

حساب قوى الحراثة باستخدام الأسلوب التحليلي

عبد الكريم أبو الخير⁽¹⁾

(1). قسم الهندسة الريفية، كلية الزراعة، جامعة حلب، سورية.

(*للمراسلة: د. عبد الكريم أبو الخير. البريد الإلكتروني: a.aboalkheer@hotmail.com).

تاريخ القبول: 2018/09/29

تاريخ الاستلام: 2018/05/14

الملخص

تم في هذا البحث حساب قوى الحراثة باستخدام ثلاثة نماذج تعتمد على الأسلوب التحليلي. يقوم النموذج الأول على فرضية Soehne في انهيار التربة وقد تم إدخال بعض التعديلات لإضافة قوة الالتصاق وقوة العطالة وتأثير الانهيارات الجانبية. يعتمد النموذج الثاني على فرضية McKyes and Ali وقد تم إضافة قوة الالتصاق وقوة العطالة وتم حساب زاوية الانهيار بالاعتماد على نظرية ضغوط التربة المنفعلة. يركز النموذج الثالث على نتائج Swick and Perumpral للذان قاما بتطوير النموذج الذي اقترحه Perumpral وزملاؤه. تُوضح نتائج مقارنة القيم المحسوبة وفقاً لهذه النماذج مع القيم التجريبية أن أداء كل نموذج يختلف باختلاف عوامل نظام الحراثة، وبشكل عام كانت نتائج النموذج الثاني أفضل من نتائج النموذجين الأول والثالث. تم في هذا البحث أيضاً استخدام Multimodel Ensemble Prediction Method (MEPM) بالاعتماد على النماذج الثلاثة السابقة ومقارنة النتائج مع القيم التجريبية، وقد لوحظ بأن النتائج التي تعطيها هذه الطريقة أفضل من نتائج كل نموذج بشكل مستقل.

الكلمات المفتاحية: قوى الحراثة، أداة الحراثة، انهيار التربة، عوامل نظام الحراثة.

المقدمة:

إن معرفة قيم واتجاهات القوى الناتجة عن انهيار التربة أمام أدوات الحراثة، والتي تسمى بقوى الحراثة أو قوى مقاومة التربة، ضروري لكل من المزارعين ومصممي الآلات الزراعية (Desbiolles *et al.*, 1997). إن هذه المعرفة تمكن المزارعين من اختيار الآلات الزراعية المناسبة للعمليات الزراعية المختلفة، كما أن تحديد القوى المؤثرة على الآلات يعتبر خطوة ضرورية لنجاح عملية التصميم. تتأثر قوى الحراثة بمجموعة من العوامل، تسمى بعوامل نظام الحراثة، وتقسّم إلى ثلاثة مجموعات رئيسية: المجموعة الأولى ترتبط بالخصائص الهندسية للتربة، والمجموعة الثانية تتعلق بالشكل الهندسي لأداة الحراثة، أما المجموعة الثالثة فإنها تعود إلى ظروف العمل (Abo Al-kheer, 2010).

يمكن التمييز بين ثلاثة أساليب رئيسية لحساب قوى الحراثة هي: الأسلوب التحليلي والأسلوب العددي والأسلوب التجريبي (Abo Al-kheer *et al.*, 2011). يعتبر الأسلوب التحليلي من أولى الأساليب المتبعة لحساب قوى الحراثة، وقد استخدم بشكل واسع من قبل العديد من الباحثين في هذا المجال نظراً لبساطته وسهولة تطبيقه بالمقارنة مع الأساليب الأخرى (Jayasuriya and Salokhe, 2001). يعتمد هذا الأسلوب على افتراض شكل معين لانهيار التربة أمام أداة الحراثة بناءً على الملاحظات التجريبية، ومن ثم تطبيق

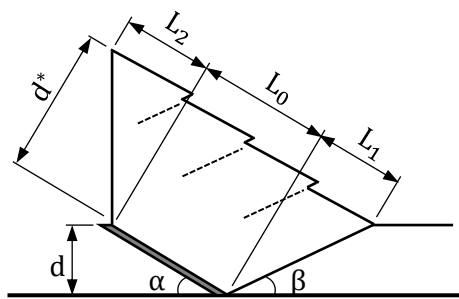
McKyes and Ali, 1977; Godwin and Spoor, 1977;) معادلات التوازن على أداة الحراثة وكتلة التربة أثناء عملية الانهيار (Grisso *et al.*, 1980; Kuczewski and Piotrowska, 1998; Godwin and O'Dogherty, 2007). إن الاختلاف الرئيسي بين هذه النماذج يعود إلى شكل انهيار التربة أمام أداة الحراثة والطريقة التي يتبعها كل باحث لتبسيط شكل الانهيار ومن ثم تطبيق معادلات التوازن. تستخدم طريقة العناصر المنتهية Finite Element Method وطريقة العناصر المنفصلة Discrete Element Method لحساب قوى الحراثة وفق الأسلوب العددي (Mouazen and Neményi, 1998)، ويعتبر هذا الأسلوب صعب من الناحية البرمجية ويحتاج إلى معرفة عميقة في الرياضيات وعلوم الحاسوب (Mouazen and Neményi, 1999). يتم في الأسلوب التجريبي إيجاد العلاقات بين عوامل نظام الحراثة وقوى الحراثة تجريبياً من خلال تكرار التجربة لعدد من المرات. من سيئات هذا الأسلوب هو التكاليف المرتفعة والوقت اللازم لإجراء التجارب فضلاً عن كون النتائج التي نحصل عليها وفق هذا الأسلوب تبقى محلية وترتبط بشروط التجربة (Desbiolles *et al.*, 1997).

إن الهدف الرئيسي لهذا البحث هو حساب قوى الحراثة وفقاً لثلاثة نماذج تعتمد على الأسلوب التحليلي، وقد تم إدخال بعض التعديلات على النموذجين الأول والثاني، ومن ثم مقارنة قيم قوى الجر المحسوبة وفقاً لهذه النماذج بالنسبة لعوامل مختلفة من نظام الحراثة مع القيم التجريبية من أجل تحديد كفاءة كل نموذج، وكذلك استخدام Multimodel Ensemble Prediction Method (MEPM) بالاعتماد على هذه النماذج ومقارنة نتائج هذه الطريقة مع القيم التجريبية.

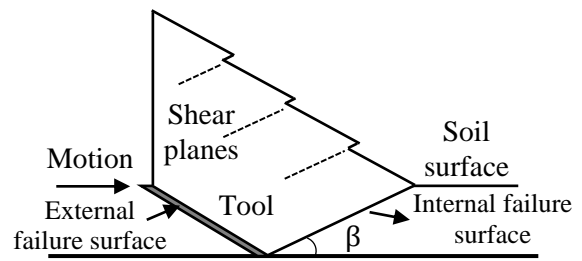
مواد البحث وطرائقه:

1- حساب قوى الحراثة:

النموذج الأول: يعتمد هذا النموذج على فرضية Soehne في انهيار التربة، فقد اقترح هذا العالم في عام 1957 بأن انهيار التربة أمام أداة الحراثة يكون على شكل مستويات قص متعاقبة وتصنع زاوية β مع سطح التربة (Gill and Vandern Berg, 1968)، كما هو موضح في الشكل (1). لتبسيط الدراسة فقد اقترح Soehne بأن يكون انهيار كتلة التربة أمام أداة الحراثة على شكل شبه منحرف بالأبعاد الموضحة في الشكل (2).

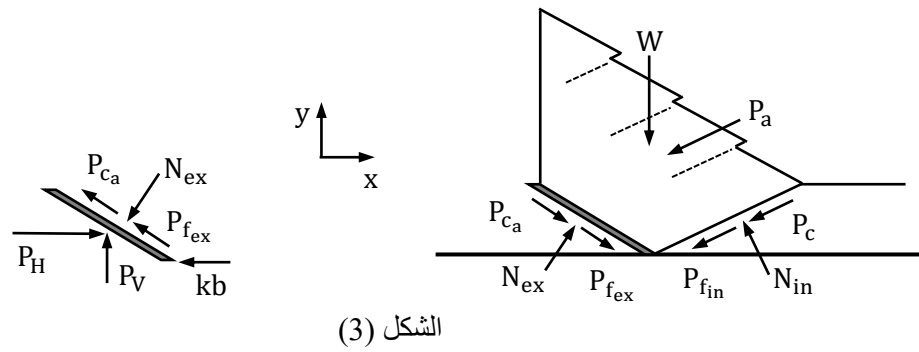


الشكل (2)



الشكل (1)

عند دراسة القوى المؤثرة على أداة الحراثة وكتلة التربة، أخذ Soehne بعين الاعتبار تأثير وزن كتلة التربة المنهارة وتماسك حبيبات التربة والاحتكاك بين هذه الحبيبات عند سطح الانهيار الداخلي وتأثير قوة العطالة، وفيما بعد أضاف Rowe and Barnes (1961) تأثير الالتصاق بين حبيبات التربة وأداة الحراثة عند سطح الانهيار الخارجي. يوضح الشكل (3) القوى المؤثرة على كتلة التربة وأداة الحراثة.



