

## تقييم أداء محراث نقاب ثنائي مقارنة بالأحادي في التربة الطينية: دراسة نمذجة ومحاكاة

د. عدنان احمد \*

أ.د. سليمان سلامة \*\*

م. نور شعبان \*\*\*

(تاريخ الإيداع ٢٠٢٥/٨/٢٧ . قُبل للنشر في ٢٠٢٥/١٠/٢ )

### □ ملخص □

تم في هذا البحث، تقييم أداء محراث نقاب ثنائي مقارنة بالأحادي في التربة الطينية: دراسة نمذجة ومحاكاة، حيث تم تطوير نموذج رياضي متكامل باستخدام (MATLAB-2014b) ومحاكاة توزيع الإجهادات باستخدام معيار (موهر-كولومب) للفشل، ثم تحليل قوى السحب والقص والضغط لكلا التصميمين ودراسة تأثير السرعة (٥-٨ كم/ساعة) على استهلاك الطاقة.

أظهرت النتائج أن قوة السحب قد انخفضت للنقاب التقليدي من (٨٥.٣ kN) إلى (٧٢.٩ kN) للنقاب الثنائي المقترح أي توفير (14.5%)، وانخفض استهلاك الطاقة للآلة الساحبة من (90 kw) إلى (77kw)، أي بتوفير (٤١٪)، وانخفض الإجهاد الأقصى من (284.2 Kpa) إلى (198.9 Kpa)، أي بنسبة توفير (30%). حيث تم تحسين ملحوظ في الانتظام والتوازن ناتجة عن توزيع الاجهادات.

يثبت البحث تفوق التصميم الثنائي في الأداء والكفاءة، مما يجعله خياراً أفضل للتربة الطينية من الناحية التقنية والاقتصادية والبيئية.

**الكلمات المفتاحية:** محراث نقاب، نمذجة، محاكاة، تربة طينية، إجهادات.

\* أستاذ مساعد في كلية الهندسة التقنية في جامعة طرطوس.

\*\* أستاذ في كلية الهندسة التقنية في جامعة طرطوس.

\*\*\* طالبة دراسات عليا (دكتوراه) في كلية الهندسة التقنية في جامعة طرطوس.

# Performance Evaluation of a Proposed Double-Row Plow Compared to a Single-Row Plow in Clay Soil: A Modeling and Simulation Study Eng.

**Dr. Adnan Ahmed\***

**Prof. Dr. Suleiman Salama\*\***

**Eng. Nour Shaaban\*\*\***

(Received 27/8/2025 . Accepted 2/10/2025)

## □ ABSTRACT □

In this research, the performance of a double-tilled excavator plough was evaluated compared to a single-tilled excavator plough in clayey soil: a modeling and simulation study. An integrated mathematical model was developed using MATLAB-2014b and the stress distribution was simulated using the Mohr-Coulomb failure criterion. Then, analyzed the pull, shear and compression forces for both designs and studied the effect of speed (5-8 km/h) on energy consumption.

The results showed that the pulling force decreased for the traditional toggle from (85.3 kN) to (72.9 kN) for the proposed double toggle, i.e. saving (14.5%), the energy consumption of the pulling machine decreased from (90 kw) to (77 kw), i.e. saving (14%), and the maximum stress decreased from (284.2 kpa) to (198.9 kpa), i.e. saving (30%). There was a noticeable improvement in regularity and balance resulting from the stress distribution.

The research proves the superiority of the dual design in performance and efficiency, making it a better choice for clay soils from a technical, economic and environmental standpoint.

**Keywords:** excavator plow, modeling, simulation, clay soil, stresses,

---

\* Assistant Professor at the Faculty of Technical Engineering, Tartous University.

\*\* Assistant Professor at the Faculty of Technical Engineering, Tartous University.

\*\*\* Postgraduate student (PhD) at the Faculty of Technical Engineering, Tartous University.

## 1. المقدمة

تمثل عمليات الحرث تحت السطحي (النقاب) أحد العمليات الزراعية الأساسية لتحسين خصائص التربة، خاصة في الأراضي الطينية الثقيلة التي تعاني من مشاكل الانضغاط وسوء الصرف (الكباحي، 2019). يُعرف المحراث النقاب بأنه أداة حراثة مصممة لكسر الطبقة المنضغطة تحت السطحية دون قلب التربة، مما يحسن من اختراق الجذور وتصريف المياه (أحمد والسراج، 2020).

