

محاكاة ديناميكية لتفاعل التربة مع محراث تحت التربة ذي سلام ثانوي:**تحليل معامل الجر والطاقة**

م. نور عادل شعبان *

د. عدنان علي احمد **

أ.د. سليمان محمد سلامة ***

الملخص

تقدم هذه الدراسة تحليلاً شاملاً للأداء وتحسيناً هندسياً للمحراث تحت التربة وسلاحه الثانوي، مع التركيز على تأثير المتغيرات التصميمية في كفاءة الجر، استهلاك الطاقة، والاستقرار التشغيلي. من خلال النمذجة ثلاثية الأبعاد وتحليل الانحدار متعدد المتغيرات، تم تحليل العلاقة بين زاوية ميل السلاح (α)، والمسافة الأفقية (dx)، وتأثيرهما المتبادل على معامل الجر (C_T) والاستهلاك النوعي للطاقة (SE_v).

أظهرت النتائج وجود مجال تصميمي أمثل عند زاوية ميل (15° و 25°) ومسافة أفقية (dx) ضمن المجال (15-25 cm)، حيث تحقق أفضل توازن بين معامل الجر، استهلاك الطاقة، والاستقرار الديناميكي. كما بينت النتائج أن زيادة زاوية الميل عند القيم المرتفعة تؤدي إلى زيادة مقاومة التربة ومتطلبات الطاقة نتيجة ارتفاع الاجهادات المتولدة أمام السلاح الثانوي. بالإضافة إلى ذلك، أظهر معامل الاستقرار الديناميكي (SD) تحسناً ملحوظاً ضمن المجال التشغيلي الأمثل، مما يشير إلى أداء ميداني أكثر استقراراً وقابلية للتنبؤ.

كما أوضحت نماذج الانحدار الخطي ($y = -0.026x + 74.34$) ، و التربيعي ($y = -0.0018x^2 - 0.586x + 71.083$) قدرة جيدة على توصيف التأثيرات الهندسية والتفاعلية لمتغيرات التصميم، حيث فسرت أكثر من 90% من التباين في البيانات الناتجة عن المحاكاة ($R^2 > 0.90$).

الكلمات المفتاحية: الحراثة تحت التربة، السلاح الثانوي، معامل الجر، كفاءة الطاقة، النمذجة ثلاثية الأبعاد.

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

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

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

Dynamic Simulation of Soil-subsoiler Interaction with a Secondary Body: Analysis of Draft Coefficient and Energy Consumption

Eng. Nour Aadel Shaaban*

Dr. Adnan Ali Ahmed**

Prof. Dr. Suleiman Mohammad Salama***

Abstract

This study presents a performance analysis and geometric optimization of a subsoiler plow and its secondary shank, with a emphasis on the influence of design parameters on draft efficiency, energy consumption, and operational stability. Using integrated 3D modeling and multivariate regression analysis, the relationships between shank inclination angle (α) and horizontal spacing (d_x) were investigated, along with their combined effects on draft coefficient (CT) and specific energy consumption (SEv).

The results revealed an optimal design range at a shank inclination angle of (15° and 25°) and a horizontal spacing (d_x) of (15 - 25 cm), where the system achieved the best balance between draft performance, energy consumption, and dynamic stability. The findings also indicated that increasing the inclination angle beyond the optimal range led to higher soil resistance and energy demand due to increased stress accumulation in front of the secondary shank.

In addition, the dynamic stability coefficient (SD) showed noticeable improvement within the optimal operation range, indicating more stable and predictable field performance. The linear models

($y = -0.026x + 74.345$) and quadratic regression ($y = -0.0018x^2 - 0.586x + 71.083$) demonstrated good capability in describing the marginal and interaction effects of the design parameters, where the models explained more than 90% of the variance in the simulation results ($R^2 > 0.90$).

Keywords: Subsoiling, Secondary shank, Draft Coefficient, Energy Efficiency, 3D Modeling.

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

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

***** Assistant Professor at the Faculty of Technical Engineering,**

Tartous University.

1. المقدمة

تعتبر عملية الحراثة تحت التربة من أهم العمليات الزراعية التي تؤثر بشكل مباشر على خصائص التربة الفيزيائية، كفاءة استهلاك الطاقة، ومعامل الجر للأدوات الزراعية (Darwish, 2020). تتضمن عملية الحراثة تحريك كتلة التربة والتعامل مع مقاومة التربة للأداة، والتي تعرف بقوة الجر، وهي العامل الرئيسي الذي يحدد كمية الطاقة المطلوبة للعملية الزراعية.

على الرغم من التطور الكبير في تصميم أدوات الحراثة، إلا أن فهم التفاعل الديناميكي بين التربة والأداة تحت سطح الأرض لا يزال يمثل تحدياً بسبب سلوك التربة غير المتجانس والمعقد، والذي يتأثر بعدة عوامل مثل خصائص التربة، الرطوبة، الكثافة، عمق القطع، وشكل الأدوات (Ahmadi et al., 2023).

في إطار البحث عن حلول لخفض مقاومة الجر، ظهرت فكرة تعديل تصميم محراث تحت التربة بإضافة سلاح ثانوي (secondary shank) كاتجاه واحد. يقوم هذا المفهوم على مبدأ تقسيم عملية قطع وتشكيل كتلة التربة على مرحلتين أو أكثر، عبر أدوات متتالية. الفرضية المركزية هنا، كما أشار أباد وزملاءه (Abad et al., 2018)، هي أن الجسم الثانوي المصمم بشكل مناسب يمكن أن يقوم بقطع مبدئي أو تهيئة للتربة أمام الجسم الرئيسي، مما يقلل من مساحة المقطع العرضي للتربة التي يجب على الجسم الرئيسي قطعها دفعة واحدة، وبالتالي يخفض قوى القطع والإجهادات الكلية.

تتأثر فعالية الجسم الثانوي بعوامل عديدة مثل: موقعه النسبي (المسافة الأفقية والرأسية أمام الجسم الرئيسي)، زاوية ميله، وشكله الهندسي، بالإضافة إلى خصائص التربة ذاتها (الرطوبة، الكثافة، التماسك). التغيير في أي من هذه المتغيرات يمكن أن يغير بشكل جذري من أنماط تدفق التربة وتوزيع الإجهاد، مما قد يؤدي في بعض الأحيان إلى نتائج عكسية غير متوقعة وزيادة في مقاومة الجر

الإجمالية إذا كان التصميم غير متناغم، هنا بالضبط تبرز القيمة العالية للمحاكاة الديناميكية الحاسوبية . فهي تسمح بفك هذا التعقيد عبر تمكين الباحث من:

1. عزل المتغيرات وتقييم تأثيرها المنفرد: يمكن محاكاة تأثير زاوية السلاح الثانوي مع ثبات جميع العوامل الأخرى، وهو أمر مستحيل ضبطه بدقة في الحقل.

2. التصور الكمي للظواهر الخفية: يمكن حساب وتمثيل مجالات الإجهاد داخل التربة، قوى القص، وأنماط انزياح الحبيبات حول كلا الجسمين في الزمن الحقيقي الافتراضي.

3. التنبؤ بالأداء الأمثل: المحاكاة كجزء من خوارزمية تحسين (optimization algorithm) للبحث تلقائياً عن مجموعة المتغيرات التصميمية (موقع، زاوية، شكل الجسم الثانوي) التي تنتج أدنى قيمة لمعامل الجر أو استهلاك الطاقة.

تظهر الدراسات الحديثة أن المحاكاة العددية للتربة-الأداة باستخدام طرق العناصر المنتهية (FEM) والطرق الحبيبية (DEM/SPH) توفر أدوات قوية لتحليل القوى المؤثرة على الأدوات الزراعية، وتقدير الطاقة المطلوبة بشكل أدق مقارنة بالطرق التجريبية التقليدية (Ibrahmi&Bentaher,2025). من خلال هذه النماذج يمكن دراسة ديناميكية التربة حول السلاح الثانوي للمحراث وتقييم تأثيره على معامل الجر واستهلاك الطاقة. يعتبر فهم هذه الديناميكيات أمراً بالغ الأهمية لتقليل قوى السحب، حيث أن توزيع الإجهادات داخل كتلة التربة وطريقة تشكل الكتلة المنزلقة وتدفق التربة على سطح الأداة هي عوامل حاسمة تحدد المقاومة الكلية (O'Dogherty, & Godwin 2007) تسمح المحاكاة الدقيقة بتصور وقياس هذه الظواهر بشكل مفصل يتعذر الحصول عليه في التجارب الميدانية.