الشكل (3)

لحساب القوة الأفقية المؤثرة على أداة الحراثة P_H والقوة الشاقولية P_V ، قام Soehne بتطبيق معادلات التوازن على أداة الحراثة وكتلة التربة الموضحة في الشكل (3)، على الشكل التالي:

$$P_H - kb - P_{f_{ex}} \cos \alpha - N_{ex} \sin \alpha - P_{Ca} \cos \alpha = 0 \quad (1)$$

$$P_V + P_{f_{ex}} \sin \alpha - N_{ex} \cos \alpha + P_{Ca} \sin \alpha = 0 \quad (2)$$

$$P_{f_{ex}} \cos \alpha + N_{ex} \sin \alpha + P_{Ca} \cos \alpha - P_{f_{in}} \cos \beta - N_{in} \sin \beta - P_C \cos \beta - P_a \cos \beta = 0 \quad (3)$$

$$N_{ex} \cos \alpha - P_{f_{ex}} \sin \alpha - P_{Ca} \sin \alpha - P_{f_{in}} \sin \beta + N_{in} \cos \beta - P_C \sin \beta - P_a \sin \beta - W = 0 \quad (4)$$

kb : مقاومة قطع التربة وتؤثر على طرف أداة الحراثة وتنتج عن وجود حجارة أو بقايا نباتية، N_{ex} : القوة النازمية المؤثرة على سطح الانهيار الخارجي، N_{in} : القوة النازمية المؤثرة على سطح الانهيار الداخلي، P_{Ca} : القوة الناتجة عن التصاق كتلة التربة بأداة الحراثة، P_C : القوة الناتجة عن التماسك بين حبيبات التربة عند سطح الانهيار الداخلي، $P_{f_{in}}$: القوة الناتجة عن الاحتكاك بين حبيبات التربة عند سطح الانهيار الخارجي، P_a : قوة العطالة الناتجة عن حركة كتلة التربة بعد الانهيار وقد افترض Soehne بأنها موازية لسطح الانهيار الداخلي، W : وزن كتلة التربة المنهارة، α : زاوية ميل أداة الحراثة بالنسبة لسطح التربة، β : زاوية الانهيار.

تُحسب القوى المؤثرة على سطح الانهيار الداخلي ($P_{f_{in}}, P_C$) والخارجي ($P_{f_{ex}}, P_{Ca}$) وفق العلاقات التالية:

$$P_C = cA_{in} = c \frac{wd}{\sin \beta} \quad (5)$$

$$P_{f_{in}} = \mu_{in} N_{in} = \tan \varphi N_{in} \quad (6)$$

$$P_{Ca} = c_a A_{ex} = c_a \frac{wd}{\sin \alpha} \quad (7)$$

$$P_{f_{ex}} = \mu_{ex} N_{ex} = \tan \delta N_{ex} \quad (8)$$

c : معامل التماسك بين حبيبات التربة، A_{in} : مساحة سطح الانهيار الداخلي، w : عرض أداة الحراثة، d : عمق الحراثة، μ_{in} : معامل الاحتكاك بين حبيبات التربة، φ : زاوية الاحتكاك بين حبيبات التربة عند سطح الانهيار الداخلي وتسمى بزاوية الاحتكاك الداخلية،

c_a : معامل الالتصاق بين حبيبات التربة وأداة الحراثة، A_{ex} : مساحة سطح الانهيار الخارجي، μ_{ex} : معامل الاحتكاك بين حبيبات التربة وأداة الحراثة، δ : زاوية الاحتكاك بين حبيبات التربة وأداة الحراثة عند سطح الانهيار الخارجي وتسمى بزاوية الاحتكاك الخارجية. بحل المعادلات من (1) حتى (4) حلاً مشتركاً ومع الأخذ بعين الاعتبار المعادلات من (5) حتى (8)، وبإهمال تأثير قوة مقاومة قطع التربة k_b على افتراض أن التربة لا تحتوي على حجارة أو بقايا نباتية، تم الحصول على علاقة القوة الأفقية P_H والقوة الشاقولية P_V على الشكل التالي:

$$P_H = \frac{W}{z} + \frac{P_c + P_a}{z(\tan \varphi \cos \beta + \sin \beta)} + \frac{P_{c_a}}{z(\tan \delta \cos \alpha + \sin \alpha)} \quad (9)$$

$$P_V = \frac{(\cos \alpha - \tan \delta \sin \alpha)P_H - P_{c_a}}{\tan \delta \cos \alpha + \sin \alpha} \quad (10)$$

حيث: z معامل هندسي يُحسب وفق العلاقة التالية:

$$z = \frac{\cos \alpha - \tan \delta \sin \alpha}{\sin \alpha + \tan \delta \cos \alpha} + \frac{\cos \beta - \tan \varphi \sin \beta}{\sin \beta + \tan \varphi \cos \beta} \quad (11)$$

يمكن حساب وزن التربة W بدلالة كثافة التربة ρ وحجم التربة المنهارة وفق العلاقة التالية:

$$W = \rho g w A_f \quad (12)$$

حيث: A_f يمثل مساحة المقطع العرضي للانهارام الأمامي ويساوي:

$$A_f = d^* \left(L_0 + \frac{L_1 + L_2}{2} \right) \quad (13)$$

تُحسب الأطوال L_0 ، L_1 ، L_2 ، d^* بناءً على شكل انهيار التربة (الشكل 2) وفق المعادلات التالية:

$$L_0 = \frac{d}{\sin \alpha} \quad L_1 = d \frac{\cos(\alpha + \beta)}{\sin \beta} \quad L_2 = d^* \tan \alpha \quad d^* = d \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\sin \beta}$$

لحساب قوة العطالة P_a المؤثرة على أداة الحراثة نتيجة حركة كتلة التربة، أفترض Soehne أنه في اللحظة الابتدائية تكون السرعة معدومة وقام بحساب القوة P_a بعد فترة زمنية عندما تصبح سرعة أداة الحراثة تساوي v من خلال تطبيق قانون نيوتن الثاني وتوصل إلى العلاقة التالية:

$$P_a = \rho w d v^2 \frac{\sin \alpha}{\sin(\alpha + \beta)} \quad (14)$$

نلاحظ من الشكل (1) أن سطح الانهيار الداخلي يصنع زاوية β مع سطح التربة، وقد قام Soehne بحساب قيمة هذه الزاوية بدلالة زاوية الاحتكاك الداخلية وفق العلاقة التالية:

$$\beta = 45 - \varphi/2 \quad (15)$$

نلاحظ بأن هذا النموذج لا يأخذ بعين الاعتبار تأثير الانهيارات الجانبية على القوى المؤثرة على أداة الحراثة، لذلك قام Onwualu (1991) بتطوير هذا النموذج وإضافة تأثير الانهيارات الجانبية بناءً على أعمال Terzaghi and Peck (1967) و Mckyes (1985) من خلال إضافة قوة N_{cr} على جانبي كتلة التربة الأمامية (الشكل 4) وقام بحساب قيمة هذه القوة بالاعتماد على نظرية رانكين لضغوط التربة المنفصلة وفق المعادلة التالية:

$$N_{cr} = \frac{1}{3} \rho g K_p d A_{cr} \quad (16)$$

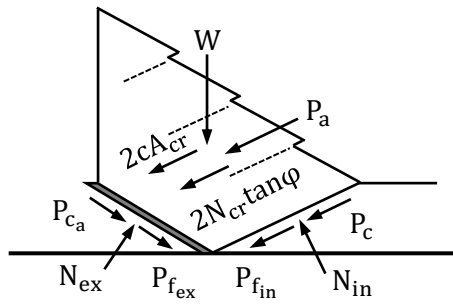
حيث: A_{cr} هي مساحة سطح الانهيار الجانبي و K_p يمثل معامل ضغط التربة المنفعل الذي يُحسب وفق المعادلة التالية:

$$K_p = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (17)$$

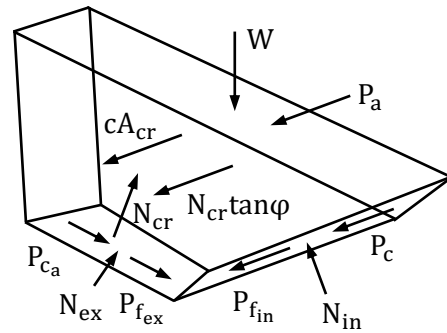
افترض (1991) Onwualu أن A_{cr} يساوي مساحة المقطع العرضي للانهيار الامامي (المعادلة 13)، وهذا يعني أن تأثير الانهيارات الجانبية على قوى الحراثة يستمر حتى بعد انهيارها وحركتها نحو الأعلى وهذا يؤدي إلى زيادة تأثير الانهيارات الجانبية على قوى الحراثة بشكل غير مبرر. إن القوى الجانبية N_{cr} تؤثر على كتلة التربة الأمامية لحظة الانهيار وقبل حركة الانهيارات الجانبية نحو الأعلى، لذلك فقد تم في هذا البحث حساب قيمة A_{cr} وفق العلاقة التالية:

$$A_{cr} = \frac{1}{2} d^2 (\cot \alpha + \cot \beta) \quad (18)$$

نتيجةً لذلك سوف تظهر على السطوح الجانبية للانهيار القوة $N_{cr} \tan \varphi$ الناتجة عن احتكاك حبيبات التربة مع بعضها عند سطوح الانهيار الجانبية والقوة cA_{cr} الناتجة عن تماسك حبيبات التربة مع بعضها عند هذه السطوح. بإضافة تأثير القوى الناتجة عن الانهيارات الجانبية فإن القوى المؤثرة على كتلة التربة تصبح كما هو موضح في الشكل (5).