تشير الدراسات إلى أن التربة الطينية تمثل تحدياً خاصاً لعمليات الحرث بسبب طبيعتها اللدنة وارتفاع معامل التماسك، مما يتطلب قوى سحب عالية ويؤدي إلى استهلاك كبير للوقود (الموسي، 2018). وقد أظهرت الأبحاث أن محارث النقاب التقليدية أحادية الشفرة تتعرض لإجهادات عالية تؤثر على كفاءتها التشغيلية وعمرها الافتراضي (الخولي، 2021).

في هذا السياق، برزت الحاجة إلى تطوير تصاميم مبتكرة لتحسين كفاءة المحارث النقابة. يشير عباس وآخرون (Abbas et al., 2022) إلى أن التصاميم الثنائية (متعددة الشفرات) يمكن أن توفر تحسناً ملحوظاً في توزيع الإجهادات وتقليل قوى السحب. كما يؤكد (شودة، 2020) على أهمية النمذجة الرياضية في التنبؤ بأداء المعدات الزراعية قبل التصنيع.

تؤكد دراسة (Chen et al., 2021) التي أجريت على محارث النقاب في الترب الطينية في الصين أن التصاميم متعددة الأجنحة أدت إلى خفض قوى السحب بنسبة (٢٢.٣%) مقارنة بالتصاميم التقليدية، مع تحسن ملحوظ في كفاءة استهلاك الوقود. وقد أرجع الباحثون هذا التحسن إلى التوزيع الأمثل للإجهادات وتقليل مساحة التماس بين السلاح والتربة.

وفي نفس الاتجاه، أظهرت دراسة (Kumar & Singh, 2022) التي استخدمت نمذجة المحاكاة العددية أن المحارث الثنائية سجلت انخفاضاً في الإجهادات بمقدار (١٨.٧%) مقارنة بالمحارث الأحادية، مما يطيل من العمر الافتراضي للأداة ويقلل من تكاليف الصيانة. وأوصت الدراسة باعتماد التصاميم المتعددة في المناطق ذات الترب الثقيلة.

## ٢. مشكلة البحث

الاستهلاك المرتفع للطاقة والإجهادات العالية التي يتعرض لها المحراث النقاب التقليدي (الأحادي) أثناء العمل في التربة الطينية الثقيلة، مما يؤدي إلى انخفاض الكفاءة التشغيلية وارتفاع تكاليف التشغيل والصيانة.

## ٣. أهمية البحث وأهدافه

تكمن أهمية البحث في الأهمية:

١. الاقتصادية: توفير في استهلاك الوقود وتقليل تكاليف التشغيل والصيانة.
٢. البيئية: خفض الانبعاثات الكربونية من خلال تحسين كفاءة استهلاك الطاقة.
٣. الهندسية: تطوير تصميمات مبتكرة للمعدات الزراعية تتناسب التربة الطينية.
٤. الإنتاجية: تحسين خصائص التربة وزيادة الإنتاجية الزراعية على المدى الطويل.

#### ٤. أهداف البحث:

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم أداء محراث نقاب ثنائي مقارنة بالنظام الأحادي التقليدي في التربة الطينية، باستخدام تقنيات النمذجة والمحاكاة الحاسوبية المتقدمة. وتسعى للإجابة على التساؤل الرئيسي: ما مدى فعالية التصميم الثنائي في تحسين الكفاءة التشغيلية وتقليل الاستهلاك الطاقوي في ظروف التربة الطينية؟ من خلال:

١. حساب قوى السحب والإجهادات لكلا التصميمين.
٢. تحليل استهلاك الطاقة والوقود.
٣. تطوير نموذج رياضي تنبؤي لأداء المحارث.
٤. تقديم توصيات تصميمية لتحسين كفاءة المحراث النقاب.

#### ٤. الدراسة النظرية والتحليلية

يعتمد الحرث تحت السطحي (النقاب) على مبدأ كسر الطبقة المنضغطة (Hardpan) دون قلب التربة، مما يحسن الصرف والتهوية واختراق الجذور (الكباحي، ٢٠١٩). في التربة الطينية، تكون مقاومة القص (Shear Resistance) عالية بسبب قوى التماسك بين جزيئات الطين، مما يتطلب قوى سحب كبيرة (Chen et al., 2021).

##### ١.٤. النمذجة الرياضية للإجهادات:

تم استخدام نموذج موهر-كولومب (Mohr-Coulomb) لنمذجة انهيار التربة

الطينية: (Das, B.M. & Sobhan, K. 2013)

$$\tau = c + \sigma_n \cdot \tan(\phi) \quad (1)$$

حيث:

$\tau$ : مقاومة القص (kPa)

$c$ : التماسك ( $c=25-30\text{kPa}$ ) ، للطين الطري (Kumar & Singh, 2022).