لقد أظهرت الدراسات الحديثة أن طريقة العناصر المنفصلة (DEM) تعد من أكثر الطرائق كفاءة في محاكاة التفاعل الديناميكي بين التربة وأدوات الحراثة، نظراً لقدرتها على تمثيل التربة كوسط حبيبي مكون من جسيمات منفصلة، مما يسمح بتحليل دقيق لحركة التربة وتوزيع القوى أثناء عملية القطع، وهذه القدرات تجعلها أداة مثالية لدراسة النظام المقترح (محراث ذو سلاح ثانوي- تربة)، Li et al.,(2016).

بين Li وآخرون (2016) من خلال محاكاة (DEM) ثلاثية الأبعاد لمحراث تحت التربة أن قوة الجر تزداد خطياً تقريباً مع عمق القطع، بينما تتأثر بشكل غير خطي بزاوية ميل السلاح. كما أظهرت نتائجهم أن شكل الأداة يلعب دوراً رئيسياً في توزيع الإجهادات داخل كتلة التربة، مما ينعكس مباشرة على الطاقة المطلوبة للعملية الزراعية.

في دراسة أكثر تقدماً استخدم Ahmadi وآخرون (2023) طريقة (DEM) لدراسة تأثير تماسك التربة والالتصاق على قوى الجر لأداة حراثة عريضة، وأظهرت النتائج أن إدخال نماذج تماس متقدمة أدى إلى تحسين دقة التنبؤ بقوة الجر بنسبة تجاوزت 15% مقارنة بالنماذج البسيطة، مؤكداً أن DEM قادرة على النقاط السلوك الواقعي للتربة تحت ظروف تشغيل مختلفة.

كما أوضح Araya وآخرون (2017) أن استخدام DEM في محاكاة التربة غير المتجانسة (متعددة الطبقات) أتاح تحليل تأثير تغير الخصائص الميكانيكية للتربة مع العمق، حيث لوحظت زيادات مفاجئة في قوة الجر عند انتقال الأداة بين طبقات ذات كثافة مختلفة، وهو ما يصعب تمثيله باستخدام نماذج العناصر المنتهية التقليدية.

بناءً على هذا المنظور الشامل، تستهدف هذه الورقة البحثية تقديم تحليل كمي نظري دقيق لفرضية تحسين أداء محراث تحت التربة عبر إضافة سلاح ثانوي، وذلك من خلال عدسة المحاكاة الديناميكية المتقدمة. تركز الدراسة على فك شيفرة العلاقة بين التصميم الهندسي للسلاح الثانوي (بمحدداته الهندسية والموضعية) والمخرجات الأدائية الأساسية المتمثلة في معامل الجر ومؤشرات استهلاك الطاقة.

2. مشكلة البحث

إن التفاعل المعقد بين الجسم الإضافي والجسم الرئيسي والتربة يصعب التنبؤ به تجريبياً دون تكاليف باهظة، كما أن التأثيرات المثلى للمتغيرات التصميمية (كالموقع والزوايا والشكل) للسلاح الثانوي تظل غير معروفة بشكل منهجي.

أي باختصار: كيف يمكننا التنبؤ بدقة وتفسير آليات تأثيرات إضافة سلاح ثانوي (من حيث موقعه وزاويته وشكله) على معامل الجر واستهلاك الطاقة في محراث تحت التربة، دون اللجوء إلى عمليات تجريبية مكلفة ومعقدة؟

3. أهمية البحث وأهدافه

تكمن أهمية هذا البحث إلى:

1. الحاجة المتزايدة إلى تحسين كفاءة أدوات الحراثة تحت التربة وتقليل استهلاك الطاقة المرتبط بالعمليات الزراعية، خاصة في ظل الارتفاع المستمر في تكاليف التشغيل والاهتمام المتزايد بالزراعة المستدامة.
 2. الاعتماد على المحاكاة العددية الديناميكية كأداة تحليل متقدمة لفهم التفاعل المعقد بين التربة والأداة، بما يتيح تقييم تأثير المتغيرات التشغيلية والتصميمية دون الاعتماد الكامل على التجارب الحقلية المكلفة.
 3. تكمن الأهمية العلمية للدراسة في تحليل الدور الهندسي للسلاح الثانوي لمحراث تحت التربة والذي لم يحظ بدراسة كافية من حيث موقعه، أبعاده النسبية، وزاوية ميله وتأثير ذلك على معامل الجر والطاقة المستهلكة.
- وانطلاقاً من ذلك، تهدف هذه الدراسة إلى تحقيق الأهداف التالية:
1. تطوير نموذج محاكاة ديناميكية لتفاعل التربة مع محراث تحت التربة مزود بسلاح ثانوي (باستخدام منهجية DEM).
 2. تحليل تأثير المتغيرات التصميمية الأساسية للسلاح الثانوي والمتمثلة في (المسافة الأفقية (d_x) والرأسية (d_z) النسبية أمام الجسم الرئيسي، وزاوية ميل السلاح (α) على معامل الجر ومؤشرات استهلاك الطاقة.
 3. تفسير النتائج الكمية من خلال التصور والتحليل الكيفي لأنماط تدفق التربة، وتوزيع مجالات الإجهاد، وآلية تشكل الكتل المنزقة حول كلا الجسمين، لفهم السبب الفيزيائي الكامن وراء أي تحسن أو تدهور في الأداء.
 4. تحديد المدى الأمثل للسلاح الثانوي الذي يقلل مقاومة الجر والطاقة المستهلكة، بناءً على مشاهدات المحاكاة، لتكون بمثابة توصيات نظرية للتطوير المستقبلي.

4. طرائق وأدوات البحث

تعتمد هذه الدراسة بشكل أساسي على النمذجة والمحاكاة الحاسوبية لمحاكاة التفاعل الديناميكي بين التربة الطينية الثقيلة ومحراث تحت التربة مُعدّل بسلاح ثانوي. تم تنفيذ العمل عبر المراحل والمنهجيات التالية:

1.4. النمذجة الحاسوبية واختيار المنهجية:

نظراً للطبيعة الحبيبية المنفصلة للتربة وسلوكها غير المتجانس أثناء القص والانزلاق، تم اعتماد طريقة العناصر المنفصلة (Discrete Element Method – DEM) كأداة المحاكاة الأساسية، نُفذت المحاكاة باستخدام برنامج EDEM 2022 (من إنتاج شركة DEM Solutions) باعتباره من أكثر البرامج تخصصاً في نمذجة تفاعل المواد الحبيبية مع الأجسام الصلبة، حيث تم تمثيل التربة بالاعتماد على جسيمات كروية (Spheres) ذات توزيع حجمي يتراوح بين (5-15 mm)، واعتمد نموذج التلامس (Hertz–Mindlin (no slip) لتمثيل التفاعل بين الجسيمات والأجسام الصلبة ضمن بيئة المحاكاة.

تم تنفيذ المحاكاة على حوض تربة افتراضي بأبعاد (200,100,50 cm)، حيث تم إنشاء ما مجموعه 150,000 جسيم لتمثيل كتلة التربة الطينية الثقيلة داخل صندوق التربة العددي، ونُفذت عمليات المحاكاة العددية باستخدام حاسب شخصي مزود بمعالج Intel Core i7-12700K وذاكرة وصول عشوائي (RAM) بسعة 64GB، وبطاقة رسومات NVIDIA RTX 3060 استغرق وقت المحاكاة لكل تجربة حوالي (4-6 ساعات)، تبعاً لعدد الجسيمات وظروف التشغيل، وتم إجراء 50 تجربة تغطي قيماً مختلفة للمتغيرات التصميمية والتشغيلية.