الشكل (5)



الشكل (4)

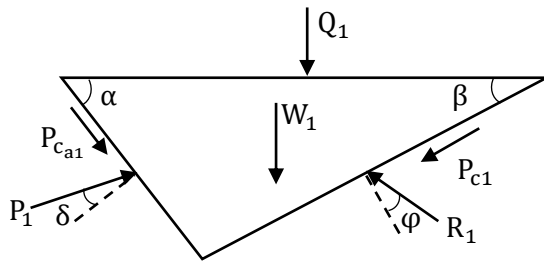
بدراسة توازن كتلة التربة وأداة الحراثة كما هو موضح سابقاً يتم الحصول على علاقة القوة الأفقية P_H وفق الشكل التالي:

$$P_H = \frac{W}{z} + \frac{P_c + 2cA_{cr} + 2N_{cr} \tan \varphi + P_a}{z(\tan \varphi \cos \beta + \sin \beta)} + \frac{P_{ca}}{z(\tan \delta \cos \alpha + \sin \alpha)} \quad (19)$$

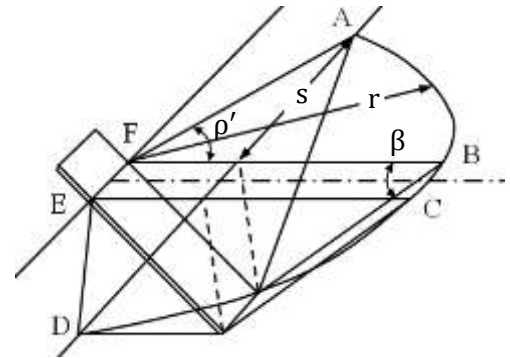
وتبقى علاقة القوة الشاقولية P_V كما هي معطاة في المعادلة (10).

النموذج الثاني: يعتمد هذا النموذج على فرضية (1977) McKyes and Ali الذين افترضوا أن انهيار التربة أمام أداة الحراثة يأخذ شكل ثلاثي الأبعاد، كما هو موضح في الشكل (6)، وإن سطح الانهيار الداخلي الذي يمتد من طرف أداة الحراثة حتى سطح التربة يأخذ شكل مستوي ويصنع زاوية β مع سطح التربة، وإن الانهيارات الجانبية تصنع أقواس (AB, CD) مع سطح التربة بنصف قطر r وتتوضع عند الطرف الأمامي لسطح الانهيار (BC) الذي له نفس عرض أداة الحراثة w ، وعرض الانهيار الجانبي يساوي s . إن القوى المؤثرة على كتلة التربة نتيجة الانهيار الأمامي، الشكل (7)، تشمل تأثير كلاً من وزن التربة W_1 والضغط على سطح التربة Q_1 والتماسك عند

سطح الانهيار الداخلي P_{c1} والاحتكاك عند سطحي الانهيار الداخلي والخارجي، حيث أن رد الفعل R_1 عند سطح الانهيار الداخلي يميل بزاوية φ أما القوة P_1 فتتميل بزاوية δ ، وفيما بعد أضاف (1985) McKyes تأثير الالتصاق عند سطح الانهيار الخارجي P_{ca1} .



الشكل (7)



الشكل (6)

لحساب القوة P_1 تم تطبيق معادلات التوازن على القوى المؤثرة على كتلة التربة نتيجة الانهيار الأمامي على الشكل التالي:

$$P_1 \sin(\alpha + \delta) + P_{ca1} \cos \alpha - P_{c1} \cos \beta - R_1 \sin(\varphi + \beta) = 0 \quad (20)$$

$$P_1 \cos(\alpha + \delta) - P_{ca1} \sin \alpha - P_{c1} \sin \beta + R_1 \cos(\varphi + \beta) - W_1 - Q_1 = 0 \quad (21)$$

بحل المعادلتين (20) و (21) ومع الأخذ بعين الاعتبار المعادلات (5) و (7) تم الحصول على علاقة القوة P_1 :

$$P_1 = \frac{W_1 + Q_1 + cdw(1 + \cot\beta \cot(\varphi + \beta)) + c_a dw(1 - \cot\beta \cot(\varphi + \beta))}{\cos(\alpha + \delta) + \sin(\alpha + \delta) \cot(\varphi + \beta)} \quad (22)$$

يُحسب وزن التربة W_1 والقوة الناتجة عن الضغط على سطح التربة Q_1 وفق المعادلتين التاليتين:

$$W_1 = \frac{1}{2} \rho g w d^2 (\cot\alpha + \cot\beta) \quad (23)$$

$$Q_1 = q w d (\cot\alpha + \cot\beta) \quad (24)$$

حيث: q تمثل الضغط على سطح التربة.

بأخذ مقطع عنصري $d\theta$ من الانهيار الجانبي يصنع زاوية θ مع مستوي الانهيار الأمامي، كما هو موضح في الشكل (8)، وبتطبيق

معادلات التوازن يتم الحصول على القوة العنصرية dF_2 على الشكل التالي:

$$dF_2 \sin(\alpha + \delta) - dP_{c2} \cos \beta - dR_2 \sin(\varphi + \beta) = 0 \quad (25)$$

$$dF_2 \cos(\alpha + \delta) - dP_{c2} \sin \beta + dR_2 \cos(\varphi + \beta) - dW_2 - dQ_2 = 0 \quad (26)$$

حيث أن dP_{c2} هي قوة التماسك بين حبيبات التربة عند سطح الانهيار الداخلي للمقطع العنصري و dQ_2 هي القوة الناتجة عن الضغط

السطحي و dW_2 هي وزن المقطع العنصري وتساوي:

$$dP_{c2} = \frac{c r d \theta d}{2 \sin \beta} \quad (27)$$

$$dQ_2 = \frac{1}{2} r^2 q d \theta \quad (28)$$

$$dW_2 = \frac{1}{6} \rho g d r^2 d \theta \quad (29)$$

بحل المعادلتين (25) و (26) مع الأخذ بعين الاعتبار المعادلات (27) و (28) و (29) نحصل على:

$$dF_2 = \frac{\left(\frac{1}{6} \rho g d r^2 + \frac{1}{2} c r d (1 + \cot \beta \cot (\varphi + \beta)) + \frac{1}{2} q r^2\right) d \theta}{\cos (\alpha + \delta) + \sin (\alpha + \delta) \cot (\varphi + \beta)} \quad (30)$$

بإسقاط القوة العنصرية dF_2 على مستوي الانهيار الأمامي (الشكل 9) وبإجراء التكامل على كامل زاوية الانهيار الجانبي ρ' نحصل على:

$$P_2 = \frac{\left(\frac{1}{6} \rho g d r^2 + \frac{1}{2} c r d (1 + \cot \beta \cot (\varphi + \beta)) + \frac{1}{2} q r^2\right) \sin \rho'}{\cos (\alpha + \delta) + \sin (\alpha + \delta) \cot (\varphi + \beta)} \quad (31)$$

إن القوة الكلية المؤثرة على أداة الحراثة هي مجموع القوى التي تؤثر على الأداة نتيجة الانهيار الأمامي والانهيارين الجانبيين:

$$P = P_1 + 2P_2 \quad (32)$$

بتعويض المعادلتين (22) و (31) في المعادلة (32) ومع الأخذ بعين الاعتبار المعادلات (23) و (24) وأن $\sin \rho' = s/r$ وبعد الإصلاح نحصل على:

$$P = \frac{\left[\frac{1}{2} \rho g r \left(1 + \frac{2s}{3w}\right) + c \left(1 + \frac{s}{w}\right) \frac{\cos (\varphi)}{\sin (\beta_r) \sin (\beta_r + \varphi)} - c_a \frac{\cos (\alpha + \beta_r + \varphi)}{\sin (\alpha) \sin (\beta_r + \varphi)} + q \left(1 + \frac{s}{w}\right) \frac{r}{d} + \gamma v^2 \left(1 + \frac{s}{w}\right) \left(\tan (\alpha) + \frac{\cot (\beta_r + \varphi)}{\tan (\beta_r) \cot (\alpha)} \right) \right] dw}{\cos (\alpha + \delta) + \sin (\alpha + \delta) \cot (\beta_r + \varphi)} \quad (33)$$

قام McKyes and Ali (1977) بحساب نصف قطر الانهيار الجانبي r وعرض الانهيار الجانبي s بناءً على الشكل الهندسي للانهيار (الشكل 6) وفق المعادلتين التاليتين:

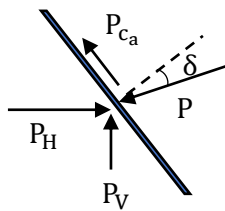
$$s = d \sqrt{\cot^2 (\beta) + 2 \cot (\alpha) \cot (\beta)} \quad (34)$$

$$r = d [\cot (\alpha) + \cot (\beta)] \quad (35)$$

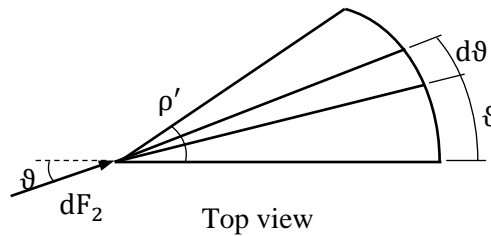
لحساب القوة الأفقية والشاقولية المؤثرة على أداة الحراثة، تم تطبيق معادلات التوازن على القوى المؤثرة على أداة الحراثة (الشكل 10):

$$P_H = P \sin (\alpha + \delta) + c_a d w \cot (\alpha) \quad (36)$$

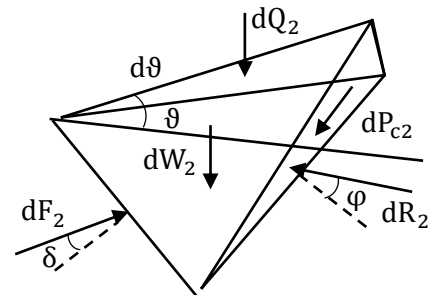
$$P_V = P \cos (\alpha + \delta) - c_a d w \quad (37)$$



الشكل (10)



الشكل (9)



الشكل (8)

تُكتب المعادلة (33) وفق المعادلة العامة لحركة التربة (Reece, 1965) على الشكل التالي:

$$P = (\rho g d^2 N_\gamma + c d N_c + q d N_q + c_a d N_{ca}) w \quad (38)$$

حيث أن: $N_\gamma, N_c, N_q, N_{ca}$ هي عوامل لا بعدية وتعطى وفق المعادلات التالية:

$$N_\gamma = \frac{[r/2d][1 + 2s/3w]}{\cos(\alpha + \delta) + \sin(\alpha + \delta) \cot(\beta + \varphi)} \quad (39)$$

$$N_c = \frac{[1 + \cot(\beta) \cot(\beta + \varphi)][1 + s/w]}{\cos(\alpha + \delta) + \sin(\alpha + \delta) \cot(\beta + \varphi)} \quad (40)$$

$$N_q = \frac{[r/d][1 + s/w]}{\cos(\alpha + \delta) + \sin(\alpha + \delta) \cot(\beta + \varphi)} \quad (41)$$

$$N_{ca} = \frac{[1 - \cot(\alpha) \cot(\beta + \varphi)]}{\cos(\alpha + \delta) + \sin(\alpha + \delta) \cot(\beta + \varphi)} \quad (42)$$

قام McKyes and Ali (1977) بحساب زاوية الانهيار β عن طريق حساب القيمة الأصغرية لمعامل الجاذبية N_γ ، أي: $\partial N_\gamma / \partial \beta = 0$. نلاحظ أن هذا النموذج لا يأخذ بعين الاعتبار تأثير قوة العطالة الناتجة عن سرعة العمل، لذلك قام Onwuvalu and Watts (1998) بإضافة حد جديد إلى المعادلة (38) لتصبح المعادلة على الشكل التالي:

$$P = (\rho g d^2 N_\gamma + c d N_c + q d N_q + c_a d N_{ca} + \rho v^2 d N_a) w \quad (43)$$

حيث أن v تمثل سرعة أداة الحراثة أو سرعة العمل و N_a عبارة عن معامل لا بعدي يسمى بمعامل العطالة Inertia coefficient ويحسب وفق المعادلة التالية:

$$N_a = \frac{[\tan(\beta) + \cot(\beta + \varphi)][1 + s/w]}{[\cos(\alpha + \delta) + \sin(\alpha + \delta) \cot(\beta + \varphi)][1 + \tan(\beta) \cot(\alpha)]} \quad (44)$$

توصل Zhang and Kushwaha (1995) إلى أن زاوية الانهيار β ترتبط بالقوة الكلية P وليس فقط بمعامل الجاذبية N_γ لذلك فقد تم في هذا البحث تحديد قيمة زاوية الانهيار على أساس القيمة الصغرى للقوة الكلية، أي: $\partial P / \partial \beta = 0$.

النموذج الثالث: يعتمد هذا النموذج على نتائج Swick and Perumpral (1988) الذين قاما بتطوير النموذج الذي اقترحه Perumpral *et al.*, 1983. يفترض هذا النموذج أن انهيار التربة أمام أداة الحراثة يأخذ شكل ثلاثي الأبعاد وكذلك فإنه يأخذ بعين الاعتبار قوى العطالة الناتجة عن سرعة أداة الحراثة. يوضح الشكل (11) القوى المؤثرة على كتلة التربة نتيجة الانهيار الأمامي. للحصول على القوة P_1 المؤثرة على أداة الحراثة نتيجة الانهيار الأمامي، تم تطبيق معادلات التوازن على القوى المؤثرة على أداة الحراثة وفق الشكل التالي:

$$P_1 \sin(\alpha + \delta) + P_{ca1} \cos \alpha + R_1 \sin \beta - (P_{c1} + P_{f1} + P_{a1}) \cos \beta = 0 \quad (45)$$

$$P_1 \cos(\alpha + \delta) - P_{ca1} \sin \alpha + R_1 \cos \beta - (P_{c1} + P_{f1} + P_{a1}) \sin \beta - W_1 - Q_1 = 0 \quad (46)$$

تم حساب قوة التماسك عند سطح الانهيار الداخلي P_{c1} وقوة الالتصاق عند سطح الانهيار الخارجي P_{ca1} وقوة العطالة P_{a1} وفق العلاقات (5) و (7) و (14) على التوالي. بحل المعادلتين (45) و (46) حلاً مشتركاً ومع الأخذ بعين الاعتبار العلاقات (5) و (7) و (14) وأن $P_{f1} = R_1 \tan \delta$ و $W_1 = \rho g w d r / 2$ و $Q_1 = q w r$ نحصل على:

$$P_1 = \frac{-P_{ca1} \cos(\alpha + \beta + \varphi) + (W_1 + Q_1) \sin(\beta + \varphi) + (P_{c1} + P_{a1}) \cos \varphi}{\sin(\alpha + \beta + \varphi + \delta)} \quad (47)$$

للحصول على القوة المؤثرة على أداة الحراثة نتيجة الانهيارات الجانبية، تم تطبيق معادلات التوازن على القوى المؤثرة على جزء عنصري من كتلة التربة نتيجة الانهيار الجانبي (الشكل 12):

$$dF_2 \sin(\alpha + \delta) - dR_2 \sin \beta + (dP_{c2} + dP_{f2} + dP_{a2}) \cos \beta = 0 \quad (48)$$

$$dF_2 \cos(\alpha + \delta) + dR_2 \cos \beta - (dP_{c2} + dP_{f2} + dP_{a2}) \sin \beta - dW_2 - dQ_2 = 0 \quad (49)$$

حيث: dF_2 القوة المؤثرة على أداة الحراثة نتيجة انهيار الجزء العنصري والتي تميل على خط عمل أداة الحراثة بزاوية θ (الشكل 9)، عند سطح الانهيار الداخلي على التوالي، وتُحسب وفق العلاقات التالية:

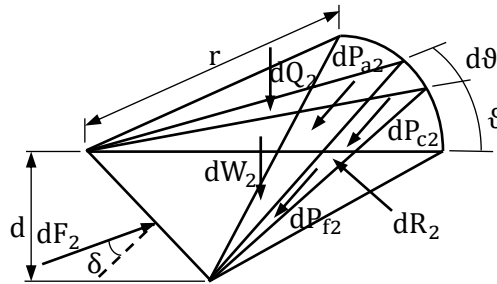
$$dP_{c2} = \frac{crd}{2\sin\beta} d\theta \quad (50)$$

$$dP_{f2} = dR_2 \tan\delta d\theta \quad (51)$$

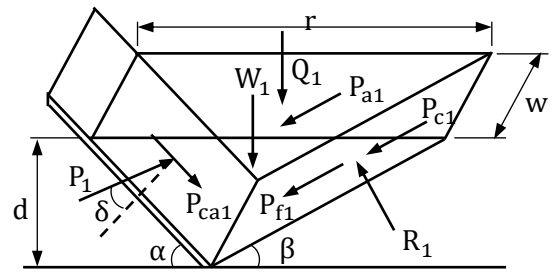
$$dP_{a2} = \frac{1}{2} \rho d r v^2 \frac{\sin\alpha}{\sin(\alpha + \beta)} d\theta \quad (52)$$

$$dW_2 = \frac{1}{6} \rho g d r^2 d\theta \quad (53)$$

$$dQ_2 = \frac{1}{2} q r^2 d\theta \quad (54)$$



الشكل (12)



الشكل (11)

بحل المعادلتين (48) و (49) حلاً مشتركاً ومع الأخذ بعين الاعتبار المعادلات من (50) حتى (54) وبإجراء التكامل على كامل زاوية الانهيار الجانبي ρ' وبالإسقاط على خط سير عمل الأداة نحصل على:

$$P_2 = \frac{(W_2 + Q_2) \sin(\beta + \varphi) \sin \rho' + P_{a2} \cos \varphi \left(\frac{\rho'}{2} + \sin \left(\frac{\rho'}{2} \right) \right) + P_{c2} \cos \varphi \sin \rho'}{\sin(\alpha + \beta + \varphi + \delta)} \quad (55)$$

تُحسب القوة الكلية المؤثرة على أداة الحراثة نتيجة الانهيار الأمامي والانهيارين الجانبيين وفق العلاقة (32). أوجد Swick and Perumpral (1988) علاقة تجريبية لحساب مسافة الانهيار الأمامي وفق المعادلة التالية:

$$s = -6.03 + 0.460r + 0.904\alpha \quad (56)$$

وكذلك قاموا بحساب زاوية الانهيار الجانبية ρ' وفقاً للشكل الهندسي للانهيار وفق المعادلة التالية:

$$\rho' = \arcsin (s/r) \quad (57)$$

أخيراً تم حساب زاوية الانهيار β وفق هذا النموذج بالاعتماد على نظرية ضغوط التربة المنفعلة، حيث أن β يجب أن تؤدي إلى الحصول على أصغر قيمة للقوة الكلية P .

2-التحقق من نتائج النماذج المستخدمة:

للتحقق من مدى مطابقة نتائج النماذج المستخدمة في هذا البحث مع القيم التجريبية تمت مقارنة قيم قوى الجر المحسوبة وفقاً لهذه النماذج مع القيم المقاسة تجريبياً والمنشورة في أعمال (Mckyes and Desir (1984) و (Onwualu and Watts (1998). قام (Mckyes and Desir (1984) بقياس قوى الجر في الحقل بالنسبة لنوعين من الترب (طينية وطينية-رملية) في الحالة الرطبة والجافة بالنسبة لزاويتي ميل لأداة الحراثة ($\alpha_1 = 20^\circ, \alpha_2 = 35^\circ$) وعند ثلاثة قيم لعرض أداة الحراثة ($w_1 = 6.3\text{cm}, w_2 = 12.5\text{cm}, w_3 = 20\text{cm}$) وعند مستويين لعمق الحراثة ($d_1 = 15\text{cm}, d_2 = 25\text{cm}$) وكان المجموع الكلي للقراءات الحقلية 46 قراءة. أما (Onwualu and Watts (1998) فقد قاموا بقياس قوى الجر في حوض اختبار يحتوي على تربة سلتية رملية من أجل نوعين من أدوات الحراثة ($w_1 = 5.1\text{cm}, w_2 = 25.4\text{cm}$) وعند مستويين لعمق الحراثة ($d_1 = 11.4\text{cm}, d_2 = 22.9\text{cm}$) وعند ثمان قيم لسرعة العمل تتراوح من 0.25 m/s إلى 2 m/s وبفاصل 0.25 m/s ، وكان المجموع الكلي للقراءات المخبرية 36 قراءة.

4-التحليل الإحصائي:

لمقارنة قيم قوى الجر المحسوبة وفقاً للنماذج الرياضية مع القيم التجريبية، تم استخدام المؤشرات الإحصائية التالية (Wösten *et al.*, 2001؛ Donatelli *et al.*, 2004؛ Piñeiro *et al.*, 2008):

$$\text{MaxAE} = \max|\hat{y}_i - y_i| \quad (58)$$

$$\text{MeanAE} = \frac{1}{N} \sum_1^N |\hat{y}_i - y_i| \quad (59)$$

$$\text{RMSD} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_1^N (\hat{y}_i - y_i)^2} \quad (60)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_1^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_1^N (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (61)$$

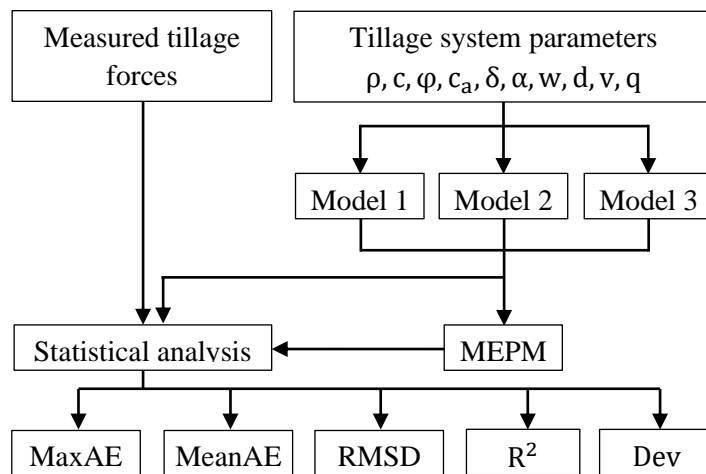
MaxAE: الخطأ المطلق الأعظمي Maximum Absolut error، MeanAE: متوسط الخطأ المطلق Mean absolute error، RMSD: انحراف الجذر التربيعي للمتوسط Root mean square deviation، R^2 : معامل التحديد Determination coefficient، y_i : القيم المقاسة تجريبياً، \hat{y}_i : القيم المحسوبة، \bar{y}_i : متوسط القيم المقاسة، N: عدد القياسات.

تم استخدام المؤشرات الإحصائية السابقة من أجل تقييم أداء النماذج الثلاثة عند جميع القيم التجريبية، وتم حساب النسبة المئوية لانحراف القيم المحسوبة عن القيم المقاسة ($\text{Dev}(\%)$) عند كل مجموعة من عوامل نظام الحراثة وفق العلاقة التالية (Onwualu and Watts, 1998):

$$\text{Dev}(\%) = \left[\frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right] \times 100 \quad (62)$$

البرمجة الحاسوبية:

تم كتابة برنامج حاسوبي باستخدام برنامج Matlab (MathWorks, 2013) لحساب قوى الجر وفقاً للنماذج الرياضية السابقة بالنسبة لنفس قيم بارامترات نظام الحراثة المستخدمة في القياسات التجريبية ومن ثم مقارنتها مع القيم التجريبية من خلال حساب المؤشرات



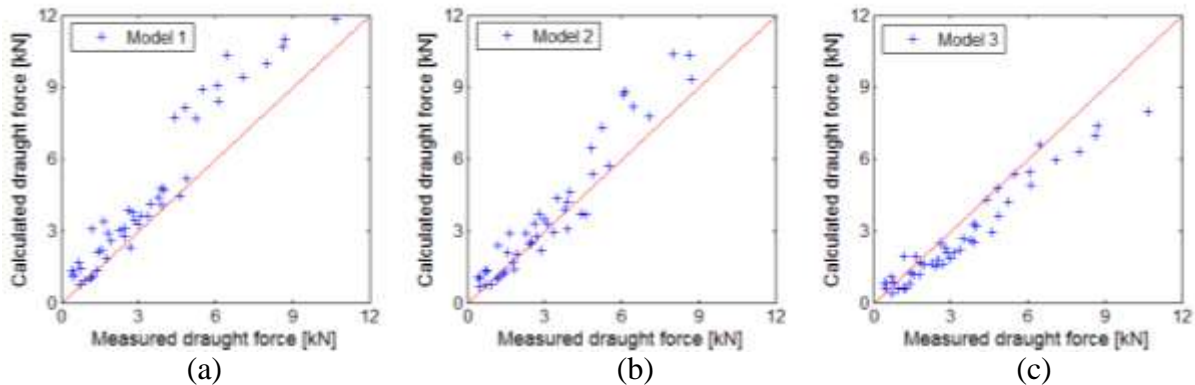
الشكل (13)

الإحصائية الموضحة في المعادلات (58) حتى (62) وكذلك تم استخدام Multimodel Ensemble Prediction Method (MEPM) لحساب متوسط القيم النظرية للنماذج الثلاثة ومقارنتها مع القيم التجريبية وفق الخوارزمية الموضحة في الشكل (13). يجب التنويه هنا إلى أن طريقة MEPM قد استخدمت سابقاً في مجال تقدير الخواص المائية للتربة (Houtemaker *et al.*, 1996)، لكنها لم تستخدم

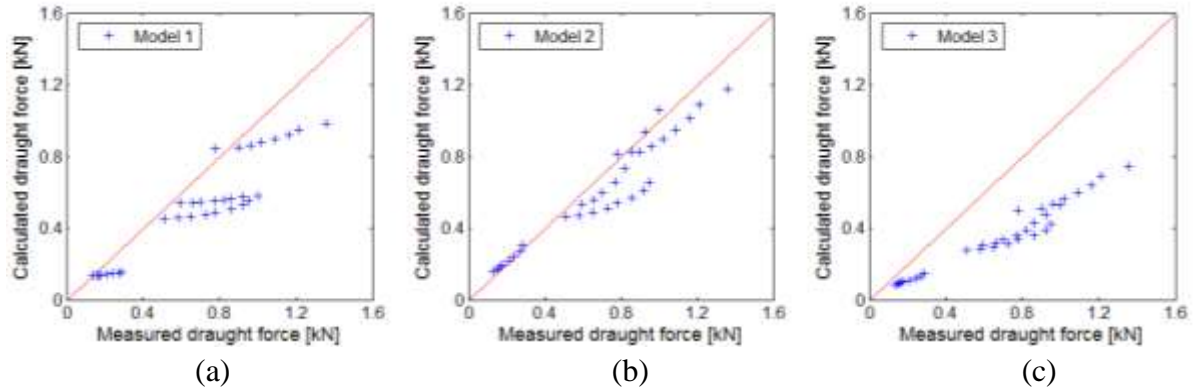
بعد في مجال حساب قوى الجر، لذلك كان أحد أهداف هذا البحث هو تطبيق هذه الطريقة وتقييم كفاءتها.

النتائج والمناقشة:

قيم قوى الجر المحسوبة وفقاً للنماذج الثلاثة حسب قيم عوامل نظام الحراثة المستخدمة في تجارب Mckyes and Desir (1984) معطاة في الجدول (1) في الملحق وقيم هذه القوى حسب قيم عوامل المستخدمة في تجارب Onwualu and Watts (1998) معطاة في الجدول (2) في الملحق. يوضح الشكل (14) مقارنة بين قوى الجر المحسوبة وفقاً للنماذج الثلاثة مع النتائج التجريبية لـ Mckyes and Desir (1984) ويقارن الشكل (15) قوى الجر المحسوبة مع النتائج التجريبية لـ Onwualu and Watts (1998) عند نفس عوامل نظام الحراثة. بشكل عام نلاحظ بأن القيم المحسوبة وفقاً للنموذج الأول أكبر من القيم التجريبية في الحالة الأولى (الشكل a.14)، بينما كانت أصغر من القيم التجريبية في الحالة الثانية (الشكل a.15). يمكن اعتبار أن القيم المحسوبة وفقاً للنموذج الثاني مقبولة في كلتا الحالتين (الشكلين b.14 و b.15). القيم المحسوبة وفقاً للنموذج الثالث مقبولة بالنسبة للحالة الأولى (الشكل c.14) بينما كانت أصغر من القيم التجريبية في الحالة الثانية (الشكل c.15). يمكن إرجاع التفاوت في القيم المحسوبة بين النماذج الثلاثة إلى سببين أساسيين: الأول هو في شكل الانهيار الذي يفترضه كل نموذج، والثاني في طريقة حساب زاوية الانهيار. إن شكل مقطع الانهيار الأمامي في النموذج الأول أكبر من النموذجين الثاني والثالث، إلا أن زاوية الانهيار التي تحدد مسافة الانهيار الأمامي في النموذج الأول كانت بشكل عام أصغر من النموذجين الثاني والثالث. النموذجين الثاني والثالث يفترضان تقريباً نفس شكل الانهيار إلا أن الاختلاف بينهما في طريقة حساب زاوية الانهيار، حيث تُحسب زاوية الانهيار في النموذج الثاني مع الأخذ بعين الاعتبار القوة الكلية المؤثرة على أداة الحراثة، بينما النموذج الثالث فإنه لا يأخذ سوى تأثير معامل الجاذبية على زاوية الانهيار، وهذا أدى إلى أن القيم المحسوبة وفقاً للنموذج الثالث كانت بشكل عام أصغر من تلك المحسوبة وفقاً للنموذج الثاني.



الشكل 14. مقارنة بين القيم المحسوبة والقيم التجريبية لـ Mckyes and Desir (1984)



الشكل 15. مقارنة بين القيم المحسوبة والقيم التجريبية لـ (Onwualu and Watts (1998)

لدراسة مدى التطابق بين القيم المحسوبة والقيم التجريبية وفقاً لكل نموذج، تم حساب أربعة مؤشرات إحصائية كما هو موضح في الجدولين (1) و (2). نلاحظ أنه لدى مقارنة القيم المحسوبة مع القيم التجريبية لـ (Mckyes and Desir (1984 أن النموذج الثاني أعطى أقل قيمة للخطأ المطلق الأعظمي MaxAE ومتوسط الخطأ المطلق MeanAE بينما كانت أقل قيمة لانحراف الجذر التربيعي للمتوسط RMSD وأعلى قيمة لمعامل التحديد R^2 في النموذج الثالث. عند مقارنة القيم المحسوبة وفقاً للنماذج الثلاثة مع النتائج التجريبية لـ (Onwualu and Watts (1998 نلاحظ بأن قيم MaxAE و MeanAE و RMSD كانت الأصغر بالنسبة للنموذج الثاني بينما كانت قيمة R^2 الأعلى بالنسبة للنموذج الثالث. مما سبق يمكن الاستنتاج أن أداء كل نموذج يتعلق بعوامل نظام الجرّاة وبشكل عام فإن النموذج الثاني كان الأفضل بين النماذج المستخدمة والنموذج الأول كان الأقل كفاءة.

الجدول 1. المؤشرات الإحصائية بين القيم المحسوبة والقيم التجريبية لـ (Mckyes and Desir (1984

MaxAE			MeanAE			RMSD			R ²		
M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3
0.42	0.31	0.61	0.18	0.10	0.34	0.22	0.14	0.39	0.89	0.92	0.95

الجدول 2. المؤشرات الإحصائية بين القيم المحسوبة والقيم التجريبية لـ (Onwualu and Watts (1998

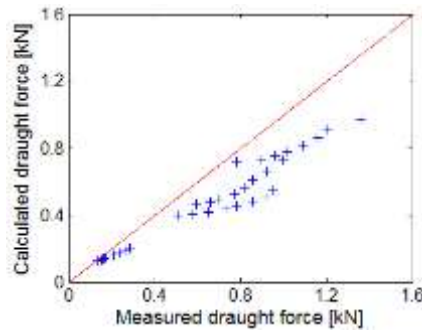
MaxAE			MeanAE			RMSD			R ²		
M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3
3.85	2.72	2.73	1.12	0.73	0.74	1.54	1.02	0.93	0.92	0.94	0.95

الجدول 3. المؤشرات الإحصائية بين متوسط القيم المحسوبة والقيم التجريبية

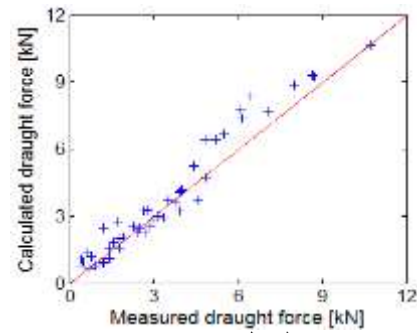
	MaxAE	MeanAE	RMSD	R ²
Case 1	1.89	1.12	0.71	0.95
Case 2	0.41	0.20	0.24	0.93

كما ذكر سابقاً أن أداء كل نموذج يختلف باختلاف عوامل نظام الجرّاة ولا يمكن القول إن نموذجاً بحد عينه هو الأفضل في جميع الحالات، لذلك تم استخدام طريقة MEPM لحساب متوسط قوى الجر بناءً على القيم المحسوبة وفقاً للنماذج الثلاثة ومقارنتها مع القيم التجريبية. يوضح الشكل (16) مقارنة لمتوسط قوى الجر المحسوبة وفقاً للنماذج الثلاثة مع النتائج التجريبية لـ (Mckyes and Desir (1984، والشكل (17) يقارن متوسط قوى الجر المحسوبة مع النتائج التجريبية لـ (Onwualu and Watts (1998 عند نفس عوامل نظام الجرّاة. يلاحظ أن هنالك تطابق جيد بين متوسط القيم المحسوبة والقيم التجريبية في الحالة الأولى بينما كانت أقل من القيم التجريبية

في الحالة الثانية. لدراسة مدى التطابق بين متوسط القيم المحسوبة والقيم التجريبية تم حساب نفس المؤشرات الإحصائية السابقة في كلتا الحالتين، كما هو موضح في الجدول (3).



الشكل (17)

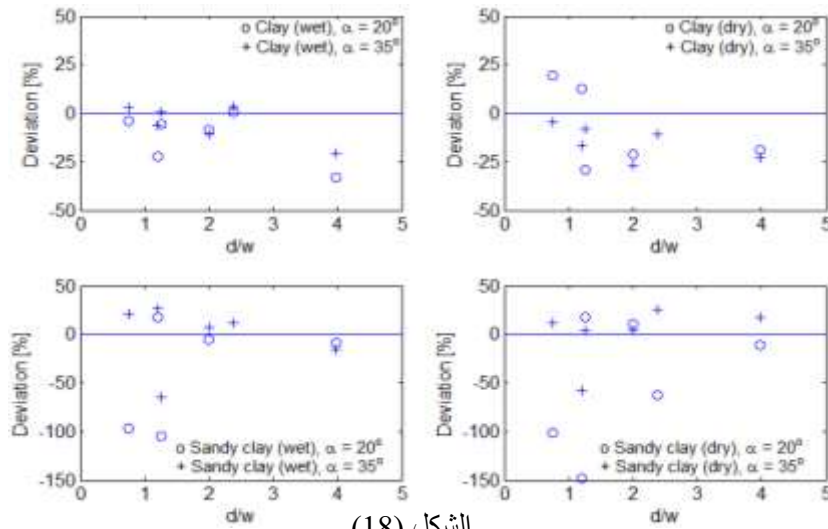


الشكل (16)

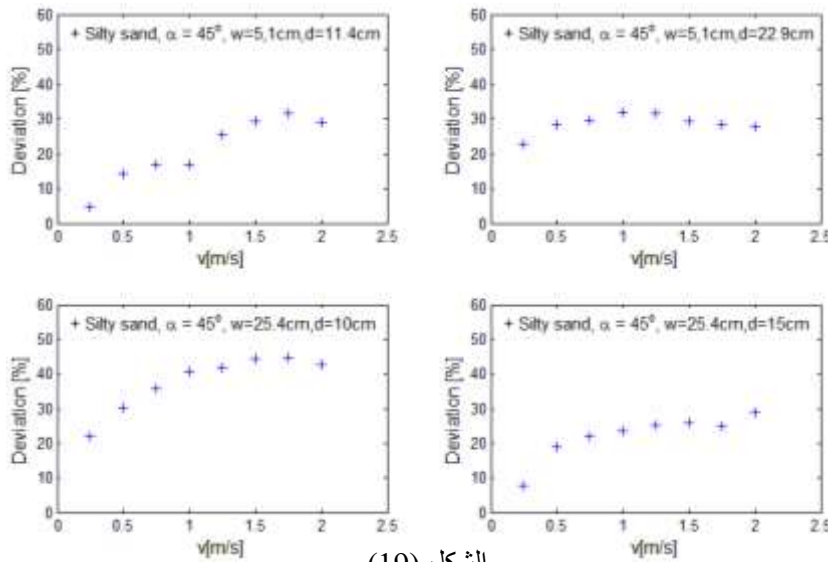
عند مقارنة قيم المؤشرات الإحصائية الواردة في الجدولين (1) و (2) مع تلك المعروضة في الجدول (3) نلاحظ أن حساب قوى الجر بناءً على طريقة MEPM أفضل من استخدام كل نموذج بشكل مستقل. لتقييم أداء هذه الطريقة تم حساب النسبة المئوية لانحراف القيم المحسوبة عن القيم التجريبية ($Dev(\%)$) لكل مجموعة من عوامل نظام الحراثة، كما هو موضح في الأشكال (18) و (19)، وقد تم تقسيم القيم التجريبية لكلاً من Mckyes and Desir (1984) و Onwualu and Watts (1998) إلى أربعة مجموعات في كل حالة وذلك من أجل تحديد تأثير النسبة d/w على $Dev(\%)$ في الحالة الأولى وتأثير السرعة في الحالة الثانية، وقد تم حساب القيمة المطلقة للنسبة المئوية لانحراف القيم النظرية عن التجريبية لكل مجموعة جزئية كما هو مبين في الجدول (4).

الجدول 4. القيم المطلقة للنسب المئوية لانحراف القيم النظرية عن التجريبية

Clay (wet)	$\alpha = 20^\circ$	12.5
	$\alpha = 35^\circ$	7.4
Clay (dry)	$\alpha = 20^\circ$	20.2
	$\alpha = 35^\circ$	14.8
Sandy clay (wet)	$\alpha = 20^\circ$	46.9
	$\alpha = 35^\circ$	24.3
Sandy clay (dry)	$\alpha = 20^\circ$	58.7
	$\alpha = 35^\circ$	19.9
Silty sand	$\alpha = 45^\circ, w = 5.1 \text{ cm}, d = 11.4 \text{ cm}$	21.0
	$\alpha = 45^\circ, w = 5.1 \text{ cm}, d = 22.9 \text{ cm}$	28.3
	$\alpha = 45^\circ, w = 25.4 \text{ cm}, d = 10 \text{ cm}$	37.8
	$\alpha = 45^\circ, w = 25.4 \text{ cm}, d = 15 \text{ cm}$	22.1



الشكل (18)



الشكل (19)

يلاحظ من الشكل (18) أنه لا توجد علاقة واضحة بين النسبة d/w والنسبة المئوية لانحراف القيم النظرية عن التجريبية بالنسبة لكلا زاويتي الميل ($\alpha = 20^\circ, \alpha = 35^\circ$) وكانت قيم $Dev(\%)$ كبيرة عند القيم المنخفضة للنسبة d/w ، وقد يعزى هذا الأمر إلى أن هذه النماذج قد تم تطويرها من أجل أدوات الحراثة الرفيعة ولا تتناسب أدوات الحراثة الرفيعة جداً التي تكون فيها النسبة d/w أصغر من الواحد. كان متوسط القيم المطلقة للنسب المئوية لانحراف القيم النظرية عن التجريبية أقل ما يمكن في التربة الطينية الرطبة وعند زاوية الميل $\alpha = 35^\circ$ ، بينما كانت الأعلى في التربة الطينية الرملية الرطبة وعند زاوية الميل $\alpha = 20^\circ$ (الجدول 4). بشكل عام كانت القيم المطلقة للنسب المئوية لانحراف القيم النظرية عن التجريبية في التربة الطينية منخفضة، بينما كانت تلك القيم مرتفعة نوعاً ما في التربة الرملية. نلاحظ أيضاً من الشكل (19) أن هنالك علاقة شبه طردية بين سرعة أداة الحراثة و $Dev(\%)$ بالنسبة لجميع عوامل نظام العمل، وقد يعود هذا بالمقام الأول إلى طريقة حساب قوة العطالة في هذه النماذج، ونلاحظ أيضاً من الجدول (4) أن متوسط القيم المطلقة للنسب المئوية لانحراف القيم النظرية عن التجريبية في التربة الرملية السلتية كانت مقبولة ومتقاربة بالنسبة لجميع قيم عوامل نظام الحراثة.

الاستنتاجات:

يمكن استنتاج النقاط الرئيسية التالية من هذا البحث: (1) تختلف قيم قوى الحراثة المحسوبة باختلاف النموذج المستخدم وذلك بناءً على شكل انهيار التربة الذي يفترضه كل نموذج وطريقة حساب زاوية الانهيار، (2) بشكل عام كان أداء النموذج الثاني أفضل من النموذجين الأول والثالث، (3) إن استخدام طريقة MEPM لحساب قوى الحراثة أفضل من استخدام كل نموذج بشكل مستقل، (4) إن كفاءة طريقة MEPM تتعلق بعوامل نظام الحراثة وبشكل عام فإن هذه الطريقة تعطي نتائج متقاربة مع القيم التجريبية عند استخدامها لحساب قوى الحراثة المؤثرة على أدوات الحراثة الرفيعة ($d/w > 1$) وعند سرعات العمل المنخفضة، (5) إن استخدام نماذج إضافية قد يؤدي إلى تحسين كفاءة هذه الطريقة.

المراجع:

- Abo Al-kheer, A.; M.G. Kharmanda; A. El-Hami; and A.M. Mouazen (2011). Estimating the variability of tillage forces on a chisel plough shank by modeling the variability of tillage system parameters. *Computers and Electronics in Agriculture*. 78:61–70.
- Abo Al-kheer, A. (2010). Integrating the concepts of optimization and reliability in the design of agricultural machines. Ph.D Thesis. National Institute of Applied Sciences, France.
- Desbiolles, J.M.A.; R.J. Godwin; J. Kilgour; and B.S. Blackmore (1997). A novel approach to the prediction of tillage tool draught using a standard tine. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 66:295-309.
- Donatelli, M.; J.H.M. Wosten; and G. Belocchi (2004). Methods to evaluate pedotransfer functions. In: Pachepsky, Ya.; and W.J. Rawls; Development of pedotransfer functions in soil hydrology. Amsterdam, Elsevier Science Publishers, pp. 357-411, Developments in soil science. 30.
- Piñeiro G.; S. Perelman; J.P. Guerschman; and J.M. Paruelo (2008). How to evaluate models: observed vs. predicted or predicted vs. observed. *Ecological Modelling*. 216:316–322.
- Gill, W.R.; and G.E. Vandern Berg (1968). Soil dynamics in tillage and traction. Agricultural Research Service. United States Department of Agriculture.
- Godwin, R.J.; and G. Spoor (1977). Soil failure with narrow tines. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 22:213-228.
- Godwin, R.J.; and M.J. O'Dogherty (2007). Integrated soil tillage force prediction models. *Journal of Terramechanics*. 44:3–14.
- Grisso, R.D.; J.V. Perumpral; and C.S. Desai (1980). A soil-tool interaction model for narrow tillage tools. *Transactions ASAE*. Paper 80-1518.
- Houtemaker, P.L.; L. Lefavre; J. Derome; H. Ritchie; and H.L. Mitchell (1996). A system simulation approach to ensemble prediction. *Mon. Weather Rev.*, 124:1225–1242.
- Perumpral, J.V.; R.D. Grisso; and C.S. Desai (1983). A soil-tool model based on limit equilibrium analysis. *Transactions ASAE*. 26:991-995.
- Jayasuriya, H.P.W.; and V.M. Salokhe (2001). A review of soil–tine models for a range of soil conditions. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 79:1-13.
- Kuczewski, J.; and E. Piotrowska (1998). An improved model for forces on narrow soil cutting tines. *Soil and Tillage Research*. 46:231-239.

- Mckyes, E.; and F.L. Desir (1984). Prediction and field measurements of tillage tool draft forces and efficiency in cohesive soils. *Soil and Tillage Research*. 4:459-470.
- McKyes, E.; and O.S. Ali (1977). The cutting of soil by narrow blades. *Journal of Terramechanics*. 14:43-58.
- Mckyes, E. (1985). *Soil Cutting and Tillage*. Quebec, Elsevier Science Publishers.
- Mouazen, A.M.; and M. Neményi (1998). A review of the finite element modelling techniques of soil tillage. *Mathematics and Computers in Simulation*. 48:23-32.
- Mouazen, A.M.; and M. Neményi (1999). Finite element analysis of subsoiler cutting in non-homogeneous sandy loam soil. *Soil and Tillage Research*. 51:1-15.
- Onwualu, A.P.; and K.C. Watts (1998). Draught and vertical forces obtained from dynamic soil cutting by plane tillage tools. *Soil and Tillage Research*. 48:239-253.
- Onwualu, A.P. (1991). Tillage tool factors affecting sandy soil interaction with plane blades in a soil bin. Ph.D Thesis, Technical University of Nova Scotia, Halifax, Canada.
- Reece, A. R. (1965). The fundamental equations of earth-moving mechanics. *Proceedings of the symposium on earth moving machinery*, Institute of Mechanical Engineering. 8–14.
- Rowe, R.J.; and K.K. Barnes (1961). Influence of speed on elements of draft of a tillage tool. *Transactions of the ASAE*. 4:55-57.
- Swick, W.C.; and J.V. Perumpral (1988). A model for predicting soil tool interaction. *Journal of Terramechanics*. 25:43-56.
- Terzaghi, K.; and R.B. Peck (1967). *Soil Mechanics in Engineering Practice*. Wiley, NY.
- Wösten, J.H.M.; Y.A. Pachepsky; and W.J. Rawls (2001). Pedotransfer functions: Bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. *Journal of Hydrology*. 251:123-150.
- Zhang, J.; and R.L. Kushwaha (1995). A modified model to predict soil cutting resistance. *Soil and Tillage Research*. 34:157-168.

الملحق

الجدول 1. قوى الجر المحسوبة وفقاً للنماذج النظرية حسب قيم عوامل نظام الحراثة المستخدمة في تجارب Mckyes and Desir (1984)

Soil Type	ρ (g/cm ³)	c (kPa)	ϕ (°)	c_a (kPa)	δ (°)	α (°)	w (cm)	d (cm)	P_{H1} (kN)	P_{H2} (kN)	P_{H3} (kN)	
Clay (wet)	1.17	33.5	37.3	9.4	27.3	20	6.3	15	3.12	2.55	1.80	
								25	8.13	6.44	4.75	
								12.5	15	3.85	3.32	2.49
									25	9.44	7.76	5.94
								20	15	4.75	4.22	3.30
									25	11.03	9.34	7.37
							35	6.3	15	3.26	3.48	1.86
									25	8.40	8.85	4.91
								12.5	15	4.12	4.35	2.67
									25	9.95	10.38	6.31
								20	15	5.17	5.38	3.62
									25	11.82	12.17	7.97
Clay (dry)	1.12	35.3	29.8	8.1	25.2	20	6.3	25	7.75	3.72	4.29	
								12.5	15	3.65	2.96	2.23
									25	8.91	5.73	5.35
								20	15	4.45	3.68	2.96
									25	10.32	8.17	6.60
								35	6.3	15	3.02	2.91
							25			7.70	7.32	4.22
							12.5		15	3.78	3.70	2.32
									25	9.05	8.69	5.47
							20		15	4.72	4.63	3.17
									25	10.69	10.32	6.94
							Sandy clay (wet)	1.48	6.3	36.0	2.2	23.3
12.5	15	0.94	0.76	0.59								
	25	2.56	2.01	1.56								
20	15	1.20	0.98	0.78								
	25	3.10	2.41	1.93								
35	6.3	15	0.77	0.76	0.41							
		25	2.20	2.07	1.18							
	12.5	15	1.03	0.96	0.60							
		25	2.74	2.46	1.53							
	20	15	1.33	1.19	0.82							
		25	3.39	2.91	1.94							
Sandy clay (dry)	1.35	11.9	33.1	2.7	22.1	20						
							25	2.92	1.41	1.65		
							12.5	15	1.34	1.06	0.81	
								25	3.45	2.17	2.06	
							20	15	1.67	1.32	1.07	
								25	4.08	3.09	2.54	
							35	6.3	15	1.12	1.06	0.58
									25	2.30	2.78	1.61
								12.5	15	1.44	1.35	0.85
									25	3.63	3.31	2.08
								20	15	1.83	1.69	1.16
									25	4.39	3.92	2.64

P_{H1} قوة الجر المحسوبة وفق النموذج الأول، P_{H2} قوة الجر المحسوبة وفق النموذج الثاني، P_{H3} قوة الجر المحسوبة وفق النموذج الثالث

الجدول 2. قوى الجر المحسوبة وفقاً للنماذج النظرية حسب قيم عوامل نظام الحراثة المستخدمة في تجارب Onwualu and Watts (1998)

Soil Type	ρ (g/cm ³)	c (kPa)	ϕ (°)	c_a (kPa)	δ (°)	α (°)	w (cm)	d (cm)	v (m/s)	P_{H1} (kN)	P_{H2} (kN)	P_{H3} (kN)
Silty sand	1.5	0	30	7.66	15.22	45	5.1	11.4	0.25	134.4	162.5	85.8
									0.50	137.6	171.3	90.3
									0.75	137.2	180.5	94.3
									1.00	139.6	196.2	101.4
									1.25	142.8	216.5	110.3
									1.50	146.6	241.3	120.9
								1.75	151.1	270.5	133	
								2.00	156.3	304.3	146.7	
								22.9	0.25	540	532.5	305.9
									0.50	542.1	557.7	316.5
									0.75	545.6	599.8	334.2
									1.00	550.5	658.7	358.8
							1.25		556.8	734.4	390.3	
							1.50		564.4	827	428.7	
							25.4	10	1.75	573.5	936.4	473.8
									2.00	583.9	1062	525.8
									0.25	453.6	462.6	277.6
									0.50	458.1	471.9	285
									0.75	465.7	487.5	297.3
									1.00	476.3	509.3	314
								15	1.25	489.9	537.3	335.2
									1.50	506.6	571.5	360.4
									1.75	526.3	612	389.5
									2.00	549.1	658.7	422.4
0.25	842.5	811.8	500.9									
0.50	849.3	829.1	513.2									
0.75	860.7	857.9	533.6									
1.00	876.6	898.3	561.7									
1.25	897.1	950.1	597.2									
1.50	922.1	1013	639.9									
1.75	951.7	1088	689.5									
2.00	985.8	1175	745.8									

P_{H1} قوة الجر المحسوبة وفق النموذج الأول، P_{H2} قوة الجر المحسوبة وفق النموذج الثاني، P_{H3} قوة الجر المحسوبة وفق النموذج الثالث

Tillage Forces Calculation Using Analytical Method

Abd Alkareem Abo Al-Kheer^{*(1)}

(1). Rural Engineering Department, Faculty of Agronomy, Aleppo University, Syria.

(*Corresponding author: Dr. Abd Alkareem Abo Al-Kheer. E-mail: a.aboalkheer@hotmail.com).

Received: 14/05/2018

Accepted: 29/09/2018

Abstract

In this research, three models based on analytical approach were used for calculating tillage forces. The first model was based on Soehne's approach, with some modifications to incorporate the adhesion force, the inertia force and the effects of the side crescents. The second model was based on Mckyes-Ali approach, the adhesion force and the inertia force were integrated to this model, and the failure angle was determined according the passive earth pressure theory. The third model was based on the findings of Perumpral and Swich, which were established on the Perumpral *et al.* model. The comparison between calculated and measured values showed that the performance of each model depended on tillage system parameters. In general, the performance of the second model was better than the first and the third models. In this work, the Multimodel Ensemble Prediction Method (MEPM) was applied, based on the precedent analytical models, and the calculated values were compared to measured ones. It was noted that the performance of the MEPM was better than all of three models.

Keywords: Tillage forces, Tillage tool, Soil failure, Tillage system parameters.