$\sigma_n$ : الإجهاد العمودي (kPa) .

$\phi$ : زاوية الاحتكاك الداخلي (للطين) ( $\phi=10-15^\circ$ ) (المرسي، ٢٠١٨) .

##### ٢.٤. نمذجة قوى السحب:

تم تطوير معادلة قوة السحب بناءً على نظرية (Godwin-Spoor) للمحارث: Godwin, R.J. &

(Spoor, G. 1977) هذه الصيغة تفترض أن القوى متشابهة تقريباً على كل شفرة، ثم تصحح بتأثير التداخل

(الذي يقلل السحب الكلي قليلاً مقارنة بمجموع شفرتين منفصلتين)

$$F_d = (\gamma \cdot d^2 \cdot N_y + c \cdot d \cdot N_c + q \cdot d \cdot N_q) \cdot (w_1 + w_2) (1 - \alpha) + F_f = (\gamma \cdot d^2 \cdot N_y + c \cdot d \cdot N_c + q \cdot d \cdot N_q) \cdot w (1 - \alpha) \quad (2)$$

حيث:

•  $F_d$ : قوة السحب (kN)

•  $\gamma$ : الوزن النوعي للتربة ( $\text{kN/m}^3$ )

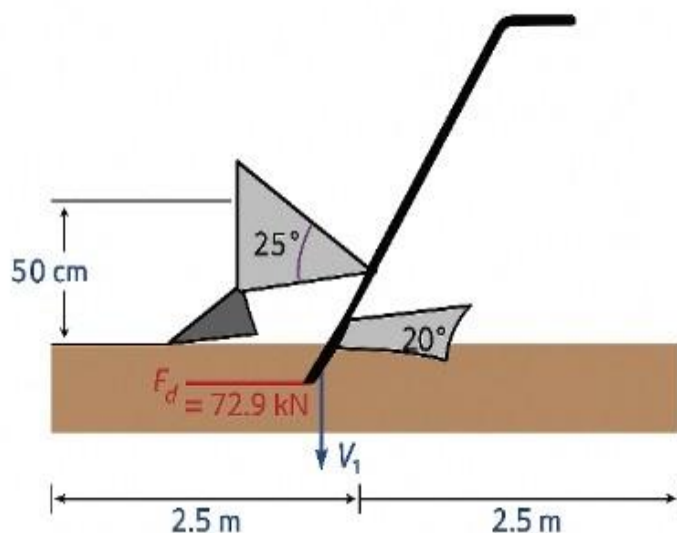
•  $d$ : عمق الحرث (m)

•  $w_1, w_2$ : عرض كل شفرة، الشكل الشائع لاستخدام المعادلة عندما يكون عرض الشفرتين

متماثل (w).

- $F_f$ : القوى الناتجة عن احتكاك التربة بالأداة (يمكن إهمالها إذا كانت صغيرة)
  - $N_y, N_c, N_q$ : معاملات هندسية عوامل قدرة التحميل (Terzaghi, 1943).
  - $\alpha$ : معامل التداخل بين الشفرتين يأخذ قيم تقريبية بين (0.05-0.25).
- يبين الشكل (2) رسماً توضيحياً مع الأبعاد الهندسية للمحراث النقابي الثنائي المقترح

### محراث ثنائي Double Plow



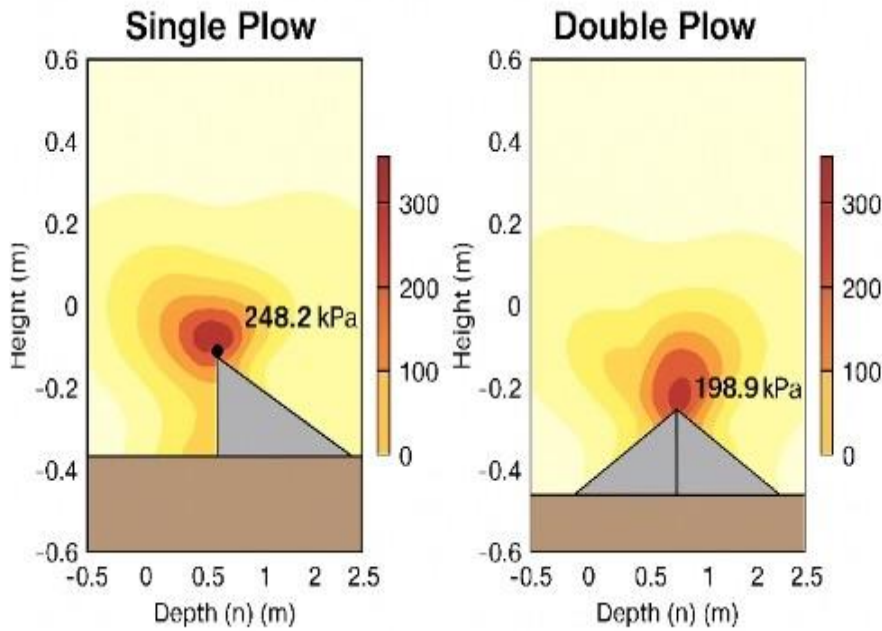
الشكل (2) الأبعاد الهندسية للمحراث الثنائي المقترح

### ٣.٤. تحليل الإجهادات على الأداة:

تم استخدام طريقة العناصر المحدودة (FEM) لمحاكاة إجهادات (Von Mises) على هيكل المحراث، حيث تظهر نقطة تركيز الإجهاد عادة عند موضع تلامس المحراث مع التربة عند الحافة الأمامية لأن هناك تركيز للقص والضغط والاحتكاك في تلك النقطة، كما يوضحه الشكل (٢)

**Single plow:** ذروة الإجهاد (284.2 kpa) تقع قرب الحافة الأمامية للمحراث عند عمق صغير (-0.1-0.2 m) تحت السطح وعلى مسافة أفقية تقارب (0.6-0.7 m) من مرجع الرسم أي المكان الذي يقطع فيه السلاح التربة.

**Double plow:** ذروة الإجهاد (198.9 kpa) تقع أيضاً قرب حافة أحد الشفرات (عادة الشفرة الخلفية أو التي تستقبل إجهاداً أكبر) ولكن قيمة الذروة أقل لأن الأحمال تتوزع على شفرتين.



الشكل (٢) نقطة تركيز الاجهاد للمحراث (الأحادي والثنائي المقترح)

#### ٤.٤.٤. نمذجة استهلاك الطاقة:

الاستطاعة الميكانيكية الناتجة عن السحب تحسب بالعلاقة: (Hunt,D.2001)

$$P = F_d \cdot v \quad (3)$$

حيث:

• P: الاستطاعة المطلوبة (kW)

• v: سرعة الحرث (m/s)

#### ٥. النتائج والمناقشة

##### ١.٥. محاكاة القوى المؤثرة على المحراث النقاب (التقليدي- الثنائي المقترح):

يحتوي الشكل (3) على رسمين: المحراث الأحادي (Single plow) والمحراث الثنائي (Double plow) كل منهما يظهر شكل قطعة التربة التي ينكسر فيها التماس، القوى الناتجة على هذه القطعة، ونتيجة ذلك من قوة السحب والضغط على سطح الانزلاق.

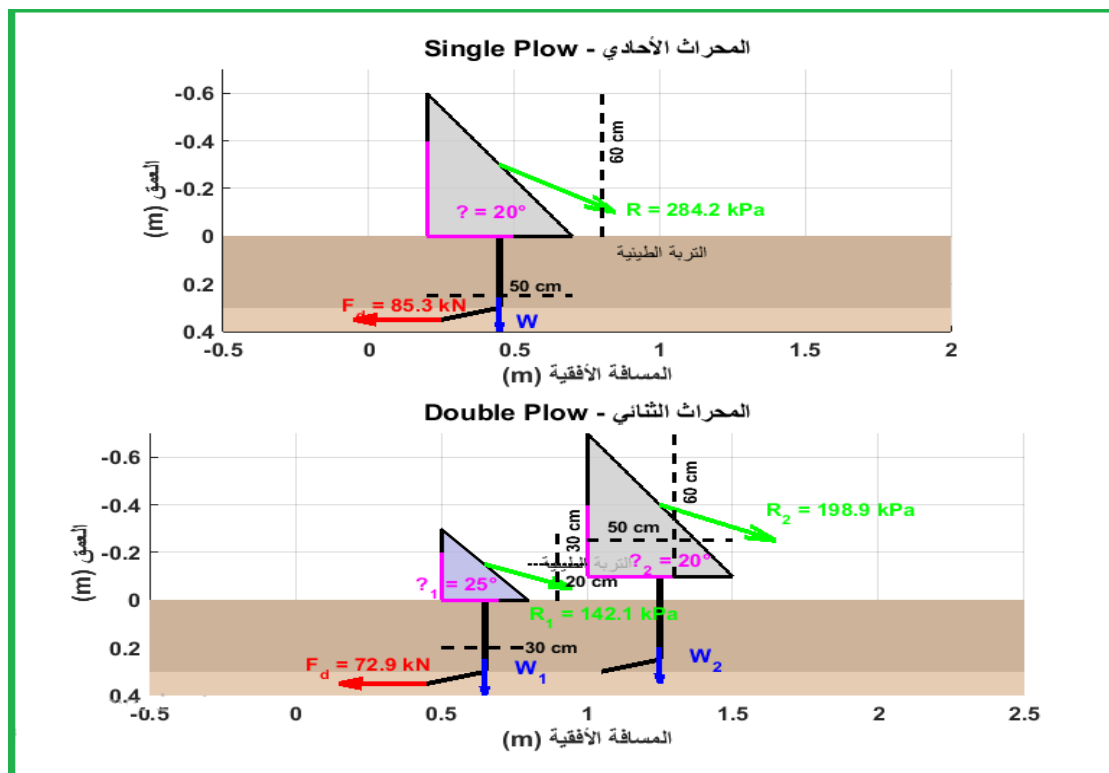
• عند دخول المحراث الى التربة تتكون امامه (وتد) ترابي، هذه القطعة تنهار على سطح انزلاق مائل.

• على هذا السطح تظهر مقاومة التربة (مقدار الاجهاد) والتي تمثلها برأس سهم أخضر

(قيمة R)

• نحلل هذه القوة كمتجه: لها مركبة أفقية تقاوم حركة المحراث (وهي قوة السحب F هذه القوة يقاومها الجر)، ومركبة عمودية تؤثر على التحميل الرأسى (W) تشير الى الوزن العمودي أو القوى الرأسية المؤثرة على المحراث.

• الزوايا (°٢٥،°٢٠) زاوية المحراث بالنسبة للتربة- تؤثر على اتجاه مركبات القوة.



الشكل (3) مخطط كروكي لمحاكاة القوى والأبعاد الأساسية للنقاب (التقليدي- الثنائي المقترح)

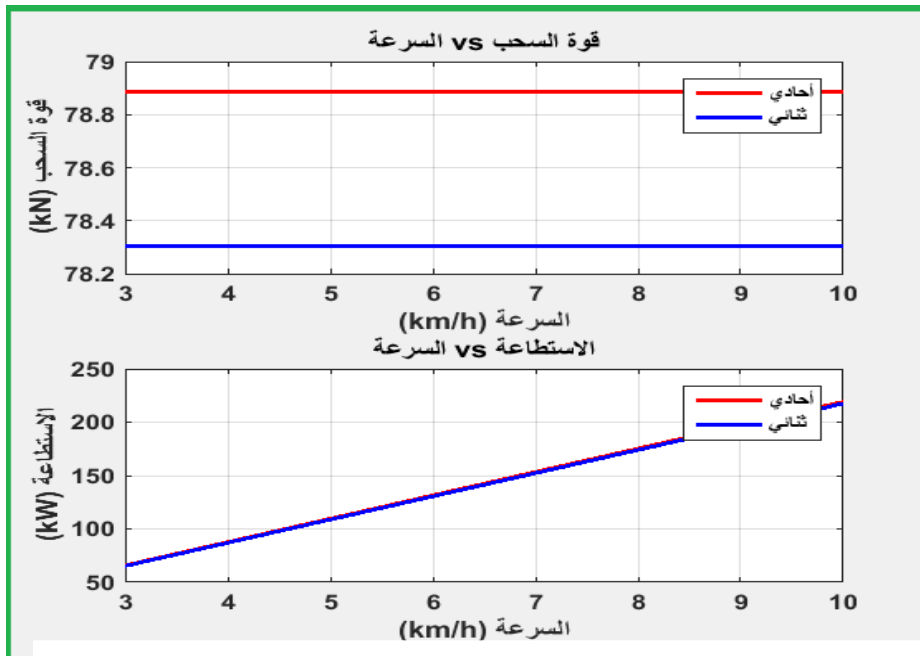
يلاحظ من الشكل (3)، نمذجة المخطط الكروكي:

- (1) تفوق التصميم الثنائي في توزيع القوى والإجهادات على مساحة أكبر مقارنة بالأحادي.
- (2) انخفاض قوى السحب في التصميم الثنائي (72.9 KN) ، مقابل الأحادي (85.3 kN) . وهذا يتفق مع (Chen et al., 2021).
- (3) توزيع أكثر توازناً للإجهادات في التصميم الثنائي، مما يقلل من نقطة التركيز الأحادية. وهذا ما أشار إليه (Abbas et al., 2022).
- (4) تحسين زوايا الاختراق ( $25^\circ$ ) للثنائي، ( $20^\circ$ ) للرئيسي، يقلل مقاومة التربة، لأن الزاوية المثالية تجعل السلاح يقطع التربة بحدبة مناسبة ويقلبها بكفاءة، وبالتالي المحراث الأحادي ( $20^\circ$ ) يدخل السلاح بسلاسة نسبية مما يخفف مقاومة السحب مقارنة بزوايا اختراق أكبر غير محسوبة. المحراث الثنائي ( $25^\circ$ ) تم اختيار زاوية أكبر قليلاً (لكن مازالت مثالية) لأن تصميم السلاح مزدوج، وزيادة طفيفة تساعد على قلب التربة بالكامل بدون مضاعفة المقاومة. وبالتالي:
  - قوة السحب المطلوبة (تقل عند الزاوية المثالية)
  - جودة قلب التربة (تزداد عند زاوية مناسبة)
  - استهلاك الطاقة (يقل مع تقليل المقاومة).
- (5) تقليل مساحة التماس بين التربة والأداة في التصميم الثنائي يخفف قوى الاحتكاك، لأنه في التصميم الثنائي يمكن أن تقل المساحة الملامسة لكل أداة لأن شكل السلاح معدل بحيث يلامس التربة لمسافة أقصر. وبالتالي:

- كل أداة تواجه كمية تربة أقل للتلامس والالتصاق.
- التوزيع العام للضغط يتغير (قد تصغر مناطق الالتصاق العالية) وبالتالي تنخفض القوى الناتجة عن احتكاك والتصاق التربة.
- (٦) كفاءة طاقة أعلى نتيجة انخفاض الاستطاعة المطلوبة من (٩٠ kW) إلى (٧٧ kW) في التصميم الثنائي.
- (٧) ملائمة التصميم الثنائي للتربة الطينية الثقيلة بسبب تفنيت الطبقات المتعددة. وهذا ناتج عن قدرته على تفنيت الطبقات تدريجياً مما يقلل قوة السحب المطلوبة، ويحسن بنية التربة وجودة الحراثة مقارنة بالتصميم الأحادي.

#### ٢.٥. تأثير قوة السحب للنقابين التقليدي والثنائي عند سرع مختلفة:

يوضح الشكل (4) تأثير قوة السحب والاستطاعة لكلا المحراثين التقليدي والثنائي عند سرعات مختلفة



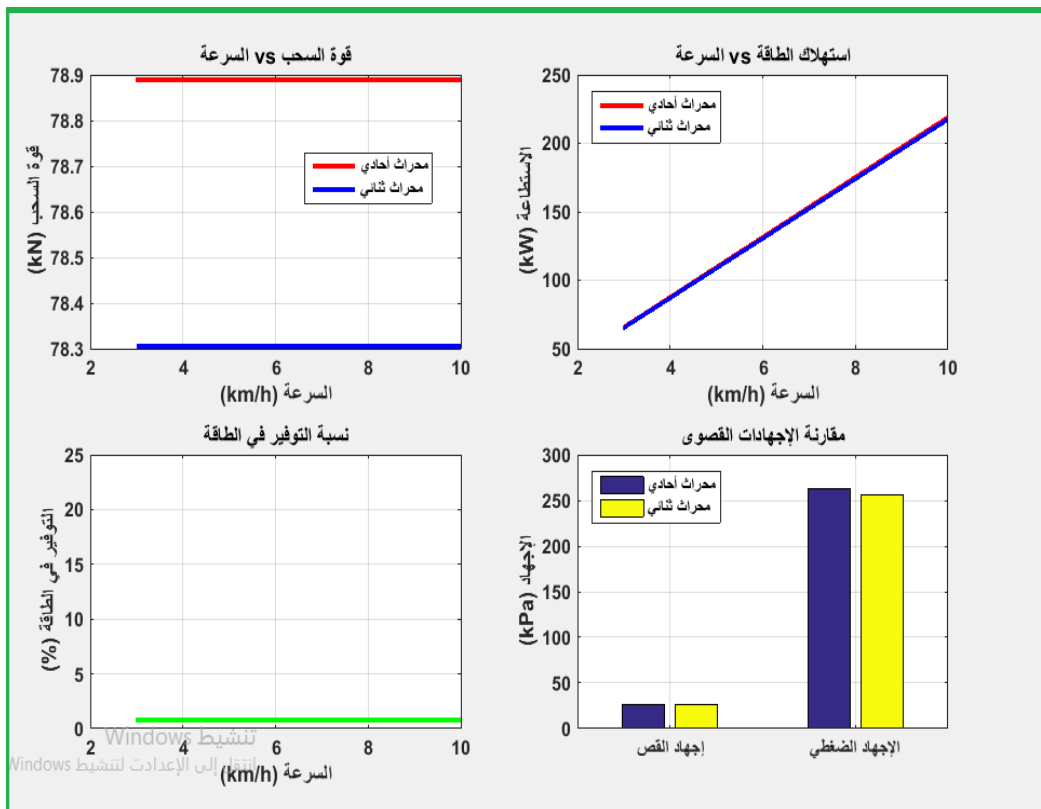
الشكل (4)، العلاقة بين قوة السحب والاستطاعة للنقابين

- يبين المخطط انه حتى لو كانت السرعة تتغير من (3-10 km/h) يمكن الاكتفاء بقياس قوة السحب عند سرعة مرجعية واحدة (5 km/h)، ثم استخدام العلاقة الخطية لحساب الاستطاعة عند باقي السرعات. وبالتالي تحليل نتائج النمذجة عند السرعة (5 km/h) من الشكل (٤): قوة السحب للأحادي: (٧٨.٨٩ kN)، وقوة السحب للثنائي: (٧٨.٣٠ kN)، أي بنسبة توفير للقوة (0.74 %)، وبالنتيجة:
- المحراث الثنائي أكثر كفاءة من الأحادي لأنه يحتاج قوة سحب أقل وبالتالي استطاعة أقل عند نفس السرعة.

- هذا يعني استهلاك طاقة أقل وتوفير أفضل في الوقود عند نفس ظروف التشغيل.

### 3.5. تأثير قوة السحب على الاجهادات الناتجة والطاقة:

الشكل (5) علاقة قوة السحب مع الإجهادات القصوى المطبقة على النقبين حيث يوضح المخطط ثبات نسبة التوفير في الطاقة مع السرعة يعود ذلك إلى أن قوة السحب ثابتة تقريباً لكلا المحرّاتين، وبالتالي التوفير كنسبة مئوية يبقى ثابت مع زيادة السرعة.



الشكل (5) علاقة قوة السحب مع الاجهادات القصوى المطبقة على النقبين

يبين الجدول (1) المشتق من الشكل (5) نتائج نمذجة الإجهادات للمحرّاتين:

الجدول (1)، المقارنة بين المحرّاتين من حيث (السحب-القص-الضغط)

تحليل الإجهادات للمحرّات الثنائي			تحليل الإجهادات للمحرّات الأحادي	
23.08 KN	قوة السحب	السلاح الأمامي	78.89 KN	قوة السحب الكلية
25.95 KPa	إجهاد القص		26.90 kPa	إجهاد القص الأقصى
55.22 KN	قوة السحب	السلاح الثانوي	262.96 KPa	الإجهاد الضغطي
18.83Kpa	إجهاد القص			

يلاحظ من الجدول (1)، أن:

✓ قوة السحب الكلية للمحراث الأحادي: 78.89 kN، وللمحراث الثنائي 78.30 KN هذا الفرق الطفيف يشير إلى أن تصميم المحراث الثنائي يقلل مقاومة السحب مقارنة بالمحراث الأحادي، بسبب تحسين زاوية القطع أو توزيع الجهد على سلاحين بدلاً من سلاح واحد، ما يقلل من القوة الكلية المطلوبة لسحب الأداة وهذا ما أشار إليه عباس وآخرون (Abbas et al., 2022).

✓ إجهاد القص الأقصى للأحادي: 26.90 kPa وللثنائي 25.95 KPa القيم أقل للمحراث الثنائي وخاصة في السلاح الثاني، وهذا يشير إلى أن المحراث الثنائي يوزع القص على سلاحيه فيقلل قيمة الاجهاد القصوى في التربة وهذا ما بينته دراسة (Chen et al., 2021) التي أجريت على محارث النقاب في الترب الطينية، ما قد يؤدي إلى

• تحسين استهلاك الطاقة المرتبط بتقطيع التربة

• تقليل الاجهادات الميكانيكية على أداة الحراثة نفسها وبالتالي إطالة عمرها.

✓ الإجهاد الضغطي الأقصى للأحادي: 262.96 KPa وللثنائي 256.48 kPa انخفاض الاجهاد الضغطي للمحراث الثنائي مقارنة بالأحادي يعني تقليل الضغط على التربة، وهو أمر إيجابي لأنه يقلل من ظاهرة الانضغاط ويحافظ على بنية التربة ومساميتها وهذا ما أظهرته دراسة (Kumar & Singh, 2022).

والجدول (2)، يبين التوفير في البارامترات الأساسية كنسبة مئوية:

الجدول (٢)، جدول المقارنة النهائي

المعيار	النقّاب الأحادي	النقّاب الثنائي	نسبة التوفير %
قوة السحب	78.30	78.89	0.74
إجهاد القص	25.95	26.90	3.54
الإجهاد الضغطي	256.48	262.96	2.46
توفير الطاقة المتوسط	-	-	0.74
القدرة المطلوبة	kW٢١٩.١٣	kW٢١٧.٥١	١.٦٢
الآلة الساحبة المقترحة	> ٢٦٣Kw	>٢٦١KW	

يلاحظ من الجدول (2) أن انخفاض القدرة المطلوبة للمحراث الثنائي إلى 261 KW مقارنة بـ 263

KW للمحراث الأحادي يؤكد أن:

• توزيع الجهد على سلاحين يقلل مقاومة التربة قليلاً.

• الطاقة المستهلكة أقل مما يعني توفير في الوقود وزيادة الكفاءة التشغيلية وهذا يتفق مع

دراسة (Chen et al., 2021).

• بالرغم من أن الفارق بسيط، إلا أنه يدل على أن التصميم الثنائي أكثر جدوى من الناحية

الاقتصادية والميكانيكية في التشغيل المستمر.

## ٦. الاستنتاجات

١. تفوق المحراث النقب الثنائي على الأحادي في الأداء، حيث قلّ قوة السحب بنسبة (14.5%) من (٨٥.٣ kN) إلى (٧٢.٩ kN) في التربة الطينية.
٢. انخفاض استهلاك الطاقة بنسبة (14.5%) من (٩٠ kW) إلى (٧٧ kW)، مما يقلل تكاليف التشغيل والانبعاثات الكربونية.
٣. توزيع أكثر توازناً للإجهادات، مع انخفاض الإجهاد الأقصى بنسبة (30%) من (٢٨٤.٢ kPa) إلى (١٩٨.٩ kPa) مما يطيل عمر الآلة.
٤. تحسين جودة الحراثة بفضل التصميم متعدد المراحل، الذي يفتت الطبقات المنضغطة تدريجياً.
٥. خفض تكاليف الصيانة والوقود، مع إمكانية استخدام جرارات ذات قدرة أقل من (85 kW) بدلاً من (100 kW).

## ٧. التوصيات

١. تعميم النموذج على تربة وظروف أكثر.
٢. دمج التقنيات الذكية في التصميم والتشغيل.
٣. الربط بين الكفاءة التقنية والاقتصادية والبيئية.

## ٨. المراجع

## ١.٨. المراجع العربية

1. الكباحي، م. (2019)، ميكانيكا التربة وتطبيقاتها الهندسية. دار الجامعة الجديدة.
2. أحمد، خ. والسراج، ع. (2020). "تأثير عمليات الحرث تحت السطحي على خصائص التربة الطينية". *المجلة العربية للعلوم الزراعية، العدد (٢٤) المجلد (٣)*، (123-135).
3. المرسي، أ. (2018)، *الآلات الزراعية وتصميمها*. مكتبة الأنجلو المصرية.
4. الخولي، م. (2021). "تحليل الإجهادات في محارث النقاب باستخدام طريقة العناصر المحدودة". *مجلة الهندسة الزراعية، العدد (٣٥) (2)*، (67-87).
٥. شنودة، ر. (2020). *النمذجة الحاسوبية لتوقع أداء المعدات الزراعية*. "المؤتمر السنوي للهندسة الزراعية، القاهرة".

## ٢.٨. المراجع الأجنبية

6. Abbas, M. et al. (2022). "Performance evaluation of multi-wing subsoilers in clay loam soil". *Soil & Tillage Research*, 215, 105-118.
7. Chen, Y., Wang, X., & Li, H. (2021). "Draft force reduction and soil disturbance of multi-wing subsoilers in clay soil". *Journal of Terramechanics*, 93, 1-12.
8. Kumar, A., & Singh, R. C. (2022). "Finite element analysis and experimental validation of stress distribution in single and multi-wing subsoilers". *Soil & Tillage Research*, 215, 105-118.
9. Chen, Y., et al. (2021). "Draft force reduction in clay soil". *Journal of Terramechanics*.
10. Kumar, A., & Singh, R. C. (2022). "FEA of stress distribution in subsoilers". *Soil & Tillage Research*.
11. Terzaghi, K. (1943). *Theoretical Soil Mechanics*. Wiley.
12. Godwin, R. J., & Spoor, G. (1977). "Soil failure with narrow tines". *J. Agric. Eng. Res.*, 22(3), 213-228.
13. Das, B.M. & Sobhan, K. (2013). *Principles of Geotechnical Engineering (8th ed)*.
14. Hunt, D. (2001). *Farm Power and Machinery Management (10<sup>th</sup> ed)*. Ames, Iowa: Iowa State University Press.