

تقييم كفاءة النماذج الرياضية لأدوات الحراثة الرفيعة في التنبؤ بقوة الجر اللازمة لمحراث تحت التربة

أ.د. محمد عبود غانم*

م. ونام كامل معلا**

(تاريخ الإيداع 2022/11/17 . قُبِلَ للنشر في 2023/2/28)

□ ملخص □

تمت مقارنة أداء أربعة نماذج رياضية مختلفة (Soehne, Mckyes, Swick, Godwin) في تقدير قوى الجر على محراث تحت التربة المزود بأجنحة بوصفه من أدوات الحراثة الرفيعة. تمت كتابة برنامج حاسوبي باستخدام برنامج الماتلاب (Matlab Mathwork, 2016) للنماذج الثلاثة الأولى، وبرنامج للنموذج الأخير باستخدام الأكسل (Microsoft Excel, 2013)، لدراسة تأثير سرعة العمل وعمق الحراثة على قيمة القوة بدقة. بينت النتائج التي تعطيها النماذج بمقارنتها مع القيم المقاسة حقلياً من دراسات سابقة أنه يمكن استخدام النماذج المذكورة لتقدير قوى الجر على محراث تحت التربة بكفاءة مقبولة، وبشكل عام كانت كفاءة النماذج في تقدير قوى الجر في الترب الطينية أفضل منها في الترب الرملية؛ إذ بلغت قيمة النسبة المئوية لانحراف القيم المحسوبة عن القيم المقاسة (3.61%) في نموذج (Mckyes) في التربة الطينية، في حين كانت أقل قيمة للنسبة المئوية لانحراف القيم المحسوبة عن القيم المقاسة في التربة الرملية (31.56%) في نموذج (Soehne) وذلك عند قيم مختلفة للسرعة. إن أداء النماذج عند مستويات مختلفة للعمق في تقدير قوى الجر كان جيداً؛ إذ سجل نموذج (Soehne) أقل قيمة للنسبة المئوية لانحراف مقارنة بباقي النماذج والتي بلغت (8.98%) في التربة الطينية، بينما كان نموذج (Godwin) هو الأفضل في التربة الطينية اللومية. وبينت النتائج أيضاً أن أداء النماذج بشكل عام يعكس تأثير تغير البارامترات المدروسة (سرعة العمل، عمق الحراثة) على مقدار تغير القوة بشكل جيد.

الكلمات المفتاحية: أدوات الحراثة الرفيعة - نماذج رياضية- قوة الجر .

* أستاذ- قسم هندسة المكننة الزراعية- كلية الهندسة التقنية- جامعة طرطوس
** طالبة دكتوراه- قسم هندسة المكننة الزراعية- كلية الهندسة التقنية- جامعة طرطوس

Evaluation of the efficiency of the mathematical models of narrow tillage tool in prediction the draft force of subsoiler

Prof. Mohamed A.Ghanem *
Eng. Weam K. Malla**

(Received 17/11/2022 . Accepted 28/2/2023)

□ ABSTRACT

In this article, four mathematical models performance were evaluated to predict the draft force of a winged subsoiler treated as narrow tillage tool: Soehne model, Mckyes and Ali model, Swick and Perumpral model, Godwin and O'Dogherty model.

Comparing the results obtained from the mathematical models with those measured values of draft forces from literature studies in the field showed that the mathematical models could be used at acceptable efficiency to predict the draft force of a winged subsoiler. In general, the performance of the models in a clay soil is better than its performance in a sandy soil; the least deviation of the calculated forces from the measured ones was (3.61%) in a clay soil by Mckeyes model, while it was (31.56%) in a sandy soil as registered by Soehne model at different values of speed.

The studied models showed good performance at different levels of depth, the least deviation was (8.98%) with Soehne model in a clay soil while Godwin model was the best in a clay loam soil. The studied models in general perfectly reflect the effect of the studied variables (depth, speed) on the amount of the change in draft force.

Key words: mathematical models, narrow tillage tools, draft force.

*Professor- Agricultural Mechanization Department- Faculty of Technical Engineering .

**Student Doctoral Degree- Agricultural Mechanization Department- Faculty of Technical Engineering.

1-المقدمة:

يعد المحراث تحت التربة من أكثر المحارث تطلباً للقدرة من الجرار نظراً لعمله على أعماق كبيرة قياساً بباقي أنواع المحارث (Simon and Manuwa, 2018) وبالتالي فإن تقدير قوة الجر بشكل صحيح يعد عامل مهم وأساسي في نجاح التصميم وإمكانية تطويره (Ahmadi, 2016; Topacki et al, 2010). يلعب تحديد العوامل المؤثرة في قوة الجر دوراً أساسياً في دراسة إمكانية تخفيضها وبالتالي توفير القدرة المطلوبة من الجرار (Askari et al, 2017; Dedousis and Bartzanas, 2010; Jiang et al, 2020). استخدمت النماذج الرياضية لأدوات الحراثة الرفيعة في حساب قوى الجر عند تصميم محارث تحت التربة والمحارث الحفارة باعتبارها تندرج تحت هذا النوع من الأدوات (Mckeys, 1985)، إذ تتميز هذه الطريقة ببساطتها وسهولة تطبيقها وقلة تكلفتها قياساً بباقي الأساليب (الأسلوب العددي، والأسلوب التجريبي)، بالإضافة إلى شموليتها حيث تمكن من دراسة تأثير كافة متغيرات نظام الحراثة (الصفات المتعلقة بالتربة، البارامترات الهندسية لأداة الحراثة، وشروط العمل) على قيمة قوة الجر؛ إذ يتم ربط هذه البيانات كمدخلات في نظام الحراثة من خلال فرض شكل معين لانهييار التربة أمام أداة الحراثة وبأخذ معادلات التوازن للقوى المؤثرة على كل من كتلة التربة والمحراث يتم حساب قوة الجر المطلوبة للمحراث (Godwin, 2007).

حيث كانت المعادلة الأساسية في الأسلوب التحليلي هي معادلة Reece (1965) لحساب القوة اللازمة لقطع التربة أمام أداة الحراثة استناداً إلى أعمال Terzaghi (1943) حول نظرية قدرة تحمل التربة في الهندسة المدنية حيث قسم القوى الناتجة في التربة تحت الأساس المجهود إلى قوة ناتجة عن وزن التربة تحت الأساس $(0.5 \gamma_s B N_y)$ حيث (γ_s) : الوزن الحجمي للتربة تحت الأساس، (B) : عرض الأساس (N_y) : معامل لابعدي مرجعي بحسب حالة التربة وزاوية الاحتكاك الداخلية، قوة ناتجة عن خواص التماسك في التربة $(C N_c)$ حيث (C) : معامل التماسك (N_c) : معامل لابعدي مرجعي خاص بالتماسك، بالإضافة إلى قوة ناتجة عن الضغط على سطح التربة $(\gamma_s D_f N_q)$ حيث (γ_s) : الوزن الحجمي للتربة المردومة فوق سطح التربة (D_f) : عمق التأسيس (N_q) : معامل لابعدي يتعلق بالضغط السطحي. بناء على هذه النظرية قام Reece بتطوير معادلة لحساب القوة اللازمة لقطع التربة أمام أدوات الحراثة مع بعض التعديلات المتعلقة بأبعاد الأداة فكانت المعادلة بالشكل التالي (Reece, 1965):

$$P = (\rho g d^2 N_y + c d N_c + q d N_q) w$$

حيث (ρ) : كثافة التربة $[Kg/m^3]$ ، (d) : عمق الحراثة $[m]$ ، (c) : تماسك حبيبات التربة $[KPa]$ ، (q) : الضغط على سطح التربة $[KPa]$ ، (w) : عرض أداة الحراثة $[m]$ ، (g) : تسارع الجاذبية الأرضية $[m/sec^2]$ ، (N_y, N_c, N_q) : عوامل لابعدية تتعلق بصفات التربة وأبعاد المحراث والتأثير المتبادل بينهما. اعتمدت هذه المعادلة من قبل العديد من الباحثين مع إضافة بعض التعديلات حسب الفرضيات التي يتبناها كل باحث في تبسيط شكل الانهييار للتربة وحسابات زوايا الانهييار.