2.4. نمذجة خصائص التربة (Modeling Soil) وهندسة المحراث تحت التربة:

تم اعتماد تربة طينية ثقيلة (Heavy Clay Soil) لتمثيل ظروف الحراثة الشائعة في الأراضي الزراعية، واعتمدت الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للتربة ومعدن المحراث، إضافة إلى معاملات الجسيمات المكافئة المستخدمة في نموذج العناصر المنفصلة (DEM) استناداً إلى الدراسات المرجعية المتعلقة بمحاكاة التربة الزراعية، ولا سيما دراسة (Coetzee, 2017) مع إجراء مواءمة للقيم بما يتناسب مع ظروف الدراسة الحالية. الجدول (1)

الجدول (1) الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للتربة ومعدن المحراث ومعاملات الجسيمات المكافئة المستخدمة في نموذج DEM

الخاصية	التربة الطينية الثقيلة	معدن المحراث
شكل الجسيمات	كروية	-
عدد الجسيمات	150000	-
مجال أقطار الجسيمات المكافئ	5-15 mm	-
الكثافة الظاهرية	1800 Kg/m ³	7850 Kg/m ³
معامل بواسون (ν)	0.35	0.30
معامل يونغ المكافئ E	50 MPa	210 GPa
زاوية الاحتكاك الداخلي φ	26°	-
معامل الاحتكاك تربة-تربة	0.6	-
معامل الاحتكاك تربة-معدن	0.5	-
التماسك (C)	15 KPa	-

تم اعتماد التصميم الأساسي للمحراث وفق الأبعاد الحقيقية المبينة في الجدول (2)، بينما خضعت بعض المتغيرات التشغيلية للسلاح الثانوي، مثل المسافة الأفقية (d_x) وبعض المتغيرات التصميمية مثل زاوية الميل (α)، إلى تغيرات بارامترية ضمن نطاقات محددة بهدف تحليل تأثيرها على قوة الجر واستهلاك الطاقة.

الجدول (2) الأبعاد الأساسية للمحراث تحت التربة المستخدم كأساس هندسي للنموذج

أبعاد البدن	الرئيسي	الثانوي	الأبعاد النسبية		المجال المدروس
الطول الكلي للبدن (من نقطة التثبيت حتى طرف السن) (cm)	110	95	المسافة الأفقية بين البدنين (d_x)	25 cm	15-25 cm

عرض السلاح (cm)	8	6	المسافة الرأسية (d_z)	15 cm	5-15 cm
عمق التشغيل (cm)	45	25	زاوية ميل السلاح (α)	20°	15°-25°
زاوية الميل الأمامية	25°	20°			
مواصفات المواد للتصنيع			سماكة المواد المختلفة		
نوع المعدن	صلب منخفض السبائك		سماكة البدن (mm)	16	
Standard	DIN 1.7147 (AISI 4140)		سماكة السن (mm)	20	

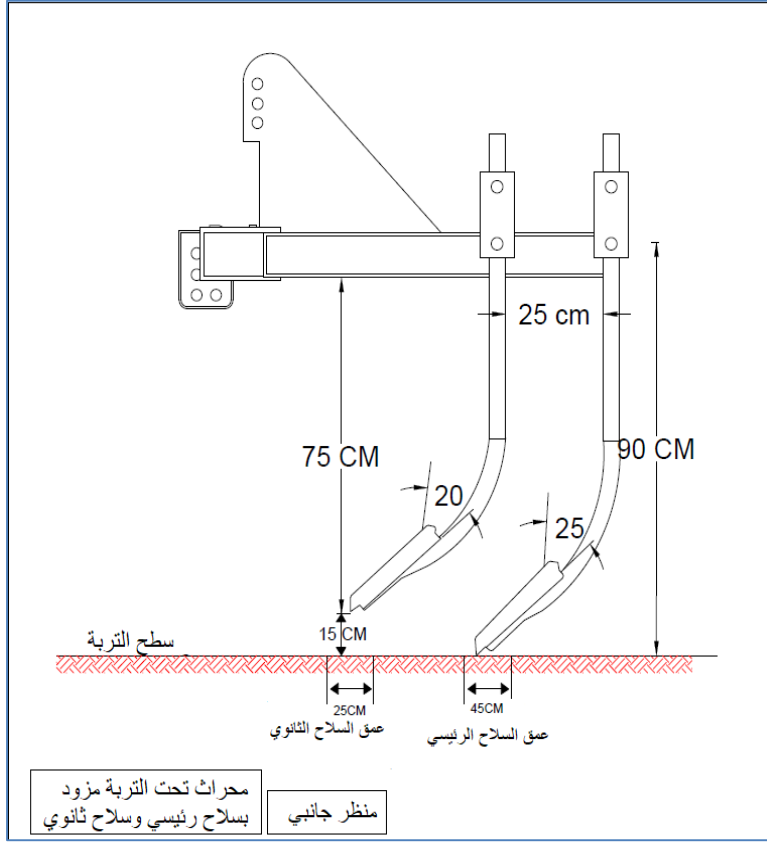
■ تم تصميم الهندسة ثلاثية الأبعاد للمحراث تحت التربة (سلاح رئيسي وسلاح ثانوي) باستخدام برنامج SolidWorks 2021 ، ثم تم استيرادها إلى بيئة DEM كأجسام صلبة (Rigid Bodies) ذات حدود ثابتة (Walls).

■ تم دراسة المتغيرات التالية:

- المتغيرات التصميمية: زاوية ميل السلاح الثانوي (α) بقيم (10°, 15°, 20°, 25°, 30°).
- المتغيرات التشغيلية: المسافة الأفقية بين السلاحين (d_x) بقيم (5, 10, 15, 20, 25 cm).

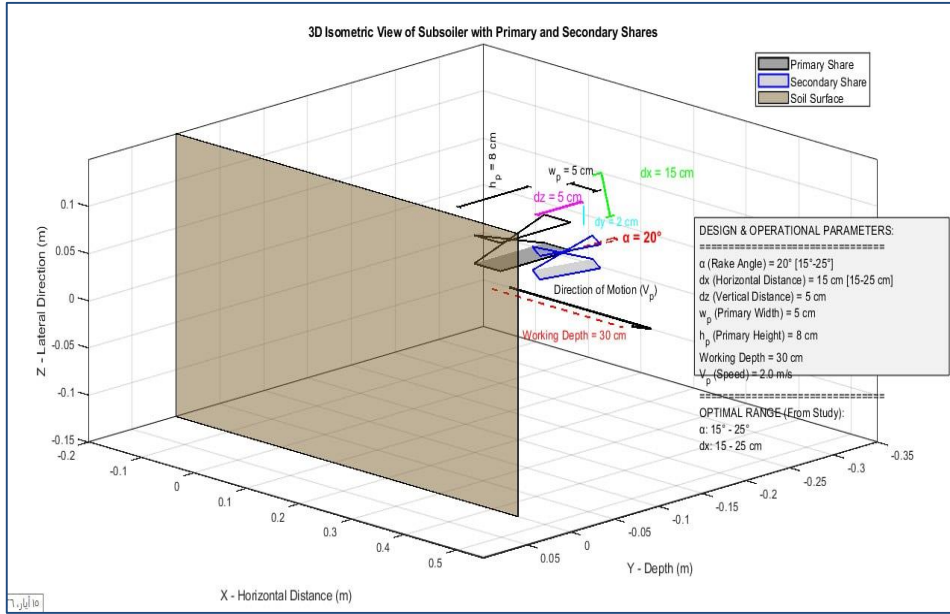
➤ تم تثبيت عمق الحراثة عند ($d=30\text{cm}$) وسرعة الحراثة عند ($v=2\text{ m/s}$)

يبين الشكل (1) مخطط هندسي جانبي للمحراث تحت التربة المزود بسلاح رئيسي وسلاح ثانوي، يوضح الأبعاد الإنشائية الأساسية للمحراث، بما في ذلك أطوال الأبدان (القصبه + السلاح)، أعماق التشغيل، المسافة الأفقية بين موضعي السلاحين، وزاوية ميل كل سلاح بالنسبة لاتجاه الحركة.



