثافة الظاهرية هما عاملان رئيســيان يؤثران على معدل الارتشـاح، حيث ينخفض معدل الارتشـاح مع زيادة انحدار السـطح و زيادة الكثافة الظاهرية. اما (Patle et al., 2019) فقد عمل على تقييم العلاقة بين خصـــائص الترب ومعدل الارتشـــاح في ارض زراعية، حيث تم تحديد 25 نقطة عند فاصل شبكة يبلغ 10 امتار، واجريت القياسات باستخدام طريقة مقياس الارتشاح مزدوج الحلقة. تشير نتائج تحليل التربة الى ان الترب الســائدة هي مزيجية رملية ورملية مزيجية، وان الكثافة الظاهرية والكثافة الحقيقية قد تراوحت بين 1.412-1.716 غم/سم^3 و2-3.03 غم/سم^3 على التوالي. كما تراوح معدل الارتشـاح الاسـاس من 3-68 ملم/سـاعة، وبين التحليل ان نسـبة الرمل، والكثافة الحقيقة، ومحتوى الكربون العضـوي لها علاقة طردية مع معدل الارتشاح، في حين ان نسبة الغرين والطين، والكثافة الظاهرية، والمحتوى الرطوبي لها علاقة عكسية.

أجرى (Ghazal & Yasin, 2021) دراسة تحليلية للعلاقة بين خصائص التربة المختلفة وعملية الارتشاح. وقد ركزت الدراســـة على تحديد تأثير عوامل مثل نســـبة الرمل، والغرين، والطين، والكثافة الظاهرية، والمحتوى الرطوبي ألابتدائي على عمق الارتشـاح التراكمي ومعدل الارتشـاح. شـملت بيانات 31 تجربة ارتشـاح مختبرية، وتضـــمنت 516 قياس لعمق وزمن الارتشـــاح لمدى واســـع من انواع الترب والمحتويات الرطوبية وقيم الكثافة الظاهرية. اظهرت نتائج الدراسة ان الخصائص الفيزيائية للتربة تؤثر بشكل كبير على عملية الارتشاح حيث لوحظ ان زيادة نســـبة الرمل تؤدي الى زيادة معدل الارتشـــاح، بينما يقل معدل الارتشـــاح مع زيادة المحتوى الرطوبي الابتدائي والكثافة الظاهرية للتربة. طور (E. Al-Esawi et al., 2021) تقنية جديدة للحد من معدل الارتشـــاح للمياه عبر أسطح التربة الطينية والرملية المزيجية، وذلك بأستخدام عملية الرص والمعالجة بزيت النخيل. تم تقسيم التجربة الى مجموعات فردية وفقاً لعدد مرات الضغط وكمية زيت النخيل المستخدمة. تم قياس معدل ارتشاح المياه، وكثافة التربة، ومحتوى الرطوبة، ومقاومة الاختراق. تبين ان كل من الطريقتين تزيدان الكثافة الظاهرية وتقللان معدل الارتشاح، مع ملاحظة ان تأثير الرص كان اكبر من مقارنة بالمعاملة بزيت النخيل.

كما درس (Cleophas et al., 2022) تأثير الخصـائص الفيزيائية للتربة على الارتشاح في غابات مقطوعة الاشـــجار، من خلال قياس معدل الارتشـــاح في عدة نقاط مختلفة في المنطقة. وتشـــير نتائج تحليل التربة الى ان معظمها من القوام المزيجي وان الكثافة الظاهرية تتراوح من 0.74 الى 1.02 غم/ســـم^3 على التوالي. تراوح معدل الارتشـاح الاساس من 0.61 الى 45.22 ملم/ساعة بمتوسط 3.81 ملم/ساعة. اظهرت نتائج تحليل الانحدار البسيط وجود ارتباط ضـئيل بين الخصـــائص الفيزيائية للتربة ومعدل الارتشـــاح. مما يشـير الى ان التباين الكبير في معدل الارتشاح في موقع الدراسة هذا يعزى الى التباين المكاني العالي لخصائص التربة.

بحسـب (Al-Ogaidi et al., 2023) تم اجراء 10 تجارب مختبرية لدراسـة تأثير تغير الكثافة الظاهرية لتربة طباقية مكونة من طبقتين. ولإجراء التجارب المختبرية، تم اعداد اسـطوانتين شـفافتين ومتماثلتين بقطر داخلي يبلغ 11 ســم وارتفاع 63 ســم، وكما موضــح في الشــكل 5. تم تنفيذ التجارب بتعاقبات مختلفة، ثم اشــتقاق علاقة تجريبية لعمق الارتشـاح التراكمي وعمق جبهة الابتلال بدلالة كل من الزمن ومعدل الارتشـاح الاسـاس للتربة. بينت

النتائج ان هنالك توافقاً عالياً بين القيم المقاسة مختبرياً وتلك المخمنة من المعادلات التجريبية المقترحة لكل من عمق الارتشـاح وعمق جبهة الابتلال وبمعامل تحديد مقداره 0.96 و0.98 على التوالي. كما تبين ان الارتشـاح يزداد مع الزمن وينخفض بزيادة الكثافة الظاهرية للتربة بغض النظر عن موقعها في الطبقة العليا ام السـفلى ضـمن التربة الطباقية. كما تبين ان معدل الارتشاح يتأثر بكثافة الطبقة العليا اكثر من تأثره بكثافة الطبقة السفلى.



الشكل 5: الاسطوانات الشفافة المستخدمة في التجارب المختبرية (Al-Ogaidi et al., 2023).

تناول (Berdouki et al., 2024) دراسـة تأثير نسـجة التربة وتطبقها على عملية الارتشـاح. اجريت التجربة باسـتخدام حاويات تربة ذات ابعاد محددة ملئت بانوع مختلفة من التربة (رملية، وطينية، وخليط منهما). تم تسليط شحنات مختلفة للماء فوق سطح التربة، و قياس معدل الارتشاح في كل حالة. اظهرت النتائج ان نوع التربة وتطبقها يؤثران بشكل كبير على معدل الارتشـاح. حيث زاد معدل الارتشـاح عند الحد الفاصـل بين الطبقتين عندما كانت الطبقة السـفلية طينية بسـبب قدرتها على امتصـاص الماء بشـكل اكبر. كما لوحظ ازدياد معدل الارتشـاح مع زيادة ارتفاع مسـتوى الماء فوق سـطح التربة، وكان هذا التأثير اكثر وضـوحاً عند الانتقال من ارتفاع 7سـم الى 10سم. اما (Dong et al., 2019) فقد اشار الى ان سعة ارتشاح التربة تتناقص مع زيادة الكثافة الظاهرية للتربة، حيث تم تحديد علاقة عكسية لوغارتمية بين معدل الارتشـاح الاساس والكثافة الظاهرية (R^2 <95%). علاوة على ذلك فانه كلما زادت الكثافة الظاهرية انخفض الارتشـاح التراكمي، وهناك علاقة عكسـية خطية واضـحة بين معدل الارتشاح والكثافة الظاهرية.

2. معادلات ونماذج الارتشاح

1.2 النماذج الرياضياتية

ادت اهمية المتزايدة لعملية الارتشاح على مر السنين الى تطوير العديد من النماذج التحليلية المبسطة بهدف تحسين القدرة على التنبؤ بمعدلاته. وتستخدم هذه النماذج لتقدير معدلات الارتشاح لمختلف انواع التربة وتحت ظروف متنوعة لاستخدام الاراضي، مما يساهم بتحديد معدل ارتشاح التربة دون الحاجة الى القياسات الحقلية المباشرة. وتعتمد عملية التقدير بشكل عام على العلاقة الزمنية لمعدل الارتشاح المقاس لتربة معينة (Dagadu & Nimbalkar, 2012). على الرغم من تعدد النماذج التجريبية والفيزيائية المطورة عبر السنوات، الا ان الاستخدام العملي للعديد منها محدود بسبب صعوبة تحديد المعاملات، والتي بدورها تتأثر بالعوامل السطحية وداخل التربة (Gebul, 2022). تصف العديد من النماذج الرياضية الارتشاح والعوامل التي تؤثر عليه، وبحسب (Bayabil et al., 2019) تصنف هذه النماذج الى ثلاث فئات رئيسية وكما موضح في الجدول 1.

الجدول1: يبين الفئات الرئيسية للنماذج الرياضياتية.

النماذج	بعض الامثلة عليها
نماذج فيزيائية	○ نموذج جرين-آمبت ○ نموذج فيليب
نماذج شبه تجريبية	○ نموذج هولتن
نماذج تجريبية	○ نموذج كوستياكوف ○ نموذج كوستياكوف المعدل ○ نموذج كوستياكوف المعدل المنقح ○ نموذج هورتين ○ خدمة الحفاظ على التربة SCS

1.1.2. النماذج الفيزيائية: تستند هذه النماذج الى مبادى الفيزياء، مثل قانون حفظ الكتلة وقانون دارسي لوصف حركة الماء في التربة. يعتبر نموذج ريتشارد من النماذج الاكثر شيوعاً والذي يعتمد على المعادلة التفاضلية الجزئية لوصف عملية ارتشاح الماء في التربة بشكل دقيق، مع الاخذ في الاعتبار عوامل مثل الايصالية الهيدروليكية والمحتوى الرطوبي بالاضافة الى الظروف الاولية والحدية. غير ان تطبيقه العملي يواجه تحديات كبيرة نظراً لكثرة المعاملات المطلوب تحديدها وقياسها بدقة، كما ان حل المعادلة التفاضلية لنموذج ريتشارد بشكل تحليلي امر معقد للغاية، مما يستدعي استخدام طرق حل عددية (Lei et al., 2020;Richards, 1931).

1. نموذج جرين-آمبت (Green & Ampt, 1911)

تم تقديم هذا النموذج في بداية القرن العشرين كأحد اقدم النماذج التي تسعى لفهم عملية الارتشاح. يستند الى قانون دارسي، الذي يربط بين سرعة حركة الماء في التربة وتدرج الجهد الهيدروليكي، اي الفرق في ارتفاع سطح الماء بين نقطتين. يشبه النموذج حركة الماء في التربة بحركة السائل في مجموعة من الانابيب الشعرية الدقيقة، حيث يتحرك الماء ككتلة واحدة متجانسة دون تشتت. ومن اهم فرضياته ان تكون التربة متجانسة وان الرطوبة الابتدائية موزعة بشكل متساوٍ في التربة قبل بدء عملية الارتشاح. كما يفترض ان سطح التربة مشبع بالماء، اي ان هناك طبقة رقيقة من الماء تغطي سطح التربة. ويتمثل هذا النموذج بالصيغة الاتية:

$$D = \frac{m}{I - c} \quad \ldots\ldots (1)$$

حيث ان D= العمق التراكمي للارتشاح (ملم)، وI= معدل الارتشاح (ملم/ دقيقة)، وc,m= ثوابت حيث ان c الايصالية الهيدروليكية المشبعة (ملم/ دقيقة) وm هي حاصل ضرب الايصالية الهيدروليكية المشبعة والشد الشعري.

يقتصر نموذج جرين-آمبت على محاكاة عملية الارتشاح في الترب العميقة والمتجانسة، لذلك يعد تطبيق هذا النموذج على الترب غير المتجانسة او التي تحتوي على الطبقات متعددة غير دقيق، كما لا يستطيع نموذج جرين-آمبت وصف جريان الماء في المسامات الكبيرة التي تحدث في بعض انواع الترب (La Follette et al., 2023).

2. نموذج فيليب (Philip, 1957)

اشتُق هذا النموذج استناداً الى معادلة ريتشارد (Richards, 1931)، باستخدام حل شبه تحليلي، اعتمد فيليب في هذا الحل على تقريب معادلة ريتشادر بإهمال بعض الحدود العليا، مما ادى الى صياغة معادلة اكثر بساطة لوصف الارتشاح. وتتميز معادلة فيليب بكونها تحتوي على ثابتين لهما دلالات فيزيائية. يعتمد هذا النموذج كذلك على استخدام سلسلة زمنية لوصف تغير المحتوى الرطوبي في التربة بمرور الزمن، مما يتيح وصفاً دقيقاً لعملية الارتشاح، خاصة في المراحل الاولى.

$$D = At^{0.5} + Ft \quad \ldots\ldots (2)$$

حيث ان D= العمق التراكمي للارتشاح (ملم)، وt= الزمن(دقيقة)، وA,F= ثوابت، حيث ان A يمثل الامتصاصية وF هو معامل النفاذية الذي يعتمد على خصائص التربة والمحتوى الرطوبي الابتدائي والمشبع. قد تكون موثوقية نموذج فيليب محدودة في التطبيقات العلمية، نظراً لعدم مراعاته الظروف الفعلية لسطح التربة اثناء اشتقاق المعادلة، كما يصبح النموذج غير دقيق مع مرور الزمن وخاصةً في المراحل المتاخرة من عملية الارتشاح (Vrugt et al., 2024).

2.1.2. النماذج شبه التجريبية: تعتمد هذه النماذج على المبادى الاساسية في الهيدرولجيا، حيث تستند الى فرضيات مبسطة حول معدل الارتشاح وعلاقته بالارتشاح التراكمي. تستخدم هذه النماذج اشكالاً مبسطة من معادلة

الاستمرارية، كما تعتمد على نهج النظم (systems approach) وهو نهج شائع الاستخدام في هيدرولوجيا المياه السطحية لتحليل وتفسير سلوك ارتشاح المياه في التربة (NRCS, 2004).

1. نموذج هولتن (Holtan, 1961)

يعد نموذج هولتين من النماذج شبه التجريبية التي طورت لوصف سلوك ارتشاح الماء في التربة، صيغة العامة لهذا النموذج هي كما موضح ادناه:

$$D = S_0 - (I - P)^{\frac{1}{m}} \quad \ldots\ldots (3)$$

اذ ان I= معدل الارتشاح (ملم/ دقيقة)، وP= معدل الارتشاح الاساس (ملم/ دقيقة)، وc,m= ثوابت تحدد تأثير نوع التربة وظروف الطبقة السطحية، وD= عمق الارتشاح التراكمي (ملم)، وS_0= السعة الابتدائية لتخزين المياه في التربة والذي يحسب من الفرق بين المسامية الكلية والمحتوى الرطوبي الابتدائي مضروباً في عمق تربة محدد (ملم). عند وجود تباين مكاني كبير، يجب دمج النموذج مع اساليب احصائية للحصول على نتائج اكثر واقعية، مما يزيد من تعقيد تطبيقه. فضلاً عن ذلك، فإن تكون القشور السطحية بفعل مياه الامطار او الرذاذ الناتج عن الري بالرش يقلل من نفاذية التربة، ويؤدي الى انخفاض معدل دخول الماء اليها، وبالتالي تتناقص دقة نموذج هولتن بمرور الزمن (De Roo & Riezebos, 1992).

3.1.2 النماذج التجريبية: تستند هذه النماذج بشكل اساسي على البيانات الحقلية والتجارب المختبرية. يتم اشتقاق هذه النماذج من خلال قياسات حقلية مباشرة للارتشاح التراكمي كدالة للزمن. عادة ما تكون هذه النماذج بسيطة في شكلها الرياضياتي، ويتم تحديد معاملاتها عن طريق مقارنة المعادلة النموذجية بالبيانات الحقلية الفعلية. توفر هذه النماذج تقديرات جيدة لمعدلات الارتشاح والارتشاح التراكمي، ولكنها لا تقدم معلومات تفصيلية حول توزيع الرطوبة داخل التربة. ومن المهم ملاحظة ان معظم هذه النماذج تفترض وجود كمية ثابتة من الماء متاحة على سطح التربة طوال فترة التجربة، وهذا يعتبر احد القيود الاساسية لهذه النماذج (Ghorbani Dashtaki et al., 2009; Gebul, 2022).

1. نموذج كوستياكوف (Kostiakov, 1932)

إن إحدى أبسط وأكثر المعادلات شيوعا المستخدمة لتمثيل عمق الارتشاح التراكمي مع الزمن والتي يعتمدها العديد من الباحثين مثل (Patle et al., 2021) هي معادلة كوستاكوف الاعتيادية، حيث تأخذ شكل قوة في معادلة جبرية تربط عمق الارتشاح التراكمي، بشكل صريح بزمن الارتشاح (Fok, 1986). والتي يتم تمثيلها بالصيغة التالية:

$$D = ct^m \quad \ldots\ldots (4)$$

حيث ان D= عمق الارتشاح التراكمي (ملم)، وt= زمن الارتشاح (دقيقة)، وc,m= ثوابت وضعية

عند الاشتقاق بالنسبة للزمن، يتم الحصول على معادلة تمثل معدل الارتشاح على النحو التالي:

$$I = Kt^n \quad \ldots\ldots (5)$$

حيث ان I= معدل الارتشاح (ملم/ دقيقة)، و k,n= ثوابت دالة معدل الارتشاح حيث ان k=cm و n=(m-1) (Hachum & Yasin, 1992)

العيب الرئيسي لهذه المعادلة انها تتنبأ بانخفاض معدل الارتشاح الى الصفر عند القيم الكبيرة للزمن (Gebul, 2022). وللتغلب على هذه المشكلة، اقترح (Mezencev, 1948) تعديلاً على هذا النموذج.

2. نموذج كوستياكوف المعدل (Mezencev, 1948)

لا ينخفض معدل الارتشاح في الواقع الى الصفر مع مرور الزمن، بل يستقر عند قيمة ثابتة موجبة تعرف بمعدل الارتشاح الاساس. وعليه تم تعديل معادلة كوستياكوف الاعتيادية من خلال اضافة ثابت يمثل معدل الارتشاح الاساس، مما ادى الى تطوير نموذج يعرف بمعادلة كوستياكوف المعدلة. ويشار الى هذا ايضا باسم نموذج كوستاكوف-لويس (Gebul, 2022).

$$D = ft^m + Pt \quad \ldots\ldots (6)$$

حيث ان P= معدل الارتشاح الاساس (ملم/ دقيقة)، و f,m= ثوابت وضعية.

ومن خلال اشتقاق المعادلة بالنسبة للزمن يمكن الحصول على معادلة تمثل معدل الارتشاح:

$$I = kt^n + P \quad \ldots\ldots (7)$$

k,n= ثوابت دالة معدل الارتشاح حيث ان k=f,m و n=(m-1)

3. نموذج كوستياكوف المعدل المنقح (Parhi et al., 2007)

اجرى (Parhi et al., 2007) مراجعة لنموذج كوستياكوف المعدل، وتمكن من تطوير نموذج جديد يعتمد على اربعة معاملات، كما موضح ادناه:

$$I = \alpha_1 t^{\beta_1} + \alpha_2 t^{-\beta_2} \quad \ldots\ldots (8)$$

$\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2$= ثوابت وضعية

4. نموذج هورتين (Horton, 1940)

قدم هورتين نموذجاً لوصف تغير معدل الارتشاح بمرور الزمن. يفترض هذا النموذج ان الانخفاض في معدل الارتشاح مع الزمن يتناسب طردياً مع قيمة معدل الارتشاح نفسه. تمثل معادلة هورتين معدل الارتشاح على شكل دالة تتضمن معاملات محددة. لا يتنبأ هذا النموذج بوصول معدل الارتشاح الى الصفر كما هو الحال في نموذج كوستياكوف الاعتيادية عندما يصبح الزمن لانهائي بل يقترب من قيمة ثابتة. والصيغة الى قدمها هورتين موضحة ادناه:

$$I = i_f + (i_0 - i_f) * e^{-\beta t} \quad \ldots\ldots (9)$$

حيث ان i_0= معدل الارتشاح الاولي (ملم/ دقيقة)، وi_f= معدل الارتشاح النهائي/الاساس (ملم/ دقيقة)، وβ =ثابت الانحسار، يتحكم في معدل الانخفاض في سعة الارتشاح. الا ان نموذج هورتين يواجه قصوراً في تمثيل التعقيدات الفعلية لسطح التربة، وبالتالي لايعكس جميع العوامل المؤثرة على سعة الارتشاح، مثل التباين المكاني والزماني وتغيرات البنية السطحية للتربة (Beven, 2004).

5. خدمة الحفاظ على التربة SCS (Jury, W.A., Gardner, W.R., and Gardner, 1991)

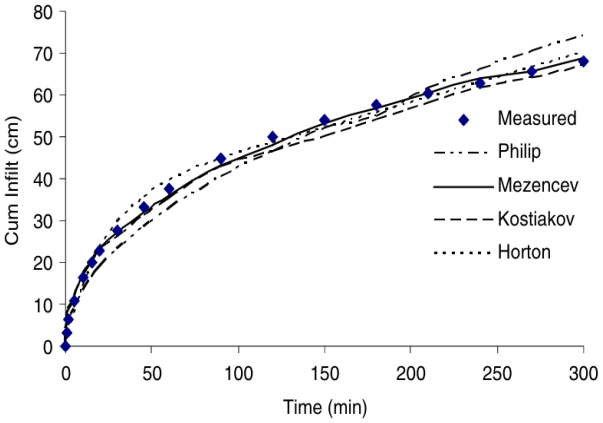
هو نموذج تم تطويره تجريبياً لعملية الارتشاح وصيغته هي كما موضح ادناه:

$$I = ct^m + 0.6985 \ldots\ldots (10)$$

m,c= ثوابت وضعية

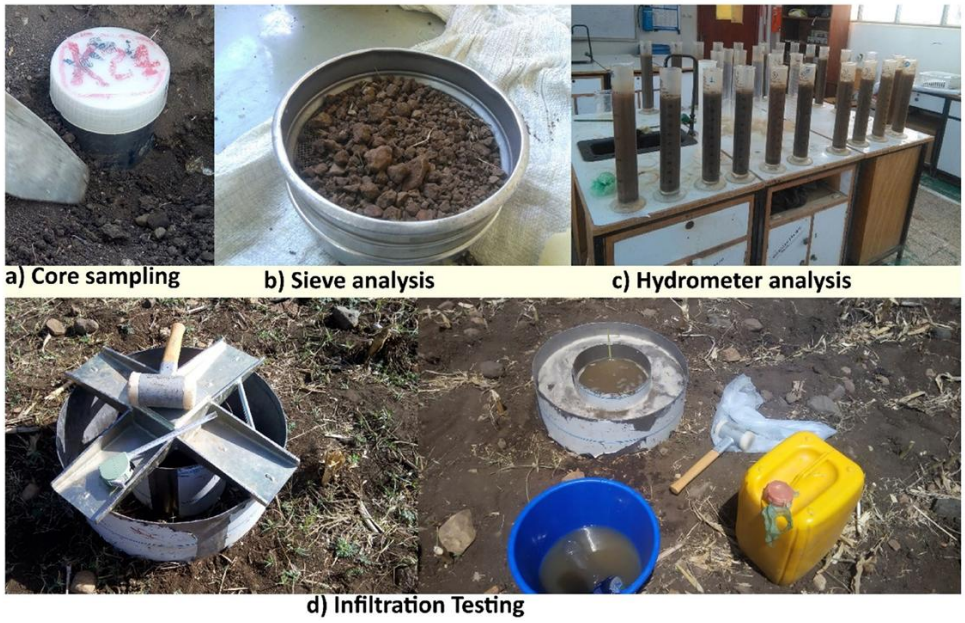
بحسب (Ma et al., 2016) كانت قيمة الامتصاصية من معادلة فيليب، والمعامل التجريبي من معادلة كوستياكوف، والايصالية الهيدروليكية المشبعة من معادلة جرين-آمبت اعلى بنسبة 22% و16% و7.1% على التوالي في التربة الرملية مقارنة بالتربة المزيجية، كما حصلت زيادة فيه بشكل ملحوظ مع الايصالية الهيدروليكية المشبعة في كل من التربة الرملية والمزيجية. اشار هذا الى انه يمكن استخدام معادلة جرين-آمبت لوصف خصائص ارتشاح التربة على الاراضي المضطربة. استخدم الباحثون (Khaerudin et al., 2017) نماذج رياضياتية مختلفة، مثل هورتين وكوستياكوف لتقدير معدل الارتشاح. اظهرت نتائج هاتين الصيغتين ارتباطاً ايجابياً قوياً، مما يبرر استخدامها لتقدير معدل الارتشاح بدقة مقبولة. وبالمثل اثبتت دراسة (Ghazal & Yasin, 2021) ان نموذج كوستياكوف فعال في تقدير عمق الارتشاح التراكمي ومعدل الارتشاح الاساس. حيث حقق معامل تحديد مرتفع بلغ 0.975.

نظراً لصعوبة تحديد التباين لعملية الارتشاح وهو امر ذو اهمية كبيرة للزراعة الدقيقة، فكان الهدف من الدراسة التي قدمها (Machiwal et al., 2006) هو نمذجة الارتشاح والتباين المكاني لخصائص الارتشاح في ارض قاحلة في الهند. تم اجراء 24 اختبار ارتشاح على نمط شبكي مربع منتظم في منطقة الدراسة باستخدام مقاييس الارتشاح مزدوج الحلقة. تم نمذجة بيانات الارتشاح المرصودة من جميع مواقع الاختبار وفق اربعة نماذج ارتشاح مختارة، وتم تحديد النموذج الأنسب لكل موقع. تشير خصائص الارتشاح في المنطقة بشكل عام الى انخفاض معدلات الارتشاح الاساسية لمعظم المواقع. تبين ان نموذج فيليب المكون من حدين هو افضل نموذج لوصف عملية الارتشاح في معظم مواقع الاختبار. اظهرت معاملات هذا النموذج (اي الامتصاصية S ومعامل النفاذية A) تبايناً واسعا بين مواقع الاختبار. بدوره عمل (Ghorbani Dashtaki et al., 2009) على تقييم اداءاربعة نماذج شائعة: كوستياكوف، وكوستياكوف المعدلة، وهورتين، وفيليب لمواقع دراسة مختلفة. باستخدام بيانات ارتشاح لـ 123 موقعاً حيث تم تقييم اداء هذه النماذج لمجموعات مختلفة من نسجات التربة. اشارت النتائج الى ان اداء النماذج كوستياكوف وهورتين وفيليب كان مرتبطاً ارتباطاً وثيقاً بظروف الموقع، في حين تميز نموذج كوستياكوف المعدل بستقرار ادائه بغض النظر عن المواقع، اذ يظهر الشكل 6 مقارنة بين منحني الارتشاح المقاس والمنحني الملائم لأحد عينات التربة، ويتضح ان نموذج كوستياكوف المعدل (Mezencev) حقق الاداء الافضل.



الشكل 6: مقارنة بين منحني الارتشاح المقاس والمنحنيات المخمنة من النماذج المستخدمة (G. T. Patle et al., 2019b).

تهدف الدراسة التي اجراها (Dahak et al., 2022) الى تقييم اداء النماذج الثلاثة الاكثر استخداماً (هورتين، وكوستياكوف، وفيليب) في تقدير معدلات الارتشاح في منطقة شبه قاحلة وباستخدام بيانات حقلية، وتمت المقارنة احصائياً عبر معايير احصائية مختلفة، مثل معامل ناش-ساتكليف (NSE) ومعامل الانحدار (R^2). اظهرت النتائج ان نموذج هورتين تفوق في معظم الحالات الخاصة عند مراعاة تأثير الرطوبة الابتدائية. كما هدفت الدراسة التي قدمها (Mesele et al., 2024) هي تقييم ومقارنة نماذج الارتشاح المختلفة لتقدير معدل الارتشاح في نظام ري شمال اثيوبيا. تم جمع عينات التربة وتحليل نسجتها باستخدام الهيدروميتر كما موضح في الشكل 7، مع تصنيفها وفقاً لمثلث النسجة المعد من USDA. تم قياس معدل الارتشاح حقلياً باستخدام مقياس الارتشاح مزدوج الحلقة لخمس نسجات مختلفة (مزيجية طينية، ومزيجية، وطينية رملية مزيجية، وطينية، ومزيجية رملية). ومن ثم تقييم اداء ستة نماذج للارتشاح (كوستياكوف، وكوستياكوف المعدلة، وكوستياكوف المعدلة المنقحة، وفيليب، وهورتين، ونوفيل) باستخدام معايير احصائية مع التحقق من دقة التنبؤات باستخدام بيانات مأخوذة من 38 نقطة داخل منطقة الدراسة. قسمت البيانات الى 70% استخدمت لمعايرة معاملات النماذج، و30% استخدمت للتحقق من صحة التقديرات. اظهرت نتائج الدراسة ان قدرة النماذج على التنبؤ بمعدل الارتشاح تختلف باختلاف نسجة التربة، اذ تفوق كوستياكوف المعدل والمنقح في التربة المزيجية الطينية، بينما نموذج كوستياكوف المعدل قدم تقديرات دقيقة للتربة المزيجية، وكان نموذج نوفيل الاكثر دقة في التربة المزيجية الطينية. في المقابل تفوق نموذج هورتين على جميع النماذج الاخرى لكل من التربتين المزيجية الرملية والطينية.



الشكل 7: اختبارات التربة والارتشاح (Mesele et al., 2024).

بحسب مراجعة (Mithra et al., 2022) حول تقييم نماذج الارتشاح الاكثر شيوعاً من بينها (كوستياكوف، وهورتين، وفيليب، وجرين-آمبت، وكوستياكوف المعدلة) حيث استخدمها عدد كبير من الباحثين في تقدير معدل الارتشاح. اظهرت نتائج الدراسات ان نموذجي كوستياكوف وهورتين كانا الاكثر كفاءة في تقدير معدل الارتشاح. وأخيراً، قيم (Mirzaee et al., 2014) كفاءة مجموعة من نماذج الارتشاح المختلفة (جرين-آمبت، وفيليب، وخدمة الحفاظ على التربة (SCS)، وكوستياكوف، وهورتين، وكوستياكوف المعدلة، وكوستياكوف المعدلة المنقحة). طريقة المربعات الصغرى، وللمقارنة بين اداء النماذج تم اعتماد ستة معايير احصائية (معامل التحديد (R^2)، ومتوسط جذر متوسط مربع الخطأ (MRMSE)، وجذر متوسط مربع الخطأ (RMSE)، واحصائية F ،واحصائية CP ،ومعيار AIC). اثبت نموذج كوستياكوف المعدل المنقح، الذي يتضمن اربعة معاملات انه الاكثر كفاءة في تقدير معدلات الارتشاح لمختلف انواع الترب المدروسة. حيث تفوق في التربة المزيجية، والمزيجية الطينية، والمزيجية الطينية الغرينية، في حين ان نموذج كوستياكوف المعدل كان الاكثر دقة للتربة المزيجية الغرينية.

2.2. النماذج العددية

على عكس النماذج شبه التجريبية والتجريبية التي لا يمكنها تقديم معلومات مفصلة عن عملية الارتشاح ومعناها الفيزيائي ليس قوياً، توفر النماذج الفيزيائية توصيفاً أكثر شمولاً لعملية الارتشاح. تعد معادلة ريتشارد من اكثر هذه النماذج استخداماً. فقد تم اشتقاقها بالاعتماد على قانون حفظ الكتلة وقانون دارسي، وتعد نموذجاً عددياً قائماً على الفيزياء، ويمكن توسيعه ليشمل من الظروف المعقدة. وبالتالي تم استخدام الطرق العددية مثل الفروق المحددة (Finite Differences) والعناصر المحددة (Finite Elements) لحلها. يتطلب الحل العددي لمعادلة ريتشارد اعتماد تقنية ضمنية تكرارية مع تقسيم مكاني دقيق، مما يؤدي الى عملية حل شاقة ومعقدة (Rao et al., 2006).

يعد نموذج Hydrus-1D هو برنامج حاسوبي يستخدم لحل معادلة ريتشارد احادية البعد، يعتمد على طريقة العناصر المحددة ويتميز بقدرته على محاكاة حركة الماء، وانتقال الحرارة، وحركة المذابات في الأوساط المسامية تحت ظروف مختلفة من التشبع (Simunek et al., 2005). مع الاخذ في عين الاعتبار كل من المحتوى الرطوب الحجمي للتربة، وشحنة ضغط الماء، والايصالية الهيدروليكية للتربة غبر المشبعة. تم وصف معادلة حركة الماء الاساسية على النحو التالي:

$$\frac{\partial\theta(h,t)}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left[k(h)\left(\frac{\partial h}{\partial x}+1\right)\right] \quad \ldots\ldots(11)$$

حيث ان h= شحنة ضغط الماء (ملم)، و θ= محتوى الرطوبي الحجمي للتربة، وt= الزمن (دقيقة)، وx= المسافة العمودية من سطح التربة (ملم)، و(K (h= هي الايصالية الهيدروليكية غير المشبعة للتربة (ملم/دقيقة). يتم تقديرها من المعادلة:

$$k(h)=\frac{k_s(1-(\alpha h)^{n-1}[1+(\alpha h)^n]^{-m})^2}{[1+(\alpha h)^n]^{ml}} \quad \ldots\ldots(12)$$

k_s= الايصالية الهيدروليكية المشبعة للتربة (ملم/دقيقة)، وn,m,l,α= ثوابت وضعية.

ولايجاد θ_r

$$\theta=\theta_r+\frac{\theta_s-\theta_r}{(1+(\alpha h)^n)^{m^2}} \quad \ldots\ldots(13)$$

θ_s= الرطوبة المشبعة، وθ_r= الرطوبة المتبقية.

استخدم (Robin and Bora, 2019) برنامج المحاكاة Hydrus-1D لاختبار المعادلة الجبرية التي طورها لتحسين دقة معادلة كوستياكوف على نوعين مختلفين من الترب. تشير النتائج الى ان هذه المنهجية الجديدة تساهم في تحسين دقة تقدير معدل الارتشاح. وفقاً لـ (Mohammed et al., 2021) اجريت تجارب مختبرية لدراسة الارتشاح وجبهة الترطيب تحت طبقات مختلفة السمك من التربة. شملت الدراسة ترب شمال العراق (تربة مزيجية رملية، ومزيجية غرينية، ورملية مزيجية) بطبقات مختلفة السمك وبتعاقبات مختلفة، اي الطبقة ذات النسجة الناعمة فوق الطبقة ذات النسجة الخشنة والعكس. كان الهدف هو تحليل وتقييم اداء النموذج العددي Hydrus-1D القائم على معادلة ريتشارد لمحاكاة سلسلة من عمليات الارتشاح والارتشاح التراكمي وتقدم جبهة الابتلال. استخدم معامل التحديد وجذر متوسط الخطأ التربيعي لاظهار درجة الدقة في التنبؤ بين البيانات المرصودة والمحاكاة. اظهرت النتائج تأثر الارتشاح التراكمي وتقدم جبهة الابتلال بترتيب وسمك طبقات التربة. لوحظ ان الفاصل بين الطبقات في كلتا الحالتين يتميز بسمة مشتركة تتمثل في الحد من حركة المياه الى الاسفل، كما ان الطبقة الناعمة تتحكم في عملية الارتشاح بغض النظر عن ترتيبها. قدم Hydrus-1D نتائج محاكاة دقيقة للارتشاح التراكمي وعمق جبهة الابتلال، وقد لوحظ انخفاض في قيم معامل التحديد وجذر متوسط مربع الخطأ مع زيادة عمق الطبقة العليا من 5 الى 20 سم. يشير هذا الى ان Hydrus-1D كان قادراً على محاكاة عمليات الارتشاح المختلفة بدقة في

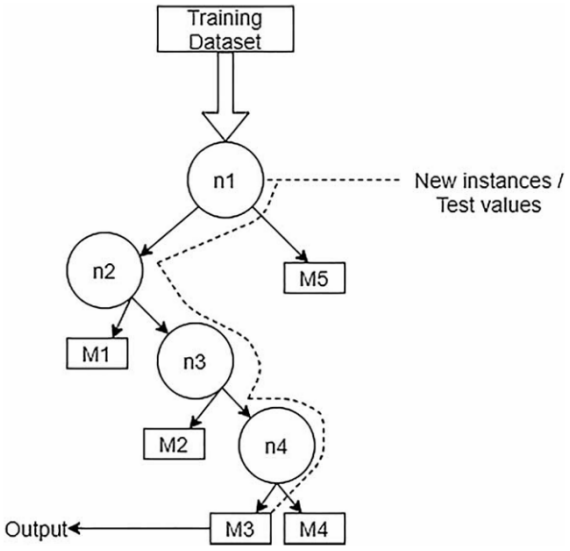
التربة ذات الطبقات المتعددة. قارن (Berdouki et al., 2024) اداء نماذج الارتشاح (هورتين، وكوستياكوف، وفيليب، وجرين-آمبت الاعتيادية والمعدلة، ونموذج Hydrus-1D) في تقدير معدل الارتشاح في التربة المتجانسة والطباقية. كان نموذج جرين-آمبت المعدل هو الافضل في تقدير معدل الارتشاح لحالتي التربة المتجانسة والطباقية، اما نموذج هورتين كان الاقل دقة، خاصة في التربة المتجانسة. اما نموذج Hydrus-1D اظهر اداء جيد في التربة المجانسة ولكنه كان اقل دقة في التربة الطباقية.

يواجه نموذج Hydrus-1D بعض التحديات في محاكاة عملية الارتشاح، اذ يعتمد بشكل اساسي على ان معادلة Genuchten (Van) تمثل بدقة الخصائص الهيدروليكية للتربة، الا ان وجود اعماق ضحلة (10-20 سم)، يقلل من دقة المحاكاة نظراً لان هذه الاعماق لا تعكس تمثيلاً كاملاً لبنية وخواص التربة. كما ان موثوقية النتائج ترتبط بدرجة كبيرة على تحديد معاملات حساسة مثل θs و Ks خاصةً في الاعماق الكبيرة، اذ تتحكم الجاذبية بشكل رئيسي في عملية الارتشاح (X. Wang et al., 2025).

3.2. تقنيات التعلم الآلي في نمذجة الارتشاح

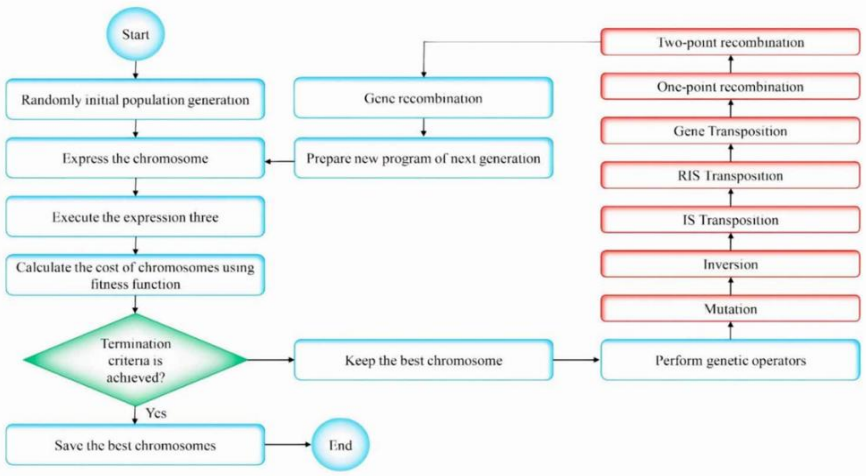
تم على مر السنين تطوير العديد من نماذج الارتشاح التي تعتمد اما على اسس فيزيائية أو مفاهيمية أو تجريبية. الا ان تطبيق اي من هذه النماذج يرتبط دائماً بسياقه من حيث نوع الموقع، وطبيعة التربة، ومدى توافر البيانات (Sy, 2006). وبما ان قياس خصائص الارتشاح عملية معقدة وتستغرق وقتاً طويلاً، وهذا يزيد يشكل تحدياً كبيراً لباحثي الموارد المائية والزراعة. فقد برزت تقنيات التعلم الآلي كبديل مثالي لتقدير هذه الخصائص بدقة وكفاءة (Singh et al., 2022). لجا العديد من الباحثين الى توظيف خوارزميات التعليم الآلي في نمذجة عملية الارتشاح، لما تتميز به من قدرة على استخراج الانماط من البيانات غير الخطية والمعقدة دون الحاجة لافتراضات مسبقة عن العلاقات الفيزيائية (Dagher, 2024). ومن ابرز هذه التقنيات:

1. النموذج الشجري M5P (model tree): قدمت من قبل (Quinlan, 1992) وهي احدى خوارزميات التعلم الالي القائمة على بناء شجرة قرار، حيث تتكون من عقد وفروع تمثل اختبارات للمتغيرات، وأوراق تمثل النتائج النهائية. اذ يوضح الشكل 8 مفهوم الخوارزمية، Mi تمثل النموذج و ni عدد الفروع في الشجرة. يتم في كل عقدة تطبيق الانحدار الخطي لتحديد العلاقة بين المتغيرات الداخلة (مثل المحتوى الرطوبي والكثافة الظاهرية ونسجة التربة) والمغيرات الخارجة (مثل معدل الارتشاح او الارتشاح التراكمي) تسمح هذه البنية بالتعامل مع البيانات المستمرة، وتقليل التباين في النتائج، مما يجعلها مناسبة للتنبؤ بدقة خصاص الارتشاح (Singh et al., 2019; Singh et al., 2022).



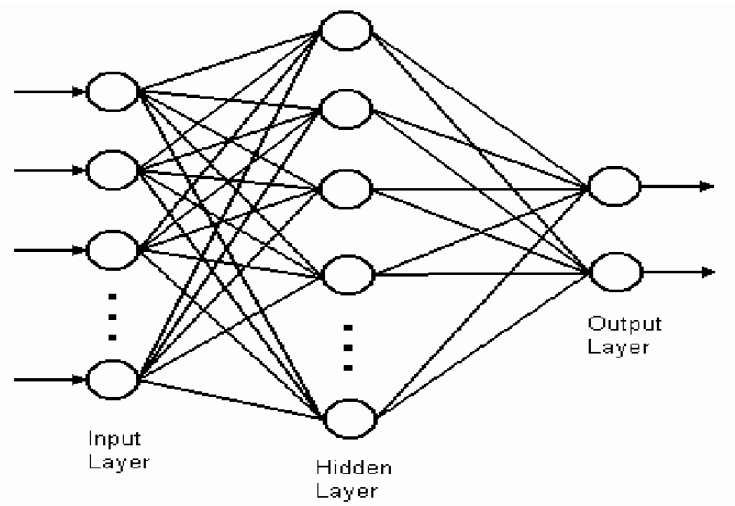
الشكل 8: يعرض النموذج الشجري M5P (Singh et al., 2022)

2. البرمجة الجينية GEP (Gene Expression Programming): هي احدى تقنيات التعلم الالي المصممة من قبل (Ferreira, 2002) لحل المشكلات المعقدة من خلال تطوير برامج حاسوبية. تبنى هذه التقنية على الخوارزمية الوراثية GA (Genetic algorithms) والتي تعتمد على مبدأ الانتخاب الطبيعي والبقاء للاقوى. تتمثل هذه التقنية على هيئة كروموسومات خطية تتكون من سلاسل رمزية تمثل العمليات الرياضياتية والمتغيرات، ثم يتم تحويلها الى هياكل هرمية تعكس العمليات الحسابية والمنطقية التي يتكون منها البرنامج. يتم اولاً انشاء مجموعة اولية من الكروموسومات بشكل عشوائي ثم تقييم اداء كل كروموسوم باستخدام معايير اداء تحدد مدى جودة حل البرنامج للمشكلة. في حال لم تحقق هذه الكروموسومات نتائج جيدة يتم تطويرها من خلال عمليات الطفرة والتهجين لانتاج جيل جديد من الكروموسومات يحمل تحسينات افضل من الجيل السابق. تكرر هذه العملية حتى يتم تحقيق افضل النتائج الممكنة وقد اثبتت فعاليتها في تحسين تقدير معاملات الارتشاح، إذ توفر معادلات خطية يمكنها التنبؤ بالارتشاح التراكمي ومعدل الارتشاح بدقة عالية(Qian et al., 2024; Singh et al., 2022). وكما هو مبين في الشكل 9 الذي يعرض مخطط لتسلسل خطوات موجز للبرمجة GEP.



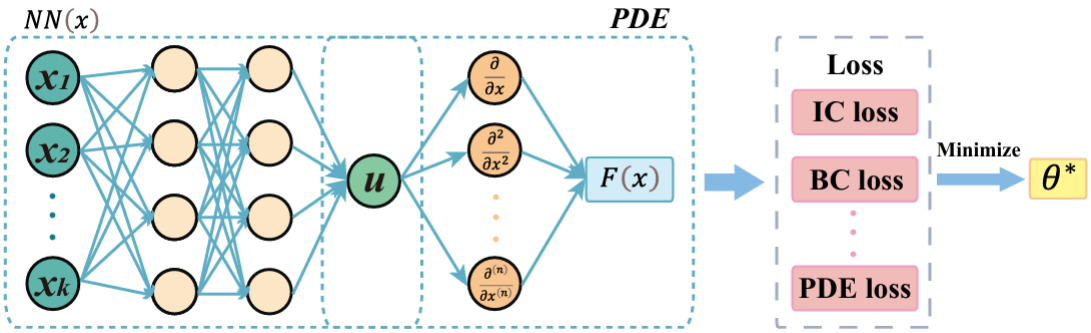
الشكل 9: يبين مخطط لوصف البرمجة الجينية (Singh et al., 2022)

الشبكات العصبية الاصطناعية ANN (Artificial Neural Networks): هي نماذج حاسوبية مستوحاه من بنية وآلية عمل الدماغ البشري، تتكون من عقد مترابطة تعرف بالخلايا العصبية الاصطناعية مرتبة على شكل طبقات متعددة. تبدا بطبقة الادخال التي تستقبل البيانات (المتغيرات الفيزيائية للتربة)، وطبقة خفية تعالج البيانات، وطبقة اخراج النتائج النهائية، وكما موضح في الشكل 10. تنتقل المعلومات بين الخلايا العصبية عبر اتصال بين خليتين عصبيتين مرتبط بوزن محدد، حيث يشير الوزن الكبير الى ان الاتصال قوي بين الخلايا العصبية بينما الوزن الصغير يعني ان الاتصال ضعيف. تعد عملية تعديل هذه الاوزان هي اساس عملية التعلم للشبكة العصبية وذلك لزيادة قدرتها على توليد تنبؤات او تصنيفات صحيحة. تقارن الشبكة اثناء التدريب مخرجاتها بالمخرجات المقصودة مع ايجاد الفرق او الخطأ ثم تطبيق اساليب التحسين لتقليل هذا الخطا. وقد اثبتت هذه التقنية قدرة عالية على التنبؤ بمعدل وحجم الارتشاح في انظمة الري، اذ تفوقت على الطرق التقليدية مثل طريقة النقطتين (Aryan; Rose, 2024;Mattar et al., 2015;Sy, 2006).



الشكل 10: يوضح مخطط الشبكة العصبية الاصطناعية (Sy, 2006).

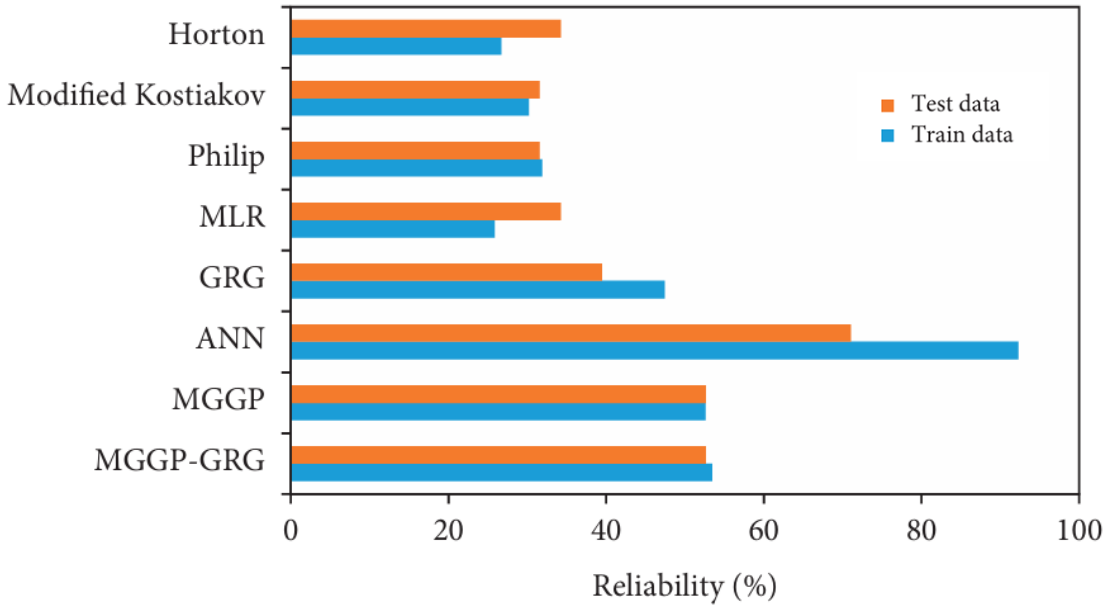
3. **الشبكات العصبية المعتمدة على الفيزياء PINN (physics-informed neural networks):** هي نوع خاص ومتقدم من الشبكات العصبية الاصطناعية التي تدمج المعلومات الفيزيائية ضمن عملية التعلم الالي. بدلاً من مجرد تدريب الشبكة على البيانات، يتم تعليمها القوانين الفيزيائية وهذا يجعلها قادرة على تقييم تنبؤات اكثر دقة وموثوقية، خاصة في الحالات التي تكون فيها البيانات محدودة. غالباً ما تستخدم هذه التقنية لحل المعادلات الجبرية او التفاضلية لاستبدال بعض او حتى جميع خطوات سير العمليات الحسابية متعددة المراحل، مما يؤدي الى تسريع العمليات الحسابية وتحسين كفاءة الحلول (Nikolaienko et al., 2024;Yang, 2022). مبدأ الحل موضح في الشكل 11.



الشكل 11: مبدأ حل PINN (Yang, 2022)

اجرى الباحثون العديد من الدراسات بهذا الخصوص اذ اقترح (Yang, 2022) نهجاً قائماً على التعلم العميق للتحقق العددي لارتشاح الماء في التربة باستخدام الشبكة العصبية المستنيرة بالفيزياء PINN وإجراء تقييم وتحليل شامل لعملية الارتشاح في انواع التربة المختلفة. يضم النهج اختيار معادلة احادية البعد لنمذجة ارتشاح الماء عمودياً نحو الاسفل من ثم اختيار المعاملات لانواع التربة المختلفة، مثل الايصالية الهيدروليكية وتوزيع الماء عند محتويات رطوبية مختلفة لتوفير حل للمعادلة. وبالتالي يتم تحديد شكل المعادلة التفاضلية الجزئية والشروط الاولية والحدية بناءً على PINN حيث دمج المعادلة التفاضلية الجزئية للارتشاح مع الشبكة العصبية، مما وفر حلاً عددياً اكثر دقة مقارنة بالطرق بالمقارنة مع الطريقة العددية التقليدية. بينت النتائج ان معدل الارتشاح يتخلف تبعاً للنسجة، اذ كان اسرع في التربة الرملية الخفيفة وابطأ في الترب الرملية المتوسطة. وفقاً لما ورد في دارسة (K. Wang et al., 2018) يعاني نموذج فيليب للارتشاح من قيود في تقدير معاملاته الفيزيائية، لاسيما عند استخدام طريقة حسابية تقليدية. ولتحسين دقة هذه المعلمات تم ادخال خوارزمية وراثية مشفرة (gray-coded). ساهمت هذه الدراسة الخوارزمية في تعزيز مرونة النموذج بتغيير شكل دالة اضطراب الزمن من شكل منفصل الى شكل مستمر. تم تطبيق البرامج RETC وHydrus-1D لتقدير المعاملات الفيزيائية للتربة وحساب الارتشاح التراكمي لسبع انواع مختلفة من التربة ضمن مثلث النسجة التابع لقسم الزراعة الامريكي (USDA). اظهرت المقارنات بين نموذج الارتشاح فيليب مع الطرق العددية المختلفة ان تطبيق تقنية التحسين ادى الى زيادة كفاءة ناش-ساتكليف (NSE) من 0.82 الى 0.97، بالاضافة الى تقليل النسبة المئوية للانحياز (PBIAS) من 14% الى 2%. اشارت النتائج الى ان استخدام العلاقة المنفصلة لدالة اضراب الزمن في الحساب العددي لنموذج فيليب يؤدي الى تقليل دقة تقدير

معاملات النموذج، ولكن يمكن تصحيح هذه المشكلة من خلال تطبيق خوارزمية التحسين. بالنسبة (Zakwan & Niazkar, 2021) تم تطبيق نماذج مختلفة تعتمد على البيانات بما في ذلك الانحدار الخطي المتعدد (MLR) والتدرج المنخفض المعمم (GRG) واثنين من تقنيات التعلم الالي (الشبكة العصبية الاصطناعية (ANN) والبرمجة الوراثية متعددة الجينات (MGGP)) بالاضافة الى MGGP-GRG لتقدير معدلات الارتشاح. تمت مقارنة معدلات الارتشاح المقدرة بطرائق التعلم الالي بتلك التي تم الحصول عليها بواسطة نماذج الارتشاح التجريبية (نموذج هورتين، وفيليب، وكوستياكوف المعدل) لبيانات الارتشاح المنشورة. من بين النماذج التقليدية التي تم اخذها في الاعتبار، قدم نموذج فيليب افضل التقديرات لمعدل الارتشاح. ولوحظ ان تطبيق نموذج MGGP-GRG وMGGP اعطى تقدير افضل لمعدل الارتشاح مقارنة بنموذج الارتشاح التقليدي باكثر من 80%، بينما قدمت الشبكة العصبية الاصطناعية افضل تنبؤ بمعدلات الارتشاح. تم اجراء تحليل الموثوقية لبيانات التدريب والاختبار بشكل منفصل، وعرضت نتائج هذا التحليل في الشكل 12، وكما هو موضح، حققت الشبكة العصبية الاصطناعية (ANN) اعلى نسبة موثوقية في كل من بيانات التدريب والاختبار. علاوة على ذلك، فان نسب الموثوقية التي حققها كل من نموذج MGGP ونموذج MGGP-GRG كانت اعلى من تلك التي حققتها النماذج التجريبية، كما يظهر تحليل الموثوقية التحسين الذي حققته نماذج التعلم الالي مقارنة بالطرق الاخرى المعتمدة على البيانات لتوقع معدلات الارتشاح.



الشكل 12: يعرض نتائج تحليل الموثوقية (Zakwan & Niazkar, 2021).

قارن (Kumar & Sihag, 2019) النماذج التجريبية القائمة على المعادلات والتي تستخدم لتقدير معدل الارتشاح لمواقع مختلفة في منطقة الدراسة. اجريت تجارب الارتشاح في 20 موقعاً مختلفاً باستخدام مقياس ارتشاح قرصي صغير، حيث تم استخدام طريقة المربعات الصغرى لكل موقع على حدة لتقدير معلامات المعادلة ومعدل الارتشاح لثلاثة نماذج تجريبية مختلفة، وهي نموذج كوستاكوف ونموذج كوستاكوف المعدلة ونموذج نوفيل. تمت

مقارنة اداء نماذج الارتشاح التجريبي هذه ايضا مع تقنيات التعلم الالي القائمة على نظام adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) وتقنيات random forest regression. وتم اعتماد المعايير الاحصائية (R^2 وCC وRMSE وMAE) لمقارنة اداء مختلف النماذج. اظهرت النتائج ان تقنية random forest regression هي الانسب لتقدير بيانات الارتشاح اذ تعد بديلاً جيد للنماذج التجريبية في التنبؤ بمعدل الارتشاح لمنطقة الدراسة، ولكن هناك حاجة الى معلومات عن الخصائص الاساسية للتربة لتنفيذ النموذج. هدفت الدراسة التي اجراها (Sepahvand et al., 2021) الى تقييم امكانية خمس نماذج قائمة على البيانات الحقلية في التنبؤ بمعدل ارتشاح المياه في التربة. تم استخدام قياسات حقلية فعلية مثل كثافة التربة، ومحتوى الرطوبة الابتدائي، ونسبة الرمل والطين والغرين، بالاضافة الى الزمن، كمدخلات للنماذج الخمسة (multi-linear regression (MLR) neural network (NN), M5P model tree (M5P), random forest regression (RF), and Gaussian process (GP), باستخدام 155 قياساً حقلياً لمعدل الارتشاح تم جمعها باستخدام مقياس الارتشاح مزدوج الحلقة. قسمت البيانات الى قسمين 105 قياس للتدريب و50 قياس للاختبار. من ثم استخدام ثلاثة معايير احصائية لمقارنة كفاءة النماذج وهي جذر متوسط مربع الخطأ (RMSE) وكفاءة ناش-سوتكليف (NSE) ومعامل الارتباط (C.C). اظهرت النتائج ان جميع النماذج قدمت اداء جيد في التنبؤ بمعدل الارتشاح، الا ان الشبكة العصبية حققت اعلى معامل ارتباط (C.C= 0.93). كما اشارت الدراسة الى ان زمن الارتشاح هو العامل الاكثر تأثيراً على معدل ارتشاح التربة.

تم تطوير شبكة عصبية اصطناعية (ANN) لتقدير حجم الارتشاح تحت الري بالمرزوز من قبل الباحثين (Mattar et al., 2015) وذلك بتطوير شبكة عصبية امامية باستخدام البيانات المنشورة لتطوير نموذج الشبكة العصبية. اظهر النموذج قدرة عالية على التنبؤ بحجم الارتشاح بدقة عالية من خلال تحليل البيانات على مجموعة واسعة من المتغيرات المدخلة. اشارت معايير تقييم الاداء الى ان الشبكة العصبية كانت الافضل مقارنة بطريقة النقطتين بمعامل تحديد اقل دقة. كما كانت قيمة جذر متوسط مربع الخطأ لطريقة النقطتين تقريباً ضعف القيم المتوسطة لنموذج الشبكة العصبية. تم تقديم هذه النتائج من خلال دراسة شاملة من شأنها تعزيز فهمنا لكيفية استخدام تقنيات الشبكات العصبية في تقدير حجم الارتشاح بكفاءة ودقة عالية. تتضمن الدراسة التي قدمها (Singh et al., 2022) استخدام تقنيتين من تقنيات التعلم الالي (M5P, GEP) في التنبؤ بخصائص الارتشاح وذلك لكون هذه التقنيات تنتج معادلات خطية للتنبؤ بالمخرجات في اي لحظة. تم تدريب واختبار النماذج باستخدام 7 تركيبات (CMB1-CMB7) من معاملات الادخال وهي المحتوى الرطوبي، والكثافة الظاهرية، ونسبة الرمل، ونسبة الطين، ونسبة الغرين، والزمن. مع معاملات الاخراج الارتشاح التراكمي ومعدل الارتشاح. اشارت النتائج الى ان تقنية GEP تفوقت على M5P في التنبؤ بمعدل الارتشاح والارتشاح التراكمي بقيم R وRMSE وMAE مرتفعة.

الخاتمة

تعد عملية الارتشاح من اهم العمليات المؤثرة في الدورة المائية وادارة الموارد المائية، إذ تتحكم في كفاءة الري وتقدير الفواقد المائية.

الاستنتاجات

1. اظهرت المراجعة ان الخصـائص الفيزيائية للتربة مثل النسـجة، والكثافة الظاهرية، والمحتوى الرطوبي الابتدائي، تمثل العوامل الاكثر تأثيراً في معدلات الارتشـاح، حيث تؤدي زيادة نسبة الرمل والمسامية الى رفع معدلاته، بينما يقل الارتشاح بارتفاع نسبة الطين او الكثافة الظاهرية او المحتوى الرطوبي.
2. بينت الدراسـات ان النماذج الرياضـية التقليدية مثل كوستياكوف (الاعتيادي، والمعدل، والمنقح)، وفيليب، وهولتن، وهورتين، وجرين آمبت لا تزال تحظى باستخدام واسع في تقدير معدلات الارتشـاح والارتشـاح التراكمي، غير ان دقتها تختلف باختلاف ظروف التربة وموقع الدراسة.
3. اثبت نموذج Hydrus-1D (المبني على معادلة ريتشـارد) كفاءة عالية في محاكاة حركة الماء والارتشـاح التراكمي وجبهة الابتلال في الترب المتجانسـة والطباقية، لكنه يتطلب تحديداً دقيقاً لمعاملات التربة مما يحد من سهولة استخدامه.
4. اظهرت تقنيات التعلم الالي (ANN, GEP, M5P, RF, PINN) قدرة اعلى على تمثيل البيانات الحقلية والتعامل مع تعقيدات التربة مقارنة بالنماذج التقليدية، كما قدمت دقة تنبؤ اكبر ومرونة في التعامل مع اللاخطية وعلى انواع مختلفة من التربة.

التوصيات

1. ضرورة التركيز على الخصائص الفيزيائية للتربة كمدخلات اساسية عند نمذجة الارتشاح لضمان صحة التقديرات.
2. اعتماد المقارنات الميدانية بين نماذج الرياضـياتية والعددية وتقنيات التعلم الالي، لتحديد النموذج الامثل وفقا لنوع التربة وظروفها.
3. التوسع في استخدام النماذج العددية مثل Hydrus-1D وربطها مع تقنيات الذكاء الاصطناعي في لتحسين تمثيل خصائص التربة وتقليل الاعتماد على القياسات الحقلية المكلفة.
4. تعزيز تطبيقات التعلم الالي والذكاء الاصـطناعي في الزراعة الدقيقة واداره المياه، لما توفره من كفاءة اعلى في التنبؤ بعملية الارتشاح والفواقد المائية.
5. تشجيع الدراسات المستقبلية على دمج النماذج الفيزيائية مع خوارزميات الذكاء الاصطناعي بهدف تطوير ادوات هجينة اكثر دقة وموثوقية للتنبؤ بارتشاح المياه في مختلف انواع التربة.

شكر وتقدير

يود المؤلفون ان يشكروا جامعة الموصل/ كلية الهندسة/ قسم هندسة السدود والموارد المائية، على الدعم المقدم خلال تنفيذ هذا البحث.

المصادر

Abdul-Rahman, J. N., Al-sheikhly, A. H., & College. (2011). Effect of Irrigation Interval , Level of Irrigation Water and Emitter Discharge on Infiltration Rate in Clayey Soils. *IRAQI JOURNAL OF AGRICULTURAL SCIENCES*, 1–18.

Adeniji, F. A., Umara, B. G., Dibal, J. M., & Amali, A. A. (2013). Variation of infiltration rates with soil texture. A laboratory study. *International Journal of Engineering and Innovative Technology*, *3*(2), 454–459.

Al-Azawi, S. A. (1985). Experimental evaluation of infiltration models. *Journal of Hydrology (New Zealand)*, *24*(2), 77–88.

Al-Ogaidi, A. A. M., Mahmood, M. T., Mohammed, A. K., & Yasin, H. I. (2023). Effect of Soil Bulk Density on Water Infiltration in Layered Soil. *Tikrit Journal of Engineering Sciences*, *30*(3), 174–189.

Al-Somaedai, I. A. H., Shihab, R. M., & Al-Tamimi, D. A. M. (2017). Prediction of Field Water Infiltration Based on Soil Physical Characteristics. *Tikrit Journal for Agricultural Sciences*, *17*(2).

Alegre, J. C., & Cassel, D. K. (1996). Dynamics of soil physical properties under alternative systems to slash-and-burn. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *58*(1), 39–48.

Aryan Rose, A. R. (2024). How do Artificial Neural Networks Work. *Journal of Advances in Science and Technology*, *20*(1), 172–177. https://doi.org/10.29070/ttrkmm98

Bajirao, T. S., & Vishnu, P. (2023). Comparative performance of different infiltration models for prediction of infiltration rate under different land-use conditions. *Environmental Earth Sciences*, *82*(4), 112. https://doi.org/10.1007/s12665-023-10808-3

Bayabil, H. K., Dile, Y. T., Tebebu, T. Y., Engda, T. A., & Steenhuis, T. S. (2019). Evaluating infiltration models and pedotransfer functions: implications for hydrologic modeling. *Geoderma*, *338*, 159–169.

Berdouki, A. A., Besharat, S., Zeinalzadeh, K., & Cruz, C. (2024). The effect of soil texture, layering and water head on the infiltration rate and infiltration model

accuracy. *Irrigation and Drainage*, *73*(3), 846–865. https://doi.org/10.1002/ird.2918

Beven, K. (2004). Robert E. Horton's perceptual model of infiltration processes. *Hydrological Processes*, *18*(17), 3447–3460. https://doi.org/10.1002/hyp.5740

Brye, K. R., Slaton, N. A., & Norman, R. J. (2006). Soil physical and biological properties as affected by land leveling in a clayey aquert. *Soil Science Society of America Journal*, *70*(2), 631–642.

Cleophas, F., Isidore, F., Musta, B., Mohd Ali, B. N., Mahali, M., Zahari, N. Z., & Bidin, K. (2022). Effect of soil physical properties on soil infiltration rates. *Journal of Physics: Conference Series*, *2314*(1). https://doi.org/10.1088/1742-6596/2314/1/012020

Dagadu, J. S., & Nimbalkar, P. T. (2012). Infiltration studies of different soils under different soil conditions and comparison of infiltration models with field data. *International Journal of Advanced Engineering Technology*, *3*(2), 154–157.

Dagher, D. H. (2024). Assessment of Using Machine and Deep Learning Applications in Surface Water Quantity and Quality Predictions: A Review. *Journal of Water Resources and Geosciences*, *3*(2).

Dahak, A., Boutaghane, H., & Merabtene, T. (2022). Parameter Estimation and Assessment of Infiltration Models for Madjez Ressoul Catchment, Algeria. *Water (Switzerland)*, *14*(8), 1–19. https://doi.org/10.3390/w14081185

De Roo, A. P. J., & Riezebos, H. T. (1992). Infiltration experiments on loess soils and their implications for modelling surface runoff and soil erosion. *Catena*, *19*(2), 221–239. https://doi.org/10.1016/0341-8162(92)90026-8

Devia, G. K., Ganasri, B. P., & Dwarakish, G. S. (2015). A review on hydrological models. *Aquatic Procedia*, *4*, 1001–1007.

Dong, Q. G., Han, J. C., Zhang, Y., Li, N., Lei, N., Sun, Z. H., Du, Y. C., & He, J. (2019). Water infiltration of covering soils with different textures and bulk densities in gravel-mulched areas. *Applied Ecology and Environmental Research*, *17*(6), 14039–14052. https://doi.org/10.15666/aeer/1706_1403914052

E. Al-Esawi, J. S., Wayayok, A., Al-Ogaidi, A. A. M., Rowshon, M. K., Fikri Abdullah, A., & Abdullahi, S. (2021). Effect of Soil Compaction and Palm Oil Application on Soil Infiltration Rate. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, *147*(3), 1–10. https://doi.org/10.1061/(asce)ir.1943-4774.0001534

Ekhmaj, A. I. (2010). Predicting soil infiltration rate using artificial neural network. *2010 International Conference on Environmental Engineering and Applications*, 117–121.

Ferreira, C. (2002). Gene expression programming in problem solving. In *Soft computing and industry: recent applications* (pp. 635–653). Springer.

Fok, Y.-S. (1986). Derivation of Lewis-Kostiakov intake equation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, *112*(2), 164–171.

Gebul, M. A. (2022). Simplified approach for determination of parameters for Kostiakov's infiltration equation. *Water Practice and Technology*, *17*(11), 2435–2446. https://doi.org/10.2166/wpt.2022.142

Ghazal, E., & Yasin, H. (2021). Infiltration and Some Physical Properties of Soil. *Al-Rafidain Engineering Journal (AREJ)*, *26*(2), 249–258. https://doi.org/10.33899/rengj.2021.129941.1089

Ghorbani Dashtaki, S., Homaee, M., Mahdian, M. H., & Kouchakzadeh, M. (2009). Site-dependence performance of infiltration models. *Water Resources Management*, *23*(13), 2777–2790. https://doi.org/10.1007/s11269-009-9408-3

Girei, A. H., Abdulkadir, A., & Abdu, N. (2016). Goodness of fit of three infiltration models of a soil under long-term trial in Samaru, Northern Guinea Savanna of Nigeria. *Journal of Soil Science and Environmental Management*, *7*(5), 64–72.

Green, W. H., & Ampt, G. A. (1911). Studies on Soil Phyics. *The Journal of Agricultural Science*, *4*(1), 1–24.

Hachum, A. Y., & Yasin, H. I. (1992). On-farm irrigation systems engineering. *Dar Al Kuttb for Printing and Publishing, Mosul University, Mosul, Iraq*.

Haghnazari, F., Shahgholi, H., & Feizi, M. (2015). *Factors affecting the infiltration of*

agricultural soils : review. *6*(5), 21–35.

Holtan, H. N. (1961). *A concept for infiltration estimates in watershed engineering* (Vol. 41). Agricultural Research Service, US Department of Agriculture.

Horton, R. E. (1940). An approach toward a physical interpretation of infiltration capacity. *Soil Science Society of America Proceedings*, *5*(399–417), 24.

Ieke Wulan Ayu, I. W. A., Sugeng Prijono, S. P., & Soemarno, S. (2013). Assessment of infiltration rate under different drylands types in Unter-Iwes subdistrict Sumbawa Besar, Indonesia. *Indonesia*, 71–76.

Iwata, S., Tabuchi, T., & Warkentin, B. P. (2020). *Soil-Water Interactions*. CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781003067320

Jabbar, F. A., & Jasim, A. A. (2021). Effect of the Subsurface Drip Irrigation System on the Produc-tion of the Rice Crop. *Journal Water Resources and Geosciences*, *3*(2), 1–17. https://www.iraqoaj.net/iasj/article/229417

Jury, W.A., Gardner, W.R., and Gardner, W. H. (1991). *Soil physics. 5th Edition, John Wiley and Sons, New York,*.

Khaerudin, D. N., Rispiningtati, Suharyanto, A., & Harisuseno, D. (2017). Infiltration rate for rainfall and runoff process with bulk density soil and slope variation in laboratory experiment. *Nature Environment and Pollution Technology*, *16*(1), 219–224.

Kostiakov, A. N. (1932). On the dynamics of the coefficient of water-percolation in soils and on the necessity of studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration. *Trans. 6th Cong. International. Soil Science, Russian Part A*, 17–21.

Kumar, M., & Sihag, P. (2019). Assessment of infiltration rate of soil using empirical and machine learning-based models. *Irrigation and Drainage*, 68(3), 588-601. https://doi.org/10.1002/ird.2332

La Follette, P., Ogden, F. L., & Jan, A. (2023). Layered Green and Ampt Infiltration With Redistribution. *Water Resources Research*, *59*(7), 1–18. https://doi.org/10.1029/2022WR033742

Lal, R., & Shukla, M. K. (2004). *Principles of Soil Physics*. CRC Press.

https://doi.org/10.4324/9780203021231

Liu, C.-W., Chen, S.-K., Jou, S.-W., & Kuo, S.-F. (2001). Estimation of the infiltration rate of a paddy field in Yun-Lin, Taiwan. *Agricultural Systems*, *68*(1), 41–54. https://doi.org/10.1016/S0308-521X(00)00062-7

Ma, W., Zhang, X., Zhen, Q., & Zhang, Y. (2016). Effect of soil texture on water infiltration in semiarid reclaimed land. *Water Quality Research Journal of Canada*, *51*(1), 33–41. https://doi.org/10.2166/wqrjc.2015.025

Machiwal, D., Jha, M. K., & Mal, B. C. (2006). Modelling Infiltration and quantifying Spatial Soil Variability in a Wasteland of Kharagpur, India. *Biosystems Engineering*, *95*(4), 569–582. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2006.08.007

Mattar, M. A., Alazba, A. A., & El-abedin, T. K. Z. (2015). Forecasting furrow irrigation infiltration using artificial neural networks. *Agricultural Water Management*, *148*, 63–71. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.09.015

Mesele, H., Grum, B., Aregay, G., & Berhe, G. T. (2024). Evaluation and comparison of infiltration models for estimating infiltration capacity of different textures of irrigated soils. *Environmental Systems Research*, *13*(1). https://doi.org/10.1186/s40068-024-00356-5

Mezencev, V. J. (1948). Theory of formation of the surface runoff. *Meteorol Hidrol*, *3*, 33–40.

Mirzaee, S., Zolfaghari, A. A., Gorji, M., Dyck, M., & Ghorbani Dashtaki, S. (2014). Evaluation of infiltration models with different numbers of fitting parameters in different soil texture classes. *Archives of Agronomy and Soil Science*, *60*(5), 681–693. https://doi.org/10.1080/03650340.2013.823477

Mithra, M. S. S., G, J., & V, M. (2022). Analysing the Infiltration Rate of Different Types of Infiltration Model: A Review. *Technoarete Transactions on Renewable Energy, Green Energy and Sustainability*, *2*(3), 1–13. https://doi.org/10.36647/ttregs/02.03.a001

Mohammed, E. M., Alani, E. A., & Abid, M. M. (2021). Modeling infiltration and water distribution process of layered soils using hydrus-1d. *Indian Journal of Ecology*,

48(1), 66–71.

Nikolaienko, T., Patel, H., Panda, A., Joshi, S. M., Jaso, S., & Kalyanaraman, K. (2024). Physics-informed neural networks need a physicist to be accurate: the case of mass and heat transport in Fischer-Tropsch catalyst particles. *ArXiv Preprint ArXiv:2411.10048*.

NRCS, U. (2004). Estimation of direct runoff from storm rainfall. *National Engineering HandbookÀPart*, *630*.

Parhi, P. K., Mishra, S. K., & Singh, R. (2007). A modification to Kostiakov and modified Kostiakov infiltration models. *Water Resources Management*, *21*, 1973–1989.

Patle, D. S., Pandey, A., Srivastava, S., Sawarkar, A. N., & Kumar, S. (2021). Ultrasound-intensified biodiesel production from algal biomass: a review. *Environmental Chemistry Letters*, *19*, 209–229.

Patle, G. T., Sikar, T. T., Rawat, K. S., & Singh, S. K. (2019). Estimation of infiltration rate from soil properties using regression model for cultivated land. *Geology, Ecology, and Landscapes*, *3*(1), 1–13. https://doi.org/10.1080/24749508.2018.1481633

Philip, J. R. (1957). The theory of infiltration: 1. The infiltration equation and its solution. *Soil Science*, *83*(5), 345–358.

Qian, Y., Yang, J., Yang, W., Alateah, A. H., Alsubeai, A., Alfares, A. M., & Sufian, M. (2024). Prediction of Ultra-High-Performance Concrete (UHPC) Properties Using Gene Expression Programming (GEP). *Buildings*, *14*(9), 2675. https://doi.org/10.3390/buildings14092675

Quinlan, J. R. (1992). Learning with continuous classes. *5th Australian Joint Conference on Artificial Intelligence*, *92*, 343–348.

Rao, M. D., Raghuwanshi, N. S., & Singh, R. (2006). Development of a physically based 1D-infiltration model for irrigated soils. *Agricultural Water Management*, *85*(1–2), 165–174.

Rashidi, M., Ahmadbeyki, A., & Hajiaghaei, A. (2014). *Prediction of soil infiltration rate*

based on some physical properties of soil.

Richards, L. A. (1931). Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics*, *1*(5), 318–333.

Robin and Bora. (2019). Evaluation of Horton and Modified Kostiakov infiltration model for suitability on hilly slopes. *Indian Journal of Hill Farming December*, *32*(2), 258–264.

Sepahvand, A., Singh, B., Ghobadi, M., & Sihag, P. (2021). Estimation of infiltration rate using data-driven models. *Arabian Journal of Geosciences*, *14*, 1–11.

Servadio, P., Marsili, A., Pagliai, M., Pellegrini, S., & Vignozzi, N. (2001). Effects on some clay soil qualities following the passage of rubber-tracked and wheeled tractors in central Italy. *Soil and Tillage Research*, *61*(3–4), 143–155. https://doi.org/10.1016/S0167-1987(01)00195-7

Simunek, J., Van Genuchten, M. T., & Sejna, M. (2005). The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. *University of California-Riverside Research Reports*, *3*, 1–240.

Singh, B., Ebtehaj, I., Sihag, P., & Bonakdari, H. (2022). An expert system for predicting the infiltration characteristics. *Water Supply*, *22*(3), 2847–2862. https://doi.org/10.2166/ws.2021.430

Singh, B., Sihag, P., & Deswal, S. (2019). Modelling of the impact of water quality on the infiltration rate of the soil. *Applied Water Science*, *9*(1), 1–9. https://doi.org/10.1007/s13201-019-0892-1

Song, A. Y., Dong, L. S., Liu, S. R., & Liu, J. T. (2018). Soil infiltration characteristics and its influencing factors in different subalpine meadow communities. *Research of Soil & Water Conservation*, *25*, 41–45.

Sy, N. L. (2006). Modelling the infiltration process with a multi-layer perceptron artificial neural network. *Hydrological Sciences Journal*, *51*(1), 3–20. https://doi.org/10.1623/hysj.51.1.3

Vand, A. S., Sihag, P., Singh, B., & Zand, M. (2018). Comparative evaluation of infiltration models. *KSCE Journal of Civil Engineering*, *22*, 4173–4184.

Vrugt, J. A., Hopmans, J. W., Gao, Y., Rahmati, M., Vanderborght, J., & Vereecken, H. (2024). The time validity of Philip's two-term infiltration equation: An elusive theoretical quantity? *Vadose Zone Journal* , *23*(4), 1–25. https://doi.org/10.1002/vzj2.20309

Wang, K., Yang, X., Li, Y., Liu, C., & Guo, X. (2018). AN APPLICATION OF CHAOS GRAY-ENCODED GENETIC ALGORITHM FOR PHILIP INFILTRATION MODEL. *Thermal Science*, *22*(4), 1581–1588.

Wang, X., Huang, Z., Qin, H., & Dai, F. (2025). Sensitivity analysis of VG model parameters for infiltration in undisturbed loess under ponding conditions using the HYDRUS-1D model. *Scientific Reports*, *15*(1), 1–15. https://doi.org/10.1038/s41598-025-11058-y

Warkentin, B. P. (1971). Effects of compaction on content and transmission of water in soils. *Compaction of Agricultural Soils*, 126–153.

Xiao D A, W. S. J. (2009). Comments on the progress and direction in soil water research. *Ecology and Environmental Sciences*, *18(3)*, 1182–1188.

Yang, Y. (2022). A Deep Learning-Based Approach for a Numerical Investigation of Soil – Water Vertical Infiltration with Physics-Informed Neural Networks. *Mathematics*, 10(16), 2945.

Zakwan, M., & Niazkar, M. (2021). A Comparative Analysis of Data-Driven Empirical and Artificial. *Complexity*, *2021*. https://doi.org/10.1155/2021/9945218