ووفقاً لهذا الأسلوب يتم تقسيم أدوات الحراثة تبعاً لشكل انهييار التربة أمام أداة الحراثة إلى ثلاث مجموعات: أدوات حراثة عريضة – أدوات حراثة رفيعة – أدوات حراثة رفيعة جداً (Payne, 1956; Godwin, 1977; Smith et al, 1989). انطلاقاً من المبدأ العام الذي يقوم عليه هذا الأسلوب كان الاتجاه إلى تطوير عدة نماذج رياضية خاصة بمحارث تحت التربة لوصف انهييار التربة أمام المحراث، من أوائل النماذج النموذج الرياضي الذي اقترحه Balaton في عام 1989 حيث افترض الباحث أن انهييار التربة أمام المحراث يكون بشكل مشابه لانهييار التربة أمام أدوات الحراثة الرفيعة حيث تتكون كتلة التربة

المنهارة من انهيار رئيسي بشكل موشور، يحاط الانهيار الرئيسي بانهيارين هلاليين جانبيين كل منهما على شكل جزء من مخروط ، انطلق الباحث في حساب قوة الجر اللازمة لعمل المحراث من حساب قوى المقاومة التي يتعرض لها المحراث أثناء عمله في التربة، وقسمت هذه القوى إلى قوى مقاومة تتعرض لها القصبية وقوى تتعرض لها القدم، وقام بتقسيم قوى المقاومة التي تتعرض لها قدم المحراث إلى قوتين إحداهما على مقدمة القدم والأخرى على الأجنحة وعلى الرغم من التوافق الجيد بين القيم المحسوبة في هذا النموذج والقيم التجريبية فيما يخص قوة الجر، إلا أن اعتماده على المقاومة النوعية للتربة الناتجة عن تشوه التربة وضغط التربة الجانبي يحد من استخدامه (Balaton, 1989). وفي عام 2011 وضع Aday نموذجاً رياضياً للتنبؤ بقوة الجر لمحراث تحت التربة الثنائي الأسلحة المرتبة طولياً، افترض الباحث أن الانهيار أمام كل قصبية بشكل نصف جذع مخروط ومن خلال التداخل بينهما توصل إلى وضع معادلات التنبؤ بالقوة وكفاءة استخدام الطاقة، تم قياس زوايا الانهيار الأمامية والجانبية حقلياً لاستخدامها كمدخلات في النموذج الرياضي (Aday, 2011).

ولاحقاً قام Ahmadi عام 2016 بوضع نموذج لحساب القوى على محراث تحت التربة ذو القصبية المستقيمة، افترض أن شكل الانهيار ينتج من دوران مثلث قائم حول محور دوران وهمي ثم قام بحساب حجم كل من الانهيار الرئيسي والانهيارين الجانبيين، تم تقسيم القوى المؤثرة على محراث تحت التربة إلى ثلاث قوى (قوى الشد اللازمة للقطع، قوى العطالة، وقوى الاحتكاك)، وتم تقسيم قوى الاحتكاك إلى قوى الاحتكاك على القصبية وقوى الاحتكاك على القدم، لكن الباحث افترض وجود كتلة من التربة تتوضع أمام قصبية المحراث وتلتصق به وتبقى على شكلها الأولي على امتداد فترة الحراثة (Ahmadi, 2016).

وفي عام 2020 قام Jiang وزملاؤه بتطوير نموذج ليناسب المحراث ذو القصبية المنحنية مستنداً إلى النموذج السابق، حيث افترض أن شكل الانهيار ينتج من دوران صفيحة بشكل مشابه لمقطع التربة المنهارة حول محور دوران وهمي لتشكل بدورها كل من الانهيار الرئيسي والانهيارين الجانبيين، تم قياس زوايا الانهيار حقلياً لاستخدامها كمدخلات في النموذج الرياضي المطور، حيث استخدم النموذج في تحسين تصميم المحراث المستخدم تجريبياً إذ توصل الباحث إلى تصميم ثلاثة محارث كل منها خاص بالعمل على عمق محدد فقط وذلك بهدف توفير القدرة من الجرار بالحصول على أقل قيمة لقوة الجر ضمن شروط التجربة الحقلية (Jiang et al, 2020).

إن النماذج الرياضية المطورة لتناسب محراث تحت التربة عند ظروف عمل محددة، اعتمدت جميعها على المبدأ العام للنماذج الرياضية لأدوات الحراثة الرفيعة حيث أنها تفترض أن انهيار التربة أمام المحراث ينقسم إلى انهيار رئيسي وانهيارين جانبيين مع بعض التعديلات فيما يخص فرضيات تطبيق القوى المؤثرة وطريقة تحديد زوايا الانهيار . وحيث أن العديد من الدراسات اعتمدت النماذج الرياضية لأدوات الحراثة الرفيعة في حساب القوى عند تصميم محارث تحت التربة المزودة بأجنحة والعادية (Dula and Anawute, 2021; Kasisira, 2004; Makange et al, 2021; Mollazade et al, 2010; Meselhy, 2020; Yongchang et al, 2007). علماً أنه لا توجد أي دراسة مقارنة تؤكد إمكانية استخدامها لحساب القوى على محارث تحت التربة بشكل خاص.

في حين تمت العديد من الدراسات لمقارنة أداء النماذج القائمة على الأسلوب التحليلي وتحديد مدى كفاءتها في حساب قوى الجر والقوى الرأسية للعديد من أدوات الحراثة البسيطة بأبعاد وزوايا مختلفة وفي شروط عمل مختلفة وترتب متنوعة، بالإضافة إلى مقارنة هذه النماذج مع نتائج القياس الحقلية للمحارث الحفارة تحديداً (Mckyes, 1978؛ أبو الخير، 2018).

وتمت العديد من الدراسات المخبرية والحقلية للمقارنة بين نماذج أدوات الحراثة الرفيعة والقوى على المحاريث الحفارة باعتبارها تتدرج تحت هذا النوع من الأدوات، أكدت هذه الدراسات فعالية استخدام النماذج في تقدير القوى على هذا النوع من المحاريث (Afify et al, 2020). وجد Owen (1989) في دراسة تجريبية على محرات تحت التربة أن النموذج التحليلي (Mckyes 1977) نجح في تقدير القوى الأفقية ولكنه أعطى قيماً أكبر بكثير من القيم المقاسة بالنسبة للقوى الرأسية وذلك عند قيم مختلفة للسرعة وعند أعماق حراثة متفاوتة.

2- أهمية البحث، وأهدافه:

استخدمت العديد من الدراسات حول محرات تحت التربة نماذج أدوات الحراثة الرفيعة في حساب قوى الجر اللازمة لتصميم المحرات، علماً أنه لا يوجد دراسة مقارنة تؤكد فعالية استخدام هذه النماذج في حساب القوى المؤثرة على محرات تحت التربة بشكل خاص. فكان لا بد من هذه الدراسة لتحديد كفاءة النماذج الرياضية لأدوات الحراثة الرفيعة في التنبؤ بقوة الجر لمحاريث تحت التربة بأبعاد هندسية مختلفة وعند شروط عمل وفي تربة متنوعة، بالإضافة إلى تحديد مدى قابلية هذه النماذج للبرمجة الحاسوبية لاستخدامها لاحقاً كبرامج حاسوبية مستقلة في التصميم.

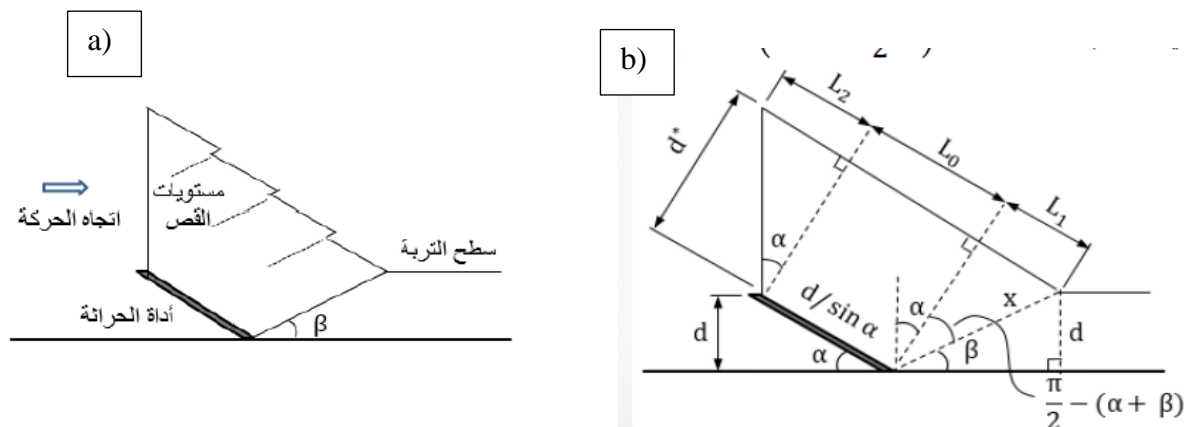
3- مواد البحث وطرائقه

اعتمدت مقارنة النماذج الأكثر استخداماً في تقدير قوى الجر مع هذا النوع من المحاريث، وتمت كتابة برامج حاسوبية باستخدام برنامج الماتلاب (Matlab Mathwork, 2016) والأكسل (Microsoft Excel, 2013)، بحيث تمكن هذه البرامج من دراسة أكبر عدد من المتغيرات وتسهيل عملية التقييم.

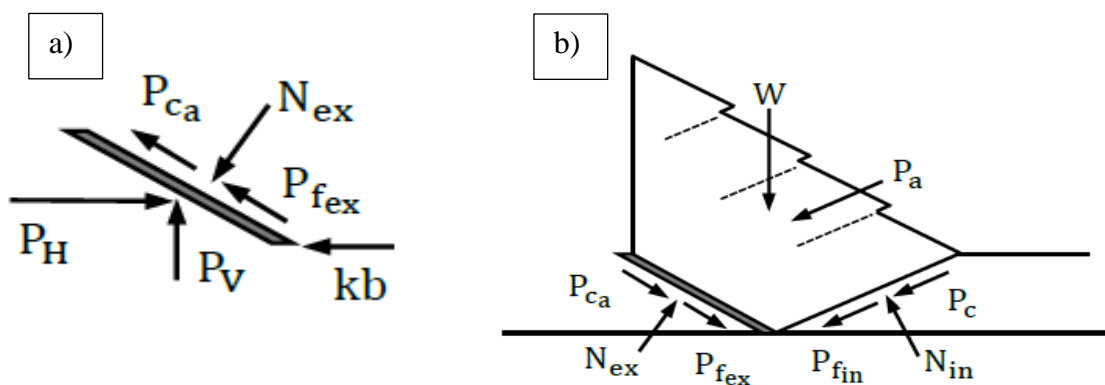
3-1-3 النماذج الرياضية المدروسة

3-1-3-1 نموذج Soehne (1957):

وضع الباحث Soehne عام 1957 نموذجاً لانتهيار التربة أمام أدوات الحراثة العريضة حيث أن الانتهيار بالنسبة لهذه الأدوات يكون أمامي فقط (Gill and Vandern, 1968)؛ قام (Onwualu 1991) بإضافة تأثير الانتهيارات الجانبية ليناسب النموذج أدوات الحراثة الرفيعة حيث أن الانتهيار الرئيسي أمام أداة الحراثة يترافق مع انهيارين جانبيين هلاليين بناءً على نموذج (Mckyes, 1977)، ولكنه افترض أن الشكل الهندسي للانتهيارات الجانبية يُحدّد بخطوط مستقيمة بدلاً من أقواس كما في نموذج Mckyes. للتبسيط اقترح Soehne تمثيل كتلة التربة أمام أداة الحراثة على شكل شبه منحرف بالأبعاد المبينة في الشكل (1) والتي تتكون فيها كتلة التربة من مستويات قص متعاقبة تصنع مع الأفق زاوية (β) ، أضاف Rowe and Barnes لاحقاً تأثير الالتصاق بين التربة وأداة الحراثة عند سطح الانتهيار الخارجي (P_{ca}) (Rowe and Barnes, 1961) (الشكل 2).



الشكل (1): (a) شكل انهيار التربة أمام أداة الحراثة (b): أبعاد الكتلة المنهارة



الشكل (2): (a) القوى المؤثرة على أداة الحراثة (b): القوى المؤثرة على كتلة التربة

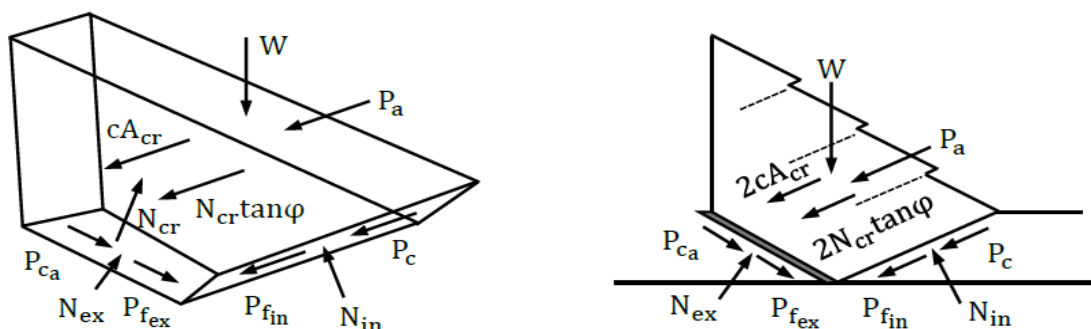
حيث Kb : مقاومة القطع وتنتج عن وجود بقايا نباتية وحجارة. N_{ex} : القوة الناعمة على سطح الانهيار الخارجي. N_{in} : القوة الناعمة على سطح الانهيار الداخلي. P_{ca} : القوة الناتجة عن التصاق التربة بأداة الحراثة. P_c : القوة الناتجة عن التماسك بين حبيبات التربة عند سطح الانهيار الداخلي. P_{fin} : القوة الناتجة عن الاحتكاك بين حبيبات التربة عند سطح الانهيار الداخلي. P_{dex} : القوة الناتجة عن الاحتكاك بين حبيبات التربة والأداة عند سطح الانهيار الخارجي. P_a : قوة العطالة وتكون موازية لمستويات القص. W : وزن شريحة التربة المنهارة. α : زاوية ميل أداة الحراثة. β : زاوية الانهيار والتي تحسب وفق العلاقة: $\beta = 45 - \frac{\phi}{2}$ (Gill and Vandern, 1968). وبإضافة القوى الناتجة عن تأثير الانهيارات الجانبية التي تظهر في أدوات الحراثة الرفيعة كما اقترح Onwualu (1991) إذ إنه عندما تتحرك أداة الحراثة تدفع التربة بعيداً عنها نحو الأمام وإلى الجوانب مما يمكن من تطبيق نظرية الضغوط المنفعلة (Terzaghi, 1943)، فتمتد الانهيارات الجانبية بثلاث قوى: القوى الناعمة على سطوح الانهيارات الجانبية (N_{cr})، وقوى الاحتكاك الناتجة عنها $N_{cr} \tan \phi$ ، بالإضافة إلى قوى التماسك عند هذه السطوح (cA_{cr}) (الشكل 3).

وبإضافة هذه القوى وأخذ معادلات التوازن لكل من أداة الحراثة وكتلة التربة بافتراض التربة لا تحتوي على حجارة أو بقايا نباتية وفق المحورين (x)، و(y) وبعد الإصلاح والتبسيط تحسب كل من القوة الأفقية والقوة الرأسية كما يلي:

$$P_H = \frac{W}{z} + \frac{P_c + 2cA_{cr} + 2N_{cr}\tan\varphi + P_a}{z(\tan\varphi\cos\beta + \sin\beta)} + \frac{P_{ca}}{z(\tan\delta\cos\alpha + \sin\alpha)} \quad (1)$$

$$P_V = \frac{(\cos\alpha - \tan\delta\sin\alpha)P_H - P_{ca}}{\tan\delta\cos\alpha + \sin\alpha} \quad (2)$$

حيث (z) معامل هندسي.



الشكل (3): تأثير القوى الناتجة عن الانهيارات الجانبية (3D)

2-1-3 نموذج Godwin and O'Dogherty (2007):

ينقسم الانهيار وفق هذا النموذج إلى منطقتين يفصل بينهما العمق الحرج، حيث يكون الانهيار بشكل هلال، مؤلف من انهيار رئيسي وانهيارين جانبيين في المنطقة فوق العمق الحرج، في حين يصبح الانهيار أمامي فقط تحت العمق الحرج (الشكل 4). وبالتالي تحسب القوة على مرحلتين: في المنطقة فوق العمق الحرج يكون الانهيار بشكل منحنى ويمتد من طرف أداة الحراثة حتى السطح العلوي. حدد الباحث مسافة الانهيار الأمامية (f) تجريبياً ربطاً مع زاوية ميل الأداة من مخططات، وهذا ما يجعل التعامل مع هذا النموذج صعباً من الناحية البرمجية، بالإضافة إلى اعتماد الباحث على علاقة Hettiaratchi لأدوات الحراثة العريضة في حساب القوة على جزء التربة أمام الأداة (الانهيار الرئيسي) والذي يتطلب تحديد العوامل اللابعدية من المخططات. ولتحديد القوى الناتجة عن الانهيارات الجانبية التي تشكل أفواس تحيط بالانهيار الرئيسي تم أخذ مقطع عنصري من التربة، وحساب القوة العنصرية عليه، ومن ثم بتطبيق التكامل على كامل زاوية الانهيار الجانبي (ρ) وبالإسقاط على اتجاه الحركة تكون القوة الأفقية والرأسية وفق العلاقتين (3) و(4) التاليين:

$$P_H = \left[(\gamma d^2 N_\gamma + cdN_c + qdN_q) \left(w + d \left(m - \frac{1}{3}(m-1) \right) \right) + \frac{\gamma v^2}{g} N_a d (w + 0.6d) \right] \sin(\alpha + \delta) \quad (3)$$

$$P_V = - \left[(\gamma d^2 N_\gamma + cdN_c + qdN_q) \left(w + d \left(m - \frac{1}{3}(m-1) \right) \right) + \frac{\gamma v^2}{g} N_a d (w + 0.6d) \right] \cos(\alpha + \delta) \quad (4)$$

حيث $N_a N_c N_q N_\gamma$ عوامل لابعدية تحسب من مخططات بدلالة زاوية الاحتكاك الداخلية (ϕ) وزاوية ميل أداة الحراثة (α) حيث تعطي المخططات قيمة كل من: (N_0) عندما ($\delta=0$)، و ($N\phi$) عندما ($\delta=\phi$)، ثم تطبق العلاقة التالية للحصول على قيمة (N) المطلوبة (Hettiaratchi and Recce, 1966; Hettiaratchi and Recce, 1974):

$$N = N_0 * \left[\frac{N_\phi}{N_0} \right]^{\frac{\delta}{\phi}} \quad (5)$$

m : نسبة الانهيار وتحسب بالعلاقة التجريبية: $m = \frac{f}{dc}$ حيث: f : مسافة الانهيار الأمامي، dc : العمق الحرج، w : عرض الأداة، d : عمق العمل، c : معامل التماسك في التربة، q : الضغط على سطح التربة، γ : الكثافة الظاهرية للتربة.

	الانهيار	زاوية	تحسب
	بالعلاقة:		
$\tan\beta = \frac{1}{m - \cot\alpha}$			(6)

وفي المرحلة الثانية من حساب القوة تحت العمق الحرج: اعتمد الباحث على علاقة Meyerhof

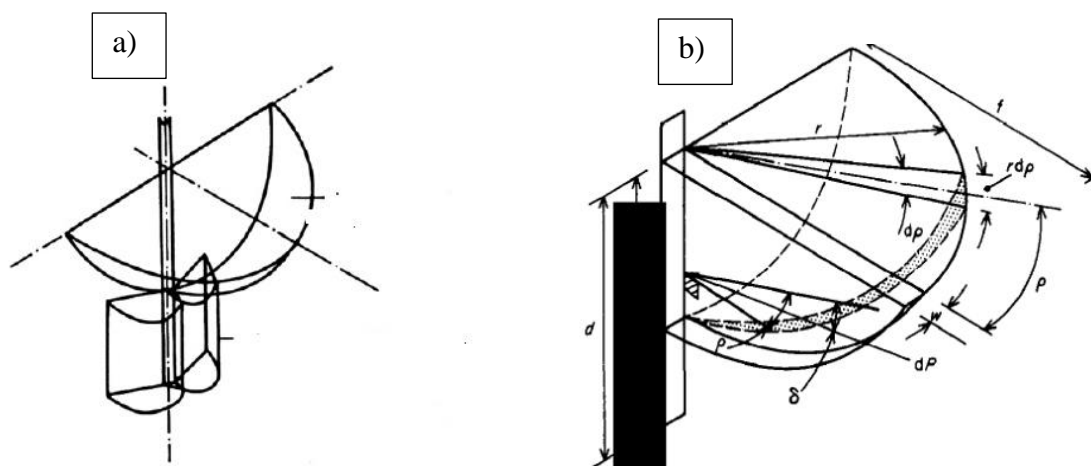
لأساسات العميقة في الهندسة المدنية في حساب Q و (Q) وفق العلاقة (Meyerhof, 1961) a b

$$Q = wcN'_c(d - d_c) + 0.5(1 - \sin\phi)\gamma wN'_q(d^2 \frac{1}{\alpha c}) \quad (7)$$

تؤخذ $N'_c N'_q$ من مخططات مرجعية وبالتالي تكون قوة السحب الكلية:

$$P_{HT} = P_H + Q$$

تم إنشاء ملف Excel spreadsheet للعلاقات السابقة في النموذج الأخير بسبب اعتماد الباحث عوامل لابعدية وقيم تجريبية وباعتبار المحراث يعمل فوق العمق الحرج فقط في حالتنا هذه، بالتالي تكون $P_{HT}=P_H$.



الشكل (4): (a) الانهيار العلوي الهلالي والانهيار السفلي الأمامي

(b) المقطع العنصري لحساب الانهيارات الجانبية

3-1-3 نموذج Mckyes and Ali (1977):

افترض الباحثان نموذجا ثلاثي الأبعاد لانهيار التربة حيث يتألف الشكل من انهيار رئيسي يمتد من طرف الأداة وحتى سطح التربة على شكل مستو وتشكل الانهيارات الجانبية أقواس على سطح التربة بنصف

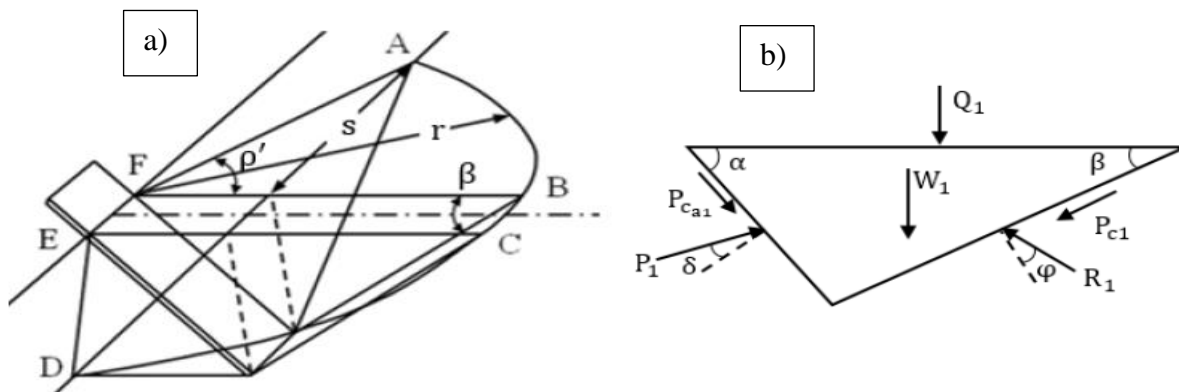
قطر انهيار (r) ومسافة انهيار جانبية (s) (الشكل 5-a). تم تقريب السطح السفلي للانهييار ليعتبر مستو بدلاً من منحن كما أن زاوية الانهييار (β) تم حسابها عند أصغر قيمة لمعامل الجاذبية (Nγ) بحيث تحقق العلاقة:

$$\frac{\partial N_\gamma}{\partial \beta} = 0 \quad (8)$$

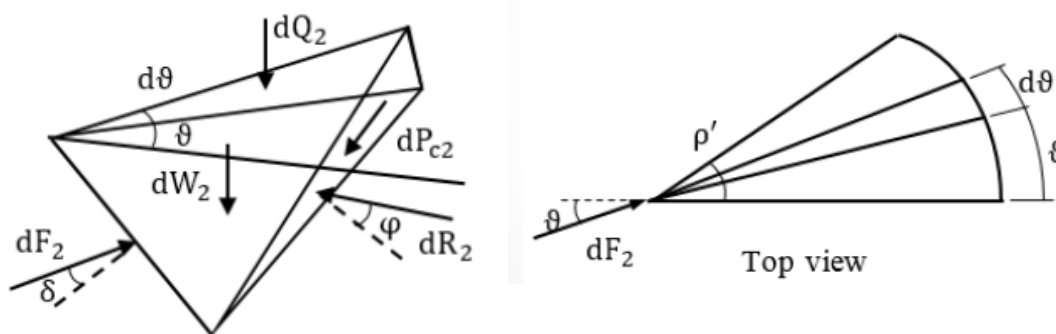
بأخذ معادلات التوازن للقوى المؤثرة على كتلة التربة نتيجة للانهييار الرئيسي تكون (P₁) (الشكل 5-b)

$$P_1 = \frac{W_1 + Q_1 + cdw(1 + \cot\beta \cot(\varphi + \beta)) + c_a dw(1 - \cot\beta \cot(\varphi + \beta))}{\cos(\alpha + \delta) + \sin(\alpha + \delta) \cot(\varphi + \beta)} \quad (9)$$

حيث W₁: وزن التربة، Q₁: الضغط على سطح التربة، والتماسك عند سطح الانهييار الداخلي (P_{c1})، والاحتكاك عند سطح الانهييار الداخلي والخارجي، حيث يميل رد الفعل (R₁): بزاوية (φ) والقوة (P₁) بزاوية (δ)، (P_{ca1}): قوى الالتصاق w: عرض الأداة، d: عمق الحراثة.



الشكل (5): (a) شكل انهيار التربة العام (b) القوى المؤثرة على كتلة التربة



الشكل (6): (a) القوى المؤثرة على المقطع العنصري (b) زاوية الانهييار الجانبي

ويتطبيق معادلات التوازن للقوى المؤثرة على الانهييارات الجانبية على مقطع عنصري يصنع زاوية (θ) مع مستوى الانهييار الأمامي، تكون القوة الناتجة عن الانهييارات الجانبية (P₂) بعد إسقاط القوة العنصرية (df₂) على مستوى الانهييار الأمامي وإجراء التكامل على كامل زاوية الانهييار الجانبي (ρ') (الشكل 6):

$$P_2 = \frac{(\frac{1}{6} \rho g d r^2 + \frac{1}{2} c r d (1 + \cot\beta \cot(\varphi + \beta)) + \frac{1}{2} q r^2) \sin \rho'}{\cos(\alpha + \delta) + \sin(\alpha + \delta) \cot(\varphi + \beta)} \quad (10)$$

فتكون القوة الكلية المؤثرة على أداة الحراثة (P):

$$P = P_1 + 2P_2 \quad (11)$$

والتي تكتب وفق المعادلة العامة لحركة التربة بالشكل:

$$P = (\rho g d^2 N_\gamma + cdN_c + qdN_q + c_a dN_{ca})w \quad (12)$$

علماً أن نصف قطر الانهيار (r) يحسب بالعلاقة:

$$r = d[\cot\alpha + \cot\beta] \quad (13)$$

وعرض الانهيار الجانبي (s) يحسب بالعلاقة:

$$s = d\sqrt{(\cot^2 \beta + 2\cot\alpha\cot\beta)} \quad (14)$$

وذلك بناء على الشكل الهندسي.

حيث N_γ N_c N_{ca} N_q عوامل لابعدية تحسب بعد مقارنة معادلة القوة الكلية (11) مع المعادلة العامة (12) وفق علاقات محددة بدلالة كل من زاوية الاحتكاك الداخلية (φ) والخارجية (δ) وزاوية الانهيار (β) وزاوية ميل الأداة (α) وعرض أداة الحراثة (w) وعمق الحراثة (d).

وقام Onwualu عام 1998 بإضافة حد العطالة (N_a) حيث v : تمثل سرعة أداة الحراثة لتصبح

المعادلة (12) بالشكل:

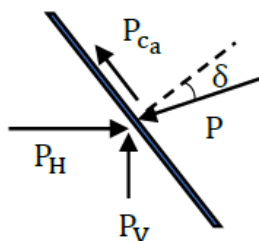
$$P = (\rho g d^2 N_\gamma + cdN_c + qdN_q + c_a dN_{ca} + \rho v^2 dN_a)w \quad (15)$$

ويتطبيق معادلات التوازن على أداة الحراثة وفق الشكل (7) تحسب القوة الأفقية _ قوة الجر (PH)

والقوة الشاقولية (PV) وفق العلاقتين (16) و (17):

$$P_H = P \sin(\alpha + \delta) + c_a d w \cot\alpha \quad (16)$$

$$P_V = P \cos(\alpha + \delta) - c_a d w \quad (17)$$



الشكل (7)

4-1-3 نموذج Swick and Perumpral (1988):

يفترض هذا النموذج شكل انهيار مشابه للنموذج السابق ولكن يختلف عنه في نقطتين أساسيتين: تم

حساب المسافة الجانبية للانهار بناء على علاقة تجريبية بناء عليه تحسب (s) وفق العلاقة:

$$s = -6.03 + 0.460r + 0.904\alpha \quad (18)$$

حيث (α): زاوية ميل الأداة، r: نصف قطر الانهيار التجريبي، وتم حساب زاوية الانهيار (β) بحيث

تؤدي للحصول على أصغر قيمة للقوة الكلية (P) وليس لقيمة معامل الجاذبية فقط كما في النموذج السابق أي:

$$\frac{\partial P}{\partial \beta} = 0 \quad (19)$$

تكون حسابات القوى كما في النموذج السابق مع أخذ الشكل الهندسي بعين الاعتبار.

2-3 التحقق من النماذج:

تمت مقارنة النتائج التي تعطيها النماذج مع القيم المقاسة حقلياً لقوة الجر والمنشورة في أعمال Owen عام 1988 حيث استخدم الباحث محراث تحت التربة العمودي (زاوية القصبية مع الأفق (90°)) والسلاح المزود بأجنحة ودرس تأثير السرعة ونوع التربة على قوة الجر عند قيم مختلفة للسرعة ضمن المجال $(2 - 0.2)$ m/s وفي نوعين من الترب الزراعية (تربة طينية وتربة رملية)، وفي تجربة لاحقة استخدم الباحث المحراث بالأبعاد نفسها مع تغيير عرض عمل الأجنحة $(w=26)$ cm, $(w=20)$ cm ربطاً مع تغيير العمق ضمن المجال $(14 - 47)$ cm وقام بقياس القوة حقلياً. كانت قيم قوى الجر في الحالة الأولى ضمن المجال $(20.3-22.6)$ KN في التربة الطينية وضمن المجال $(15-20)$ KN في التربة الرملية. بينما كانت قيم القوى عند تغيير عمق العمل $(3.5-28.8)$ KN عند عرض العمل $(w=20)$ cm و $(3.4-29.00)$ KN عند عرض عمل $(w=26)$ cm (Owen, 1988; Owen 1989).

أيضاً تمت مقارنة النتائج مع نتائج القياس الحقلية المنشورة في أعمال الباحث Aday shaker عام 2019، استخدم الباحث في تجاربه محراث تحت التربة ذو قصبية واحدة وقارن النتائج مع محراثين مطورين آخرين في تربة طينية لومية عند أعماق مختلفة $(30-40-50-60)$ cm ، كانت قيم القوى المقاسة ضمن المجال (Aday and Ramadhan, 2019)(10-30)KN.

تم حساب النسبة المئوية لانحراف القيم المحسوبة بالنماذج عن القيم المقاسة حقلياً $(Dev\%)$ وفق العلاقة (Onwualu and Watts, 1998):

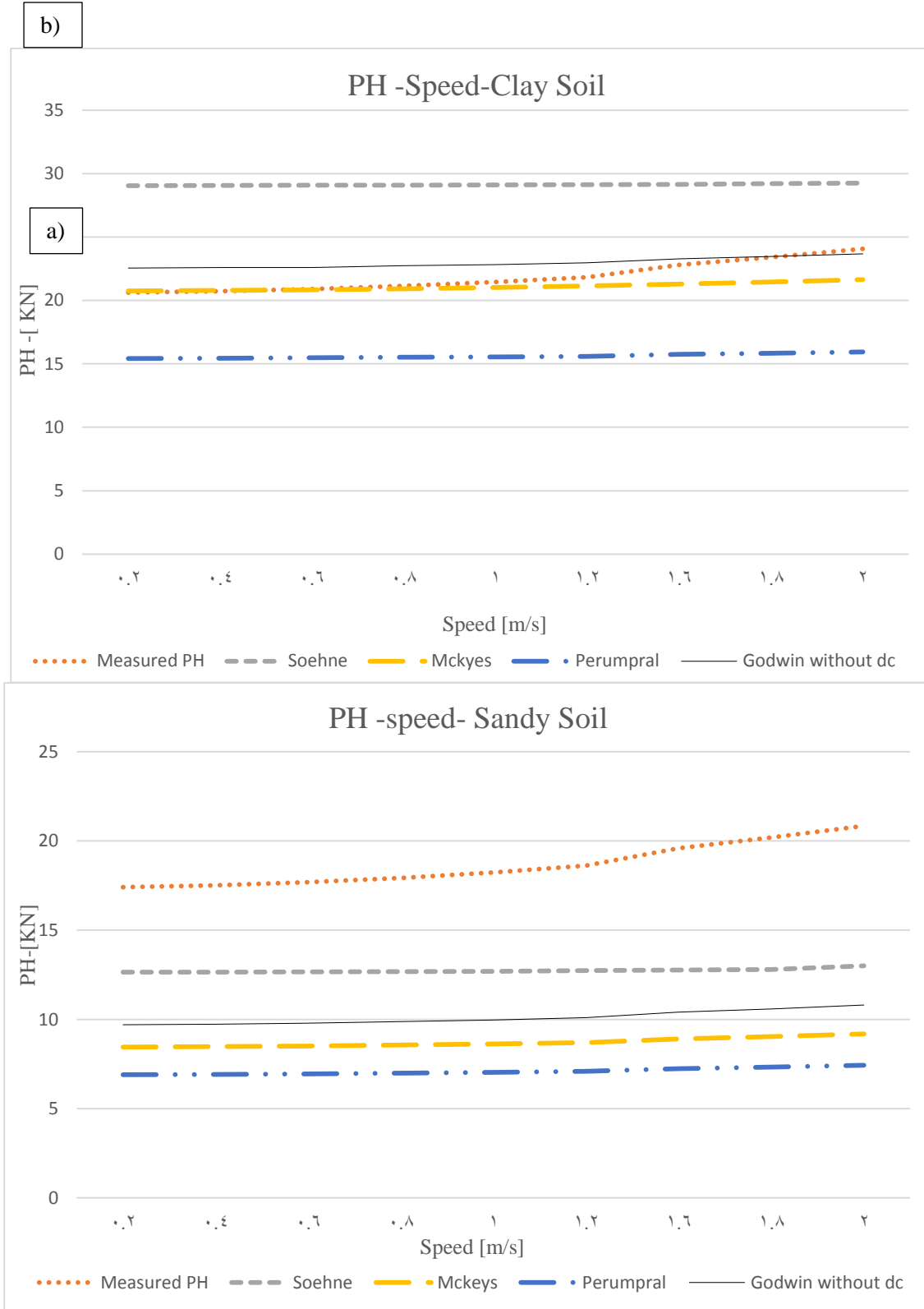
نسبة الانحراف المتوسطة $(Dev\%) = ((\text{القيم المقاسة تجريبياً} - \text{القيم المحسوبة وفق النموذج}) / \text{القيم المقاسة تجريبياً}) \times 100X$

4-النتائج والمناقشة:

4 - 1 تقييم أداء النماذج في الترب الطينية والرملية وعند قيم مختلفة لسرعات العمل:

إن أداء كل نموذج يختلف باختلاف نوع التربة وشروط العمل وبشكل عام يمكن القول إن النماذج تستطيع التنبؤ بقوة الجر اللازمة لعمل محراث تحت التربة. ففي الترب الطينية في تجارب Owen على محراث تحت التربة عند سرع عمل مختلفة، قدم Mckyes نموذجاً جيداً في تقدير قوة الجر للمحراث بنسبة انحراف صغيرة بلغت (3.61%) قياساً بالقوى الحقلية المقاسة عند سرع عمل مختلفة، بينما بلغت نسب الانحراف الوسطية (21.56%) في نموذج Soehne و (28.48%) في نموذج Perumpral في حين سجل نموذج Godwin قيمة انحراف (5.50%). أيضاً النموذج يعكس تأثير السرعة على تغير القوة بشكل جيد، بينت القوى التي يعطيها النموذج أن تأثير السرعة على مقدار تغير القوة كان بسيطاً، حيث أن تغير السرعة من 0.2m/s إلى 2m/s كان مقابلاً لتغير في القوة من 20.75KN إلى 21.87KN ، وهذا يوافق ما سجله Owen عملياً حيث أن تغير السرعة على المجال المذكور أدى إلى تغير في القوة مقداره 1.7KN أي تقريبا (8.5%) على كامل مجال السرعة (Owen, 1988) (الشكل 8-a).

أما في الترب الرملية فكان نموذج Soehne هو الأفضل من باقي النماذج في تقدير قوة الجر تحت سرع عمل مختلفة بنسبة انحراف وسطية بلغت (31.56%) في حين كانت نسب الانحراف الوسطية لبقية النماذج كما يلي: ((Perumpral (61.91%) - Mckyes (53.22%) - Godwin (45.79%) بمقارنة نسب الانحرافات الوسطية للنماذج في الترب الرملية مع القيم المقابلة في الترب الطينية يتضح أن كفاءة النماذج في تقدير قوى الجر في الترب الطينية أفضل منها في الترب الرملية. يوضح الشكل (8-b) أن قيم القوى التي تقدمها النماذج بشكل عام كانت أقل من القيم المقاسة حقلياً يرجع السبب إلى التبسيط الذي يتبعه كل نموذج في حسابات الشكل الهندسي وفرضيات حساب زوايا الانهيار لكل نموذج بشكل مختلف بالإضافة إلى أن النماذج لا تأخذ الرطوبة بعين الاعتبار.



الشكل (8): (a) مقارنة القيم المحسوبة مع القيم المقاسة في التربة الطينية عند سرعات عمل مختلفة

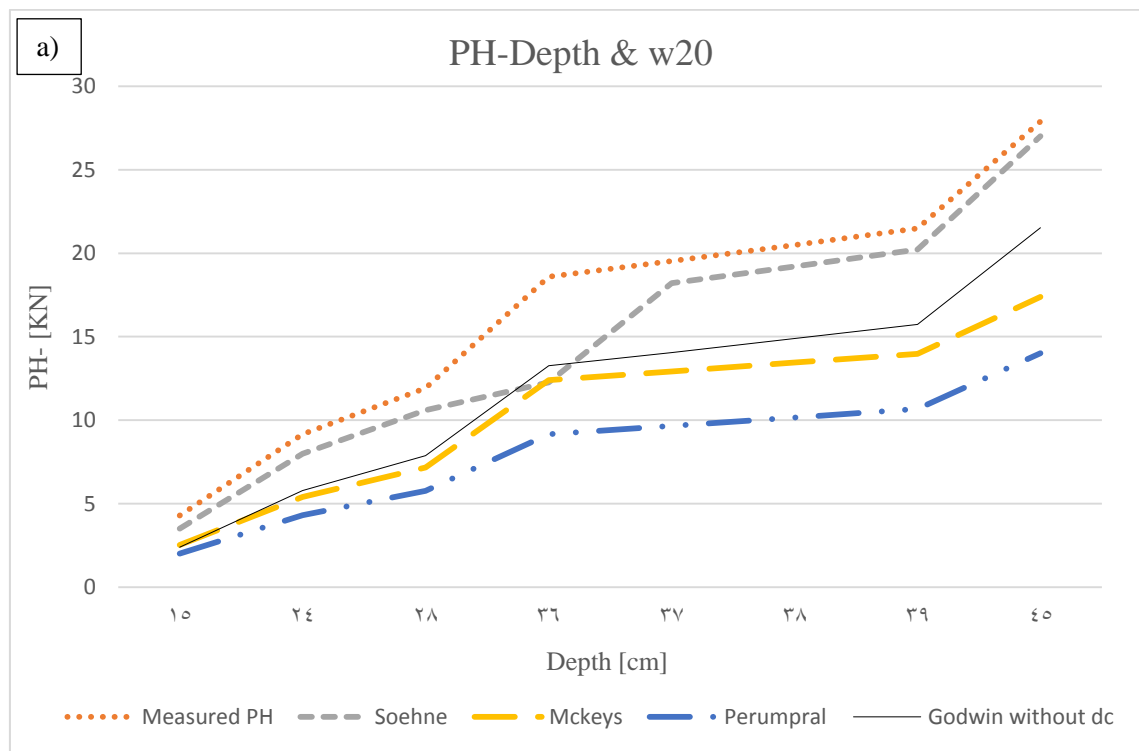
(b) مقارنة القيم المحسوبة مع القيم المقاسة في التربة الرملية عند سرعات عمل مختلفة

2-4 تقييم أداء النماذج في الترب الطينية وعند أعماق عمل مختلفة:

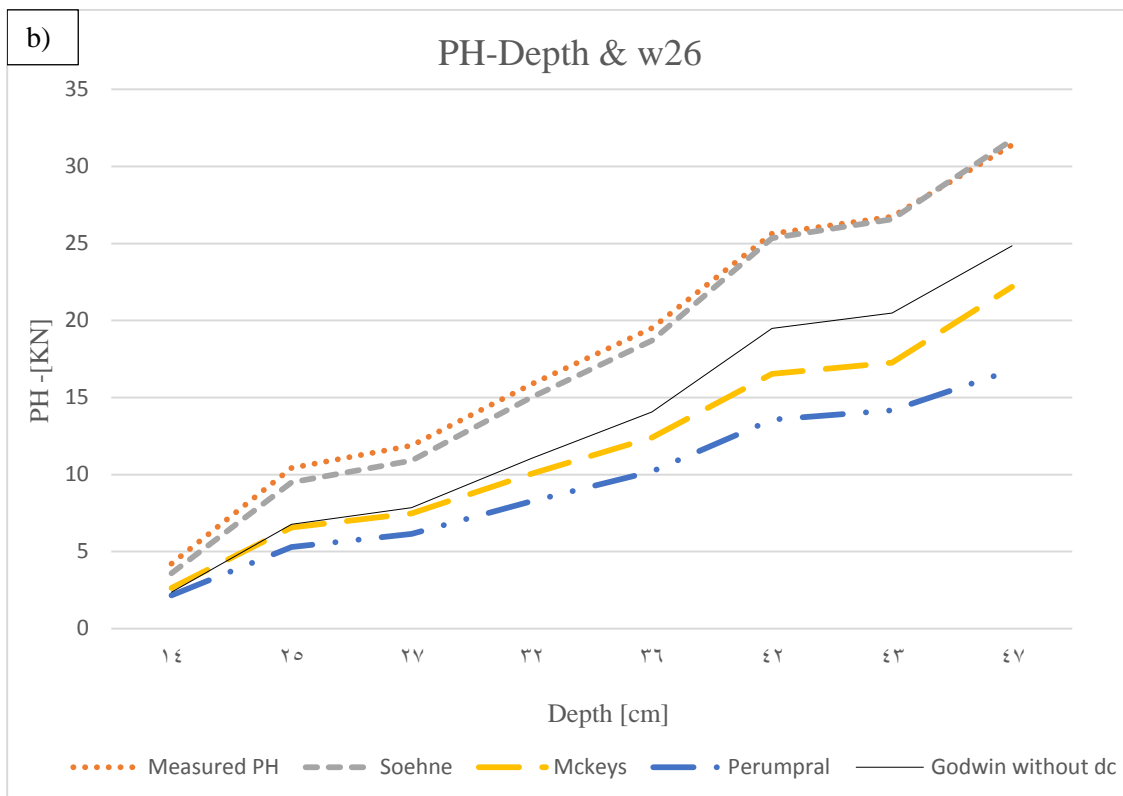
وبمقارنة أداء النماذج عند استخدام المحراث على أعماق عمل مختلفة وعند قيمتين لعرض عمل السلاح في تربة طينية

كانت قيم الانحرافات الوسطية للنماذج عند عرض عمل (w=20)cm: على الشكل التالي: - (Soehne (12.93%))

((Godwin (31.87%) - Mckyes (37.44%) - Perumpral (51.46%) (الشكل 9-a)، في حين سجلت النماذج قيم الانحرافات التالية عند عرض عمل السلاح (w=26)cm : Godwin (8.98%) - Soehne (45.17%) - Perumpral (32.30%) - Mckyes (24.85%) (الشكل 9-b)، وبمقارنة القيم التي تعطيها النماذج مع القيم الحقلية المقاسة عند أعماق عمل مختلفة أظهرت النتائج مقدرة نموذج Soehne على محاكاة تأثير العمق على مقدار تغير القوة بشكل موافق للقيم التجريبية فعندما (w=20)cm أعطى نموذج Soehne مقدار تغير القوة بين قيمة صغيرة (3.5)KN وقيمة كبرى (27.02)KN وذلك على كامل مجال تغير العمق من (15)cm حتى (45)cm وجاءت متوافقة مع القيم الحقلية حيث كان مجال تغير القوة عملياً (3.5-28.8)KN، وفي الحالة الثانية عندما (w=26)cm أعطى نموذج Soehne مقدار تغير القوة بين قيمة صغيرة (3.6)KN وقيمة كبرى (31.73)KN وذلك على كامل مجال تغير العمق من (14)cm حتى (47)cm وجاءت متوافقة مع القيم الحقلية حيث كان مجال تغير القوة عملياً (3.4-29.0)KN؛ كذلك نموذج Godwin أعطى تغيراً في قيمة القوة متوافقاً مع التغير الفعلي حقلياً حيث كان مجال التغير بين قيمة صغيرة (2.36)KN وقيمة كبرى (24.85)KN بالنسبة لعرض العمل (w=26)cm وبشكل مشابه لعرض العمل (w=20)cm حيث أعطى النموذج عند أقل قيمة للعمق قوة مقدارها (2.39)KN وعند أكبر قيمة للعمق أكبر قيمة للقوة (21.52)KN. مما سبق نستنتج أن نموذج Soehne يعكس التأثير الفعلي لتغير العمق على قيمة قوة الجر بينما نموذج Mckyes كان الأفضل في تقدير تأثير السرعة على قوة الجر في الترب الطينية، ونموذج Godwin أيضاً قدم نتائج مقارنة بنسب مقبولة لمختلف ظروف العمل أي لا يمكن القول إن نموذجاً هو الأفضل بعينه.



الشكل (9-a): مقارنة القيم المحسوبة مع القيم المقاسة عند أعماق حرادة مختلفة وعرض عمل للسلاح (20cm) في تربة طينية



الشكل (9-b): مقارنة القيم المحسوبة مع القيم المقاسة عند أعماق حراثة مختلفة وعرض عمل للسلاح (26cm) في تربة طينية
 الشكل (9): مقارنة القيم المحسوبة مع القيم المقاسة عند أعماق حراثة مختلفة في تربة طينية

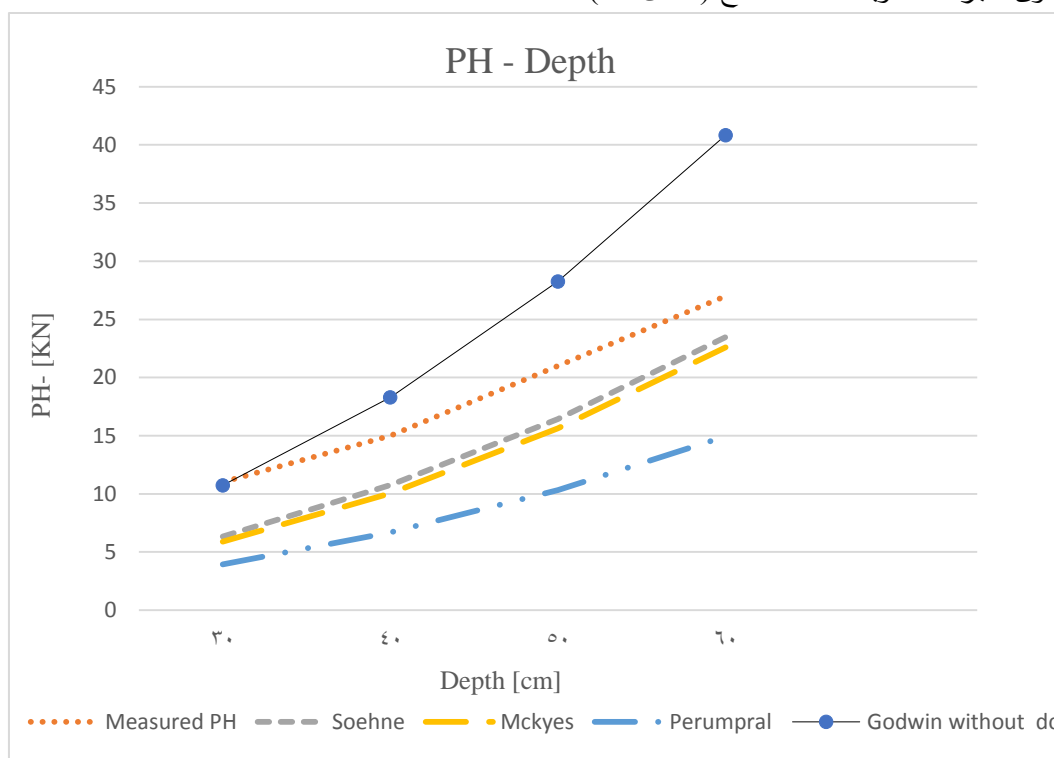
4 - 3 تقييم أداء النماذج عند أعماق عمل مختلفة في تربة طينية لومية:

وبمقارنة النتائج التي تعطيها النماذج مع القيم المقاسة حقلياً في التربة الطينية اللومية في بحث Aday، كانت قيم النسب المئوية للانحرافات: (Godwin (23.22%) - Soehne (26.37%) - Mckyes (30.36%) - Perumpral (53.79%))

حيث سجل نموذج (Godwin) أقل قيمة للنسبة المئوية لانحراف القيم المحسوبة عن القيم المقاسة؛ وهذا يتفق مع ما وجدته Machado and Trein حيث قام الباحثان باختبار عدة نماذج رياضية لتقييم أدائها في حساب قوى الجر على أدوات الحراثة الرفيعة في ظروف تربة طينية لومية محلياً وذلك عند مستويات مختلفة لأعماق الحراثة، خلصت الدراسة بأن نموذج (Godwin) من النماذج التي ينصح باستخدامها لحساب قوى الجر على أدوات الحراثة الرفيعة في ظروف التربة المختبرة محلياً، وقد سجل توافقاً كبيراً مع قيم قوى الجر المقاسة حقلياً وذلك مقارنة بكل من نموذج (Mckyes) ونموذج (Perumpral) (Machado and Trein, 2013).

كذلك نلاحظ أن نموذج (Godwin) أعطى قيمة أعلى لقوى الجر المحسوبة مقارنة مع باقي النماذج وهذا يعود إلى صفات التربة المستخدمة كمدخلات والتي تحدد قيم العوامل اللابعدية، والذي أدى بدوره إلى زيادة قيم القوى المحسوبة بشكل ملحوظ عند الأعماق الكبيرة من (50)cm إلى (60)cm إذ إنه بالإضافة إلى صفات التربة المستخدمة كمدخلات والتي أعطت قيمة مرتفعة للعوامل اللابعدية وبالتالي للقوة الناتجة عن الانهيار الرئيسي فإن الطريقة التي يفرضها النموذج لحساب القوى الناتجة عن الانهيارات الجانبية والتي ترتبط بعمق العمل بشكل أساسي ساهمت في هذه الزيادة بنسبة كبيرة كما تظهر العلاقة (3).

أبدت النماذج تأثيراً متماثلاً في التحقق من تأثير تغير العمق على قيم قوى الجر حيث بزيادة العمق زادت قيم قوى الجر المحسوبة لكافة النماذج (الشكل 10).



الشكل (10): مقارنة القيم المحسوبة مع القيم المقاسة عند أعماق مختلفة في تربة طينية لومية

5-الاستنتاجات:

- يمكن استخدام النماذج الرياضية المدروسة لتقدير قوى الجر على محراث تحت التربة المزود بأجنحة بكفاءة مقبولة.
- إن قيم القوى التي تقدمها النماذج بشكل عام كانت أقل من القيم المقاسة حقيقياً، ويرجع السبب إلى التبسيط الذي يتبعه كل نموذج في حسابات الشكل الهندسي وفرضيات حساب زوايا الانهيار لكل نموذج بشكل مختلف.
- إن أداء النماذج المدروسة كان أفضل في التربة الطينية مقارنة مع التربة الرملية عند قيم مختلفة للسرعة.
- إن أداء النماذج المدروسة في التربة الطينية والتربة الطينية اللومية يعد جيداً بشكل عام وذلك عند مستويات مختلفة للأعماق.
- تقدم النماذج التي لم تتجاوز قيمة متوسط نسبة الانحراف فيها (40%) محاكاة جيدة لدراسة تأثير كل من السرعة، والعمق، وعرض عمل الأجنحة على مقدار تغير قيمة قوة الجر.

6- التوصيات:

- نوصي باستخدام النماذج الرياضية لأدوات الحراثة الرفيعة لحساب قوى الجر على محراث تحت التربة في التربة الطينية والتربة الطينية اللومية.

المراجع العلمية:

- (1)-أبو الخير، (2018). الأسلوب التحليلي في حساب قوى الحراثة. المجلة السورية للبحوث الزراعية (6) 354-335
- (2)-**Afify, M.T ; AL-Haddad, Z.A and Darwish, L (2020)**. *Modelling the effect of soil-tool interaction on draft force using Visual Basic*. Annals of Agric.sciMoshtohor.58(2).pp: 223-232
- (3)- **Askari, M; Shahgholi, Gh and Abbaspour, Y (2017)**. *The effect of tine, wing operational depth and speed on the draft force of Subsoil tillage tines*. Prog. Agric Eng. Sci. 63,160-167.
- (4)- **Aday, Sh and Ramadhan, M.N (2019)**. *Comparision between draft force and the disturbed area of a single tine ,parallel double tine and partially swerved double tines subsoilers*. soil & tillage research.191.pp: 238-244
- (5)-**Aday, Sh. (2011)**- *Prediction of the draft force and Energy utilization efficiency of longitudinally arranged double tine subsoiler*.17th international conference of the ISFTVS USA Blackbury.pp:80-100
- (6)-**Ahmadi, I. (2016)**-*Effect of soil, machine, working state parameters on the required draft force of a subsoiler using a theoretical draft calculating model*, CSIRO.
- (7)-**Balaton, J. (1989)**- *Dimensioning and draft force requirement for subsoiler*. H Budabest. 161-170.
- (8)-**Dula, M.W and Anawute, A.D. (2021)**. *Design of subsoiler for deep tillage operation of compacted soil due to heavy duty agricultural machinery traffic on the field..* middle east journal of applied science and technology.4. pp: 30-50.
- (9)- **Dedousis, TH. and Bartzanas, TH. (2010)**. *Soil Engineering*. Volume(20) Springer. New York. pp:3-17.
- (10)- **Gill, W.R. and Vandern Berg, G.E. (1986)**. *Soil dynamics in tillage and traction*. Agricultural Handbook No.316 Agricultural Research Service , United states Department of Agriculture (USDA). Pp.126-140.
- (11)-**Godwin, R.J. and Spoor, G. (1977)**. *Soil failure with narrow tines*. J.Agric.Engng.22 pp 213-288
- (12)- **Godwin, R.J. and O'Dogherty, M.J.(2007)**. *Integrated soil tillage forces prediction models*. Journal of Terramechanics. 44:3-14.
- (13)- **Hettiaratchi, D.R.P and Reece, A.R. (1966)** *Calculation of passive pressure in two-dimensional soil failure*. J.agric.Engng Res 11(2). pp:89-107.
- (14)-**Hettiaratchi, D.R.P and Reece, A.R. (1974)**. *The calculation of passive soil resistance*. Geotechnique. 24, No.3, pp: 289-310.

- (15)-**Jiang, X; Tong, J; Yuanhai, Ma and Jiyu, S. (2020)**-*Development and verification of a mathematical model for the specific resistance of a curved subsoiler.* Biosystem Engineering.pp:107-119
- (16)-**Kasisira, L.L (2004).** *Force modelling and energy optimization of subsoiler in tandem.* Phd thesis .university of Pretoria
- (17)-**Mckyes, E (1985).** *Soil cutting and Tillage .* Mc Donald collage of McGill university, Canada, book: pp: 57-60.
- (18)-**Mollazade, K; Jafari, A and Ebrahimi, E. (2010).** *Application of Dynamical Analysis to Choose Best Subsoiler's Shape using ANSYS.* New York science Journal.3(3) .pp: 93-100
- (19)-**Makange, N.R ; Changying, J.I; Nyalala.I; Sunusi, II and Opyyo, S .(2021).** *Prediction of precise subsoiling based on analytical method, discrete element method and experimental from soil bin.* scientific report.
- (20)- **Meselhy, A.A. (2020).** *Effect of the tillage depth division and vibration on subsoiler performance.* plant Archives.20.pp: 3548-3567.
- (21)-**Mckyes, E. (1978).** *The calculation of Draft force and Soil failure Boundaries of narrow cutting blades.* Transaction of the ASAE.pp: 20-24.
- (22)-**Meyerhof, G.G. (1961).** *The ultimate bearing capacity of the wedge- shaped foundations .* 5th international conference on soil mechanic and foundation engineering, vol 2 Division 3B DUNOD Paris .
- (23)- **Mckyes, E and Ali, O.S (1977).** *The cutting of soil by narrow blades.* Journal of Terramechanics 14 pp: 43-58
- (24)- **Machado, T.A and Trein, C.R (2013).** *Draft prediction models for soil engaging tines in two soils of Rio Grande do Sul , Brazil.* Eng. Agric, Jaboticabal,33(1),pp:167-175.
- (25)- **Owen, G.T (1988).** *Subsoiling forces and tool speed in compact soils.* Canadian Agricultural Engineering.pp: 15-20
- (26)- **Owen, G.T (1989).***Force-depth relationship in a pedogenetically compacted clay loam soil.* American society of agricultural Engineering.5(2).pp:185-191
- (27)- **Onwualu, A.P and Watts, K.S (1998).** *Draught and vertical forces obtained from dynamic soil cutting by plane tillage tool.* Soil&tillage research .48 pp: 239-253.
- (28)-**Onwualu, A.P.(1991).** *Tillage tool factors affecting sandy soil interactions with plane blades in soil bin.* PH.D thesis Technical university of Nova Scotia. Halifax, Canada.

(29)-**Payne, P.C.J. (1956).***The relationship between the mechanical properties of soil and the performance of simple cultivation implements.* J. Agric . Eng. Res. 1:23-50.

(30)-**Rowe, R.J and Barnes, K.K(1961).** *Influence of speed on elements of draft of a tillage tool.* Transactions of the ASAE 4:55-57.

(31)-**Reece. (1965).** *The fundamental equation of earth moving mechanics.* Symposium on Earth moving Machinery, Institute of Mechanical Engineers 179. Part 3f. London.

(32)- **Swick, W.S and Perumpral, J.V (1988).** *A model for predicting soil – tool interaction.* Journal of Terramechanics.25. pp: 43-56.

(33)-**Smith, DLO; Godwin,R.J and Spoor, G. (1989).** *Modelling soil disturbance due to tillage and traffic.* In: Larson WE et al., editors. Mechanic and related processes in structured agricultural soils, Netherlands.Kluwer Academic publisher.p p:36-121.

(34)-**Simon, O and Manuwa, I.S. (2018).** *Subsoiler development trend in the alleviation of soil compaction for sustainable agricultural production.* International Journal of Engineering Inventions. 7(8).pp:29-38.

(35)- **Topacki, M; Celik, H.K; Canakci, M and Rennie, A. (2010).** *Deep tillage tool optimization by means of finite element method: case study of a subsoiler tine.* Journal of food, Agriculture & environment. 8(2):pp:531-536.

(36)-**Terzaghi, K (1943).** *Theoretical soil mechanics.* Wiley. New York.

(37)- **Yongchang, Y.U; Liu, W.; Zhao, Y and Sun, J. (2007).** *Force mathematical model and examination analysis of the column subsoiler.* Transaction of the CSAE.23.(6).pp: 109-113