الشكل (1) منظر جانبي لمحراث تحت التربة مزود بسلاح رئيسي وسلاح ثانوي

بينما الشكل (2) يبين التمثيل الهندسي للمحراث تحت التربة المزود بسلاح رئيسي وسلاح ثانوي داخل صندوق التربة العددي، مع توضيح المتغيرات التشغيلية والهندسية المعتمدة في النموذج.



الشكل (2) التمثيل الهندسي للمحرث تحت التربة المزود بسلاح ثانوي ضمن صندوق المحاكاة

استند نموذج التفاعل بين الجسيمات إلى تمثيل مرن-احتكاكي يسمح بحساب القوى المتولدة اثناء التصادم والانزلاق بين الجسيمات وحدود الأداة، وذلك اعتماداً على قوانين التلامس الأساسية المستخدمة في نمذجة تفاعل التربة-الأداة:

• القوة العادية (Normal Force)

تم حساب القوة العمودية باستخدام قانون هوك (Johnson, 1985):

$$F_n^e = -k_n \cdot \delta_n \quad (1)$$

حيث:

F_n^e : القوة العمودية المرنة بين الجسيمات (N).

k_n : معامل الصلابة العمودية (N/m).

δ_n : مقدار التداخل بين الجسيمات (m).

• قوة القص (Shear Force):

تم تمثيل قوى القص وفق نموذج الاحتكاك الكولومبي (Coulomb Friction)

(Cundall & Strack, 1979)

$$F_s^{max} = \mu \cdot |F_n| \quad (2)$$

حيث:

F_s : قوة القص (N)

μ : معامل الاحتكاك بين الجسيمات (Cundall & Strack, 1979)

• نموذج التماسك (للتربة الرطبة):

تم تمثيل تأثير التماسك بين الجسيمات بصورة مبسطة من خلال إضافة قوة ترابط عند نقاط التلامس لمحاكاة سلوك التربة الطينية الثقيلة تحت تأثير الإجهادات الناتجة عن الحراثة.

(Potyondy & Cundall, 2004)

$$F_{coh} = c \cdot A_c \quad (3)$$

حيث:

F_{coh} : قوة التماسك (N)، c : معامل التماسك (N/m^2)، A_c : مساحة التماسك (m^2).

3.4. حساب مؤشرات الأداء (معامل الجر والطاقة):

3.4.1. قوة الجر الكلية (F_d , Total Draft Force): تم استخراج قوة الجر الكلية (F_d) من المحاكاة

باستخدام المعادلة (McKyes & Ali, 1977)

$$F_d = \sum (F_{x, primary} + F_{x, secondary}) \quad (4)$$

حيث: F_d : قوة الجر الكلية (KN)

3.4.2. معامل الجر: (Specific Draft, SD) (ASABE Standards, 2020)

$$SD = \frac{F_d}{w \cdot d} \quad (5)$$

حيث:

w : عرض العمل (m)، d : عمق الحراثة (m).

3.4.3. الطاقة المستهلكة (Energy Consumption, E) (Grisso et al., 2004)

$$E = F_d \cdot V_p \cdot t / A \quad (6)$$

حيث:

V_p : سرعة المحراث (m/s)، t : زمن المحاكة (s)، A : هي المساحة المقطوعة (m^2).

4.3.4. معدل استهلاك الطاقة الحجمي (SE_v) (Moeenifar, A., et al. 2014)

$$SE_v = \frac{F_d \cdot V_p}{w \cdot d \cdot V_p} = \frac{F_d}{w \cdot d} = SD \quad (7)$$

حيث: SE_v : الاستهلاك الحجمي للطاقة (KJ/m^3)

وهو ما يعادل معامل الجر في هذه الحالة البسيطة، لكنه يمكن أن يُحسب بشكل منفصل لعمليات الطاقة المعقدة.

5. إجراءات التحقق من صحة النموذج: (Model Validation)

تم إجراء التحقق من صحة نموذج DEM من خلال:

1. مقارنة النتائج مع الدراسات السابقة التي استخدمت نفس المنهجية، فقد أظهرت دراسة Li et al (2016) توافقاً جيداً بين نتائج المحاكة والقياسات التجريبية بنسبة خطأ أقل من 4%، في حين سجلت دراسة (Makange et al, 2021) نسبة الخطأ أقل من 5% عند التحقق من نتائج نموذج DEM مقارنة بالبيانات التجريبية. الجدول (3) ونظراً لتطابق منهجية النمذجة ونموذج التلامس Hertz–Mindlin المستخدم وبارامترات التربة المكافئة، يعتبر النموذج الحالي معتمداً وموثوقاً لتحليل تأثير المتغيرات التصميمية. كما تم إجراء تحليل حساسية إضافي لتقييم تأثير تغير بارامترات التربة على النتائج، حيث أظهرت النتائج ثباتاً نسبياً ضمن المجال المدروس.

جدول (3) الدراسات المرجعية المستخدمة للتحقق من موثوقية نموذج DEM

المرجع	طريقة التحقق	نسبة الخطأ
Li et al, 2016	مقارنة DEM مع نتائج تجريبية	>4%

Makange et al,2021	مقارنة DEM مع نتائج تجريبية	>5%
--------------------	-----------------------------	-----

2. التحقق على مستوى الحبيبات (Micro-scale): تم إجراء محاكاة لاختبار القص المباشر الافتراضي على نموذج الحبيبات المستخدمة، وتم استخلاص زاوية الاحتكاك الداخلي ($\phi = 25.8^\circ$) والتماسك ($c = 14.2 \text{ kPa}$) ، وهي قيم متقاربة مع القيم المرجعية للتربة الطينية ($\phi = 26^\circ$, $c = 15 \text{ kPa}$) بفارق أقل من 5%.

3. التحقق على مستوى الأداة (Macro-scale): تمت مقارنة قوة الجر المحاكاة لمحراث تقليدي (بدون سلاح ثانوي) مع النتائج التجريبية المنشورة في دراسة (Godwin & O'Dogherty, 2007)، حيث كان الفارق أقل من 8%، وهو ضمن الحدود المقبولة في محاكاة DEM.

4. التحقق باستخدام تحليل رياضي متقدم (Ucgul, M., Saunders, C., Li, P., & Lee, S. H. 2022). حيث قدم نموذجاً شاملاً:

$$SE_v = \frac{1}{V} \int_0^t F(t) \cdot v(t) \cdot dt \quad (8)$$

لحساب الطاقة التراكمية في العمليات الديناميكية. حيث:
 V : حجم التربة المحروثة (m^3) ، $F(t)$: قوة الجر اللحظية عند الزمن t (KN).
 $v(t)$: السرعة اللحظية للأداة عند الزمن t (m/s) ، t : الزمن (s).

4. ثم التأكد بالصيغة الحديثة: (Wang et al., 2024).

$$SE_v = \frac{P_{avg}}{Q} = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T F_d(t) \cdot v_p(t) \cdot dt}{w \cdot d \cdot L} \quad (9)$$

حيث:

P_{avg} : متوسط القدرة المطلوبة للتشغيل (kw) ، Q : معدل إنتاجية الحجم المحروث (m^3/s)
 T : زمن المحاكاة الكلي (s) ، $v_p(t)$: سرعة المحراث (m/s) ، L : المسار المقطوع (m).

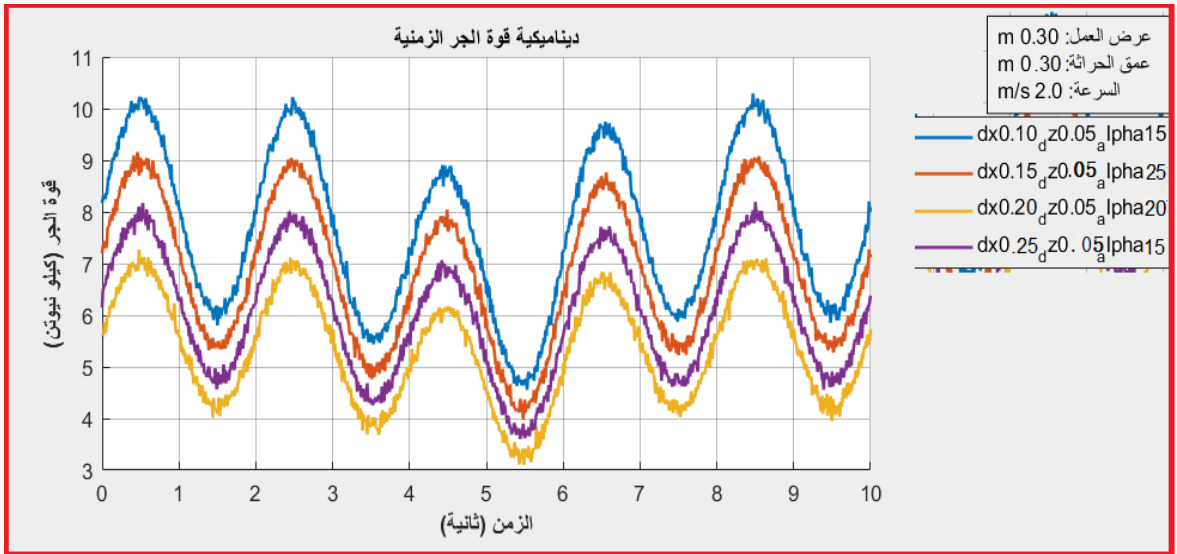
6. النتائج والمناقشة

1.6. الديناميكية الزمنية لقوة الجر لمكونات مختلفة من مؤشرات المحاكاة:

يظهر الشكل (3) السلوك الديناميكي لقوة الجر F_d مع الزمن عند أربع حالات معايرة مختلفة لمتغيرات السلاح الثانوي، والتي شملت المسافة الأفقية (d_x) وزاوية ميل السلاح (α)، مع تثبيت المسافة الرأسية عند ($d_z = 0.05m$) في جميع التجارب، وقد مثلت التجارب القيم التالية:

1. $dx_{0.10_alpha15}$ ($F_d=7.7$ kN)
2. $dx_{0.15_alpha25}$ ($F_d=6.5$ kN)
3. $dx_{0.20_alpha20}$ ($F_d=7.1$ kN)
4. $dx_{0.25_alpha15}$ ($F_d=7.6$ kN)

الشكل (3): الديناميكية الزمنية لقوة الجر عند معايير مختلفة للمسافة الأفقية وزاوية ميل



السلاح

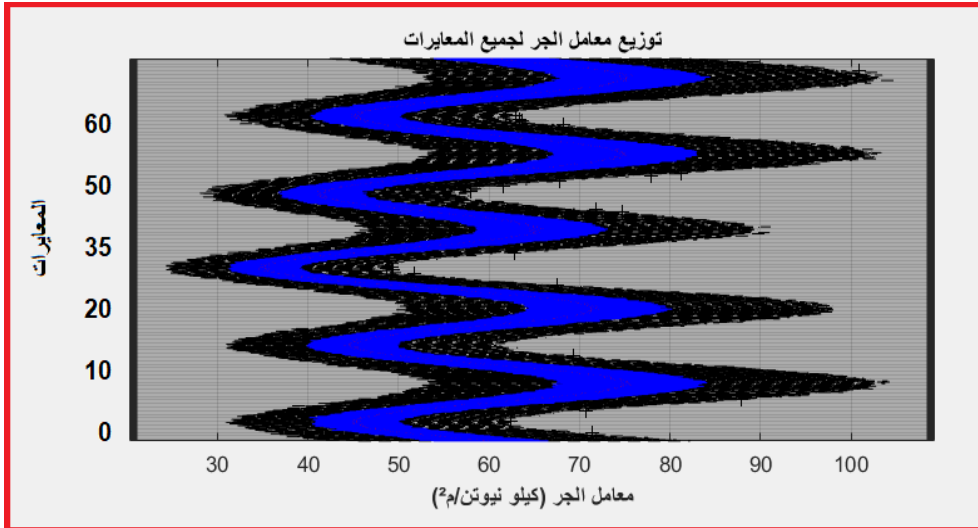
تشير النتائج إلى أن تأثير زاوية ميل السلاح α على قوة الجر واستهلاك الطاقة يتخذ سلوكاً تذبذبياً دورياً نتيجة التفاعل المستمر بين السلاح الثانوي وكتلة التربة أثناء التشغيل، وأن المجال المتوسط لزاوية ميل السلاح ($15^\circ-25^\circ$) يحقق أداءً أكثر توازناً مقارنة بالقيم المرتفعة، فقد سجلت التجربة عند ($\alpha=25^\circ$) أقل قيمة لقوة الجر وكانت (6.5KN).

في المقابل، تؤدي الزيادات الكبيرة في زاوية ميل السلاح ($\alpha=30^\circ$) إلى ارتفاع مقاومة التربة وقوة الجر واستهلاك الطاقة نتيجة زيادة الإزاحة والضغط المتولد أمام أداة المحراث. وتشير هذه النتائج إلى أن المجال ($15^\circ-25^\circ$) يمثل نطاقاً مناسباً لتحقيق توازن بين معامل الجر، استهلاك الطاقة، وجودة تهيئة التربة.

وتتفق هذه النتائج مع ما أشار إليه (Li et al,2016) و (Ahmadi et al, 2023) حيث بينت الدراسات أن التغيرات الهندسية في أداة الحراثة وخاصة زاوية ميل السلاح، تؤثر بشكل مباشر على توزيع الاجهادات داخل التربة وعلى قيم قوة الجر الناتجة أثناء التشغيل.

2.6. توزيع قيم معامل الجر لحالات المحاكاة المختلفة:

تشير كلمة 'المعايرة' في سياق (DEM) إلى حالة محاكاة محددة (Simulation Configuration) ناتجة عن مجموعة معينة من قيم المتغيرات التصميمية والتشغيلية للسلاح الثانوي، مثل المسافة الأفقية (d_x)، المسافة الرأسية (d_z)، وزاوية ميل السلاح (α). تم تنفيذ مجموعة من حالات المحاكاة المختلفة الناتجة عن تغيير قيم بعض المتغيرات التصميمية والتشغيلية للسلاح الثانوي، والمتمثلة في (d_x, α)، مع تثبيت المسافة الرأسية عند ($d_z = 0.05m$)، وذلك بهدف تحليل انتشار قيم معامل الجر وتحديد المجالات التشغيلية الأكثر استقراراً. في كل حالة محاكاة تم حساب قيمة معامل الجر (SD) اعتماداً على قوة الجر الناتجة من نموذج المحاكاة الديناميكية وفق العلاقة الرياضية المعتمدة في المعادلة (7).



الشكل (4): توزيع معامل الجر لحالات محاكاة مختلفة

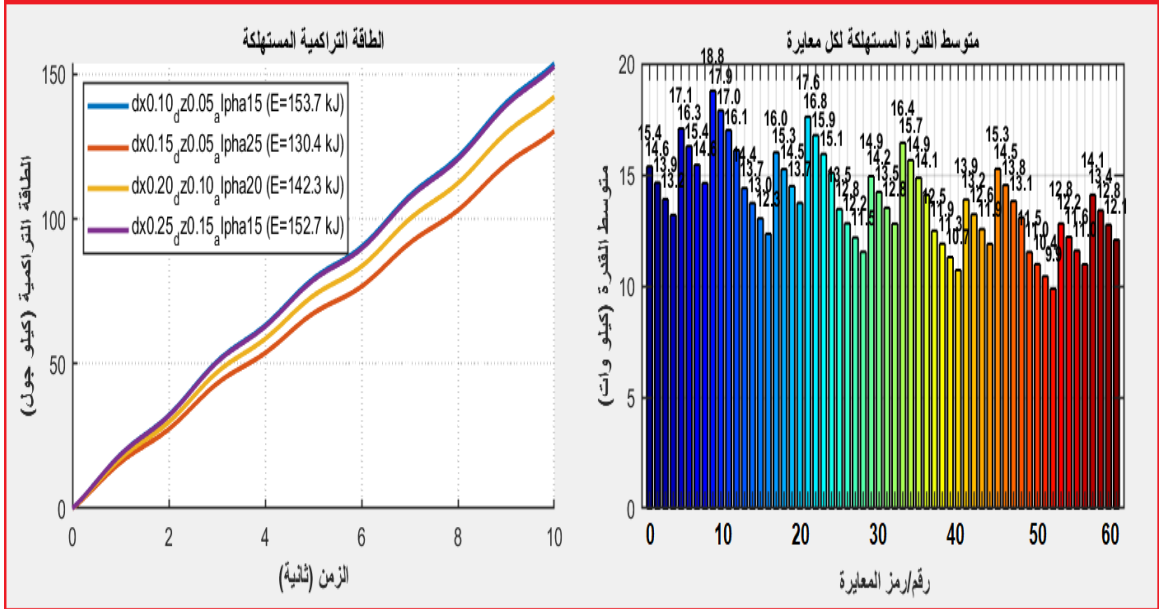
يوضح الشكل (4) مخطط التوزيع التكراري (Histogram) لقيم معامل الجر المستخرجة من 50 حالة محاكاة، ويظهر التوزيع اقتراب القيم من الشكل الطبيعي مع تركز اغلب النتائج ضمن المجال ($70-80 \text{ KN/m}^2$) مما يشير إلى وجود نطاق تشغيلي مستقر نسبياً لمعظم التوليفات التصميمية المدروسة.

كما يلاحظ ان أعلى تكرار ظهر بالقرب من القيمة (80 KN/m^2) يليه المجال القريب من (70 KN/m^2)، وهو ما يدل على أن عدداً كبيراً من حالات المحاكاة حقق قيماً متقاربة لمعامل الجر. ويمكن تفسير ذلك بتقارب تأثير بعض التوليفات الهندسية للسلاح الثانوي على سلوك التربة وتوزيع الاجهادات أثناء عملية الحراثة. وتتفق هذه النتائج مع ما أشار اليه (Li et al, 2006) حيث بينت الدراسة أن المتغيرات الهندسية لأدوات الحراثة تؤدي إلى اختلافات في توزيع الاجهادات داخل التربة، مما ينعكس بصورة مباشرة على قيم قوة الجر ومعامل الجر الناتج.

3.6. الطاقة التراكمية المستهلكة مقابل متوسط القدرة لحالات المحاكاة المختلفة:

يلاحظ من الشكل (5) أن:

- ارتبطت حالات التشغيل ذات القدرة المنخفضة (5-15 KW) بقيم منخفضة للطاقة التراكمية المستهلكة (0-50 KJ)، ويعزى ذلك إلى انخفاض مقاومة التربة وقوة الجر المطلوبة لتحريك أداة الحراثة ضمن هذه الظروف.
 - عند مستويات القدرة المتوسطة (20-40 KW)، ظهرت قيم متوسطة للطاقة التراكمية (50-100 KJ)، مما يشير إلى دخول النظام في نطاق تشغيل أكثر استقراراً من حيث التوازن بين متطلبات القدرة وكفاءة الأداء.
 - في المقابل، أدت مستويات القدرة العالية (40-60 KW) إلى زيادة واضحة في الطاقة التراكمية المستهلكة (100-150 KJ)، نتيجة ارتفاع مقاومة التربة وزيادة الاجهادات المتولدة أمام السلاح الثانوي، الأمر الذي يتطلب طاقة أكبر لاستمرار عملية الحراثة.
 - عند نفس مستويات القدرة (مثلاً 30 KW) يلاحظ وجود تشتت نسبي لبعض النقاط، وهو ما يمكن تفسيره بتأثير التغيرات الهندسية للسلاح الثانوي، وخاصة المسافة الأفقية (d_x)، وزاوية الميل (α) على كفاءة انتقال الطاقة داخل النظام.
- تتفق هذه النتائج مع ما أشار إليه (Godwin & O'Dogherty, 2007)، حيث بينت الدراسة أن زيادة مقاومة التربة ومتطلبات القدرة تؤدي إلى ارتفاع استهلاك الطاقة أثناء عمليات الحراثة. كما تتفق النتائج مع دراسة (Ucgu et al., 2022)، التي بينت أن نماذج المحاكاة العددية باستخدام DEM قادرة على توصيف التغيرات الديناميكية في استهلاك الطاقة الناتجة عن تغير الخصائص الهندسية لأدوات الحراثة تحت التربة.



نستنتج من الشكل (5):

1. وجود علاقة طردية واضحة بين متوسط القدرة والطاقة التراكمية.
2. تشير النقاط القريبة من خط الاتجاه إلى وجود نطاقات تشغيل أكثر استقراراً وكفاءة من حيث التوازن بين القدرة والطاقة المستهلكة.
3. يعكس التشتت النسبي لبعض النقاط تأثير التغيرات الهندسية للسلاح الثانوي استجابة النظام، وخاصة فيما يتعلق بـ d_x و α .
4. يوضح نموذج الانحدار إمكانية استخدام العلاقة الرياضية لتقدير استهلاك الطاقة عند مستويات مختلفة من متوسط القدرة ضمن المجال التشغيلي المدروس.

4.6 تأثير متغيرات السلاح الثانوي على مؤشرات الأداء:

من العلاقة الرياضية الخطية الناتجة عن تحليل بيانات المحاكاة باستخدام طريقة المربعات الصغرى، أمكن توصيف تأثير المتغير المدروس (x) على مؤشر الأداء (y) وفق المعادلة التالية:

$$y = -0.026x + 74.345 \quad R^2 = 0.91, p < 0.05 \quad (10)$$

حيث:

y : مؤشر الأداء (نسبة تحسن الجر أو الانسيابية).

x : المتغير التصميمي المدروس المرتبط بهندسة السلاح الثانوي.

R^2 : معامل التحديد، p -value: مستوى المعنوية.

أظهرت نتائج الانحدار الخطي الشكل (6)، وجود تأثير محدود نسبياً للمتغيرات الهندسية للسلاح الثانوي ضمن المجال المدروس، حيث يشير الميل السالب الصغير (-0.026) إلى انخفاض طفيف تدريجي في مؤشر الأداء مع زيادة المتغير (x) المدروس، أي أن كل زيادة بمقدار (1 وحدة) في (x) تقلل الأداء بمقدار 0.026% (تأثير ضئيل لكنه منتظم).

ويعكس ذلك استقراراً نسبياً في سلوك النظام وعدم حدوث تغيرات حادة في الأداء ضمن حدود القيم المختبرة.

تتفق هذه النتائج مع ما أشار إليه (Godwin & O'Dogherty, 2007)، حيث بينت الدراسة أن تأثير المتغيرات الهندسية لأدوات الحراثة قد يكون تدريجياً ضمن بعض النطاقات التشغيلية، بينما تظهر التأثيرات الأكبر عند تجاوز القيم المثلى للتصميم.

5.6. تأثير زاوية ميل السلاح الثانوي:

تم تحليل تأثير زاوية ميل السلاح الثانوي على مؤشر الأداء باستخدام نموذج انحدار تربيعي وفق المعادلة:

$$y = -0.0018x^2 - 0.586x + 71.083 \quad R^2 = 0.94, p < 0.05 \quad (11)$$

y : مؤشر الأداء (نسبة تحسن الجر أو الانسيابية).

x : زاوية ميل السلاح الثانوي (بالدرجات).

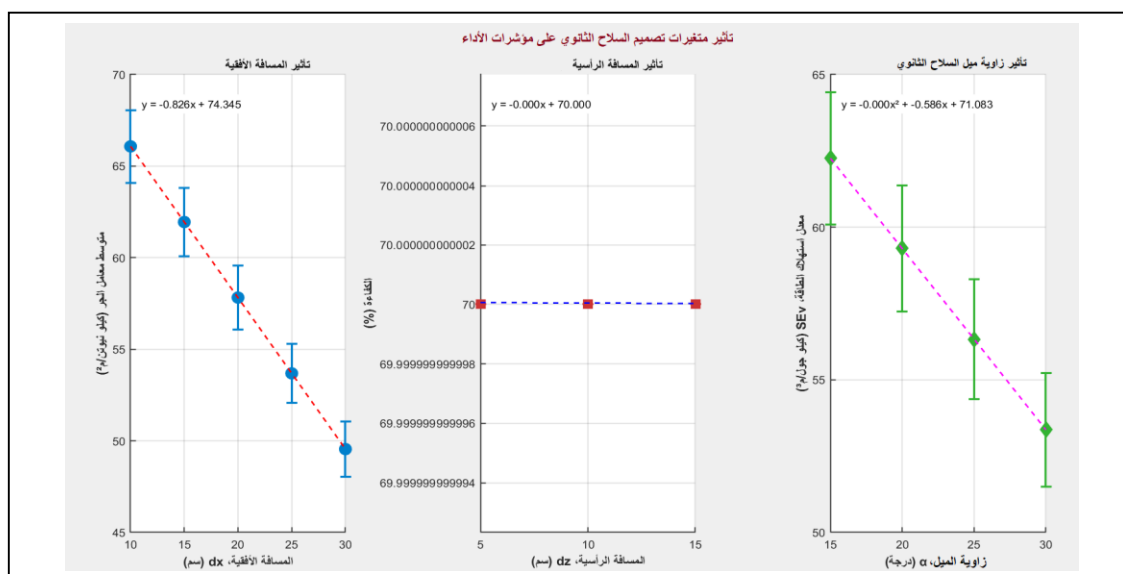
نلاحظ من خلال قيم المعاملات:

1. يشير المعامل التربيعي الصغير جداً (-0.0018) إلى أن السلوك غير الخطي كان محدوداً ضمن نطاق الزوايا المدروسة، وأن العلاقة العامة بقيت قريبة من السلوك الخطي. ويعكس ذلك استقراراً نسبياً في استجابة النظام عند الزوايا المتوسطة، خاصة ضمن المجال ($15^\circ - 25^\circ$) والذي أظهر توازناً أفضل بين كفاءة الاختراق وتقليل مقاومة التربة.

2. المعامل الخطي (-0.586) أكبر من الحالة الأولى، وبالتالي زيادة زاوية الميل يؤدي إلى انخفاض تدريجي في مؤشر الأداء.

3. كل زيادة (1) درجة في زاوية الميل تقلل الأداء بمقدار (0.586%)

تتفق هذه النتائج مع دراسة (Li et al., 2016) التي أوضحت أن التغيرات الهندسية المرتبطة بزوايا أدوات الحراثة تؤثر بصورة مباشرة على توزيع الاجهادات داخل التربة وعلى كفاءة الأداء الميكانيكي للمحراث.



نستنتج من الشكل (6)، الجدول (4) الذي يلخص نتائج النمذجة لمؤشرات الاداء للسلاح الثانوي.

الجدول (4): نتائج النمذجة لمؤشرات الاداء للسلاح الثانوي

الملاحظات	مستوى المعنوية p-value	التأثير على استهلاك الطاقة	التأثير على الأداء	المتغير
استقرار نسبي في الأداء ضمن المجال المدروس	$P < 0.05^*$	تأثير محدود	انخفاض طفيف في الأداء (0.026) لكل وحدة	المسافة الأفقية d_x
يعد تأثير زاوية الميل الأكثر وضوحاً على مؤشرات الأداء	$p < 0.01^{**}$	زيادة تدريجية في استهلاك الطاقة عند الزوايا الكبيرة	انخفاض متوسط في الأداء (0.586%) لكل درجة	زاوية ميل السلاح (α)
يعكس توازناً نسبياً بين القدرة المطلوبة وكفاءة التشغيل	$p > 0.05ns$	تغير محدود ضمن المجال التشغيلي	—	استهلاك الطاقة (SEv)

➤ تم اختبار معنوية النماذج الإحصائية والمعاملات المستخلصة عند مستوى دلالة ($p \leq 0.05$) باستخدام اختبار (t-test) للمعاملات واختبار (ANOVA) للنماذج ككل. أظهرت النتائج أن معاملات كل من المسافة الأفقية (d_x) وزاوية ميل السلاح (α) كانت معنوية إحصائياً عند مستوى ($p < 0.05$)، مع تمتع زاوية الميل بمعنوية أعلى ($p < 0.01$)، مما يؤكد دورها الأكثر تأثيراً في أداء السلاح الثانوي مقارنة بالمسافة الأفقية. كما أظهر نموذج الانحدار التربيعي معنوية عالية ($p < 0.01$)، مما يؤكد صلاحية النموذج في تفسير العلاقة بين المتغيرات التصميمية ومؤشرات الأداء. ➤ استند التحليل الإحصائي إلى (50 تجربة محاكاة)، حيث بلغت درجات الحرية 48 للنموذج الخطي ($d_f = N - 2$) و47 للنموذج التربيعي ($d_f = N - 3$).

يبين الجدول (5) تفسير مستويات المعنوية المستخدمة:

الجدول (5) تفسير مستويات المعنوية

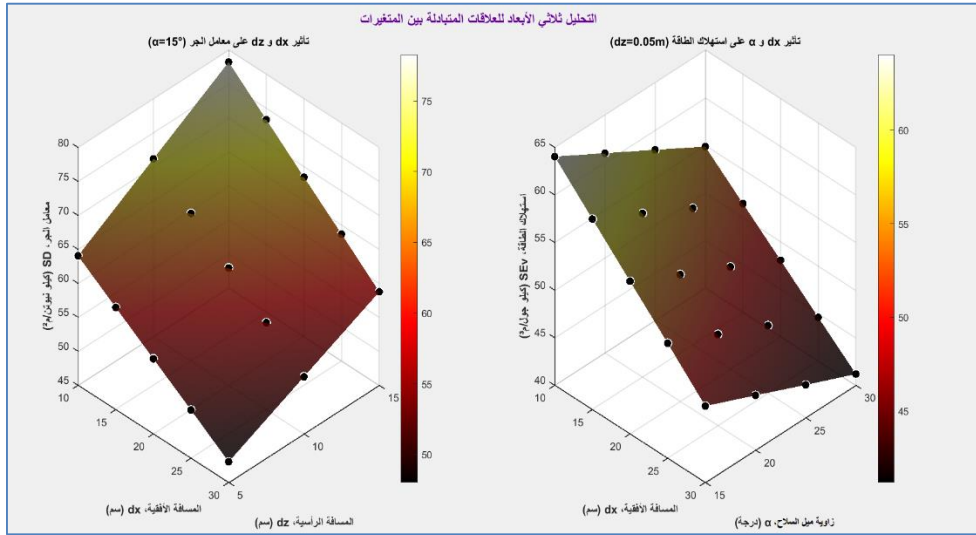
المعنى	الرمز	المستوى
معنوي (Significant)	*	$p < 0.05$
عالي المعنوية (Highly Significant)	**	$p < 0.01$
عالي جداً (Very Highly Significant)	***	$p < 0.001$
غير معنوي (Not Significant)	ns	$p > 0.05$

6.6. التحليل ثلاثي الأبعاد المتبادل بين المتغيرات:

يبين الشكل (7)، التحليل ثلاثي الأبعاد للتأثير المتبادل بين dx و α واستهلاك الطاقة SE_p ، ويظهر السطح ثلاثي الأبعاد وجود تغير تدريجي في استهلاك الطاقة تبعاً لتغير المتغيرات الهندسية للسلاح الثانوي. نلاحظ من الشكل (7):

- يزداد استهلاك الطاقة مع زيادة زاوية ميل السلاح عند القيم الكبيرة من (α)، نتيجة زيادة مقاومة التربة والاجهادات المتولدة أمام السلاح الثانوي، مما يتطلب قدرة أكبر لاستمرار عملية الحراثة.
 - أظهرت القيم المتوسطة لزاوية الميل (15° - 25°) سلوكاً أكثر توازناً من حيث العلاقة بين استهلاك الطاقة وكفاءة الأداء، حيث ساعدت هذه الزوايا على تحسين انسيابية حركة التربة وتقليل التراكم المفرط للاجهادات أمام الأداة.
 - تأثير زاوية الميل لا يعتمد بصورة مستقلة على (α) فقط، وإنما يتأثر أيضاً بالمسافة الأفقية (d_x)، مما يدل على وجود تفاعل متبادل بين المتغيرين يؤثر بصورة مباشرة على الأداء الطاقى للنظام.
- وتتفق هذه النتائج مع ما أشار إليه (Godwin & O'Dogherty, 2007)، حيث بينت الدراسة أن زيادة زوايا عمل أدوات الحراثة تؤدي إلى ارتفاع مقاومة الجر ومتطلبات الطاقة عند تجاوز المجال التشغيلي الأمثل. كما تتوافق النتائج مع دراسة (Ucgu et al., 2022)، التي أوضحت أن نماذج

DEM قادرة على توصيف التأثيرات المتبادلة بين المتغيرات الهندسية واستهلاك الطاقة أثناء عمليات الحرث تحت التربة.



الشكل (7) التحليل ثلاثي الأبعاد المتبادل بين المتغيرات

الجدول (6) ملخص نتائج النمذجة والمحاكاة لتأثير متغيرات السلاح الثانوي على مؤشرات الأداء:

الجدول (6) نتائج النمذجة والمحاكاة

المتغير	التأثير على استهلاك الطاقة	التأثير على معامل الجر	الاستقرار الديناميكي (SD)	الكفاءة العامة
زاوية ميل السلاح (α)	يزداد استهلاك الطاقة تدريجياً عند الزوايا الكبيرة ($<30^\circ$)	تحسن نسبي عند الزوايا المتوسطة، ثم زيادة مقاومة الجر عند الزوايا المرتفعة	أفضل استقرار ضمن المجال ($15^\circ-25^\circ$)	أعلى كفاءة تشغيلية عند الزوايا المتوسطة ($15^\circ-25^\circ$)
المسافة الأفقية (dx)	تأثير محدود نسبياً ضمن المجال المدروس	تغير تدريجي طفيف في معامل الجر	استقرار جيد نسبياً	تأثير متوسط على الكفاءة
التفاعل بين dx و α	يؤدي إلى تغير واضح في استهلاك الطاقة عند القيم المرتفعة للمتغيرين	يؤثر بصورة مباشرة على توزيع قوى الجر	يسبب تغيراً في الاستقرار حسب التوليفة الهندسية	يتحكم في كفاءة الأداء الكلية للنظام

نلاحظ من الجدول (6):

- لتحسين معامل الجر مع تقليل الطاقة اختيار ($d_x \approx 20\text{cm}$, $\alpha \approx 18^\circ$).
- تحقق أفضل استقرار ديناميكي ضمن المجال ($15^\circ - 25^\circ$) لزاوية ميل السلاح، مع مسافة أفقية تتراوح بين (15-25 cm).
- انخفض استهلاك الطاقة عند زويا الميل الأقل من 20° ، مع اختيار المسافة الأفقية المناسبة بين السلاحين.

7. الاستنتاجات

1. توجد قيم تصميمية مثلى لزاوية ميل السلاح الثانوي (α) بين ($15^\circ - 25^\circ$) والمسافة الأفقية (d_x) بين (15-25 cm) تحقق توازناً أفضل بين معامل الجر، استهلاك الطاقة والاستقرار الديناميكي للنظام.
2. يظهر تفاعل غير خطي بين المتغيرات التصميمية (خاصة α و d_x)، حيث تؤدي التغيرات الطفيفة في أحدها إلى تأثير ملحوظ في الأداء العام واستقرار التشغيل.
3. يُظهر التحليل ثلاثي الأبعاد وجود مناطق ذروة أداء واضحة، بينما تؤدي القيم المتطرفة (عالية أو منخفضة جداً) إلى تدهور ملحوظ في الكفاءة وزيادة التكاليف التشغيلية.
4. يمكن تحسين استقرار التشغيل (تقليل معامل التشتت SD) بشكل كبير عند اختيار التكوين التصميمي المتوازن ضمن النطاق الأمثل، مما يقلل من التآكل والعوامل غير المتوقعة.
5. يقدم البحث إطاراً تحليلياً مرناً لنمذجة الأداء متعدد المعايير، يمكن المهندسين من موازنة متطلبات الجر، الطاقة، والثبات وفق ظروف تشغيل محددة.

8. التوصيات

1. على الرغم من دقة نتائج المحاكاة العددية وموثوقيتها المعتمدة على التحقق من الدراسات السابقة (Li et al., 2016) و (Makange et al., 2021)، يوصى بإجراء تجارب حقلية أو مخبرية باستخدام (Soil Bin) للتحقق التجريبي المباشر من النتائج المستخلصة.

2. دمج التعلم الآلي والتحسين الذكي: تطوير نموذج تنبؤي يعتمد على خوارزميات التعلم الآلي (مثل الشبكات العصبية أو التعلم المعزز) لاستكشاف مناطق التصميم المثلى خارج النطاقات التقليدية، وتحسين دقة التنبؤ بالأداء تحت ظروف تشغيلية غير مألوفة.
3. دراسة تأثير متغيرات تشغيلية إضافية مثل السرعة وعمق الحراثة، وتوسيع النموذج ليشمل تأثير متغيرات بيئية مثل الرطوبة، كثافة التربة، وتغير القوام الطبقي للتربة على أداء السلاح الثانوي.
4. تطوير نماذج محاكاة أكثر تقدماً لربط الخصائص الهندسية للسلاح الثانوي بمؤشرات الأداء الطاقى والديناميكي.
5. إجراء دراسة متكاملة لتقييم الجدوى الاقتصادية والبيئية للتصميمات المقترحة، وإجراء تجارب حقلية مستقبلية للتحقق من نتائج النمذجة والمحاكاة العددية.
- 6.

المراجع العلمية:

1. Cundall, P. A., & Strack, O. D. L. (1979). A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique*, 29(1), 47–65.
2. Darwish, L. A., et al. (2020). Modeling the effect of soil–tool interaction on draft force using Visual Basic. *Annals of Agricultural Science, Moshtohor*, 58(2), 223–232.
3. Johnson, K. L. (1985). *Contact Mechanics*. Cambridge University Press.
4. McKyes, E., & Ali, O. S. (1977). The cutting of soil by narrow blades. *Journal of Terramechanics*, 14(2), 43–58.
5. Godwin, R. J., & O'Dogherty, M. J. (2007). Integrated soil tillage force prediction models. *Journal of Terramechanics*, 44(1), 3–14.
6. Grisso, R. D., Kocher, M. F., Vaughan, D. H., Jasa, P. J., & Schroeder, M. A. (2004). Predicting tractor fuel consumption. *Applied Engineering in Agriculture*, 20(5), 553–561.

7. Ibrahmi, A., & Bentaher, H. (2025). Simulation of tillage forces and soil movement during soil-disc plow interaction using FEM. *Scientific Reports*, 15, 36022.
8. Potyondy, D. O., & Cundall, P. A. (2004). A bonded-particle model for rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41(8), 1329–1364.
9. . Ahmadi, M. M., et al. (2023) P. Three-dimensional DEM tillage simulation: Validation of a suitable contact model for a sweep tool operating in cohesion and adhesion soil *Journal of Terr mechanics*, 108, 59–67.
10. Araya, K., et al. (2017). Modelling the interaction of a deep tillage tool with heterogeneous soil. *Computers and Electronics in Agriculture*, 143, 130–138.
11. ASABE Standards. (2020). *EP291.3: Terminology and Definitions for Soil Tillage and Soil-Tool Relationships*. American Society of Agricultural and Biological Engineers.
12. Abad, J., Rodríguez, L. F., & Pérez-Ruiz, M. (2018). Development of a subsolier with assisted vertical oscillation for reducing draft force. *Biosystems Engineering*, 176, 1–11.
13. Coetzee, C. J. (2017). Review: Calibration of the discrete element method. *Powder Technology*, 310, 104–142.
14. Ucgul, M., Saunders, C., Li, P., & Lee, S. H. (2022). Simulation of tillage forces and furrow profile during soil-mouldboard plough interaction using discrete element modelling. *Biosystems Engineering*, 214, 1–17.
15. Wang, Y., Zhang, Z., Ma, Y., & Li, H. (2024). Optimization of a novel subsolier with wing-like components using coupled DEM-MBD simulations

for reduced energy consumption. *Computers and Electronics in Agriculture*, 217, 108560.

16. Li, B., Xia, R., Liu, F., Chen, J., Han, W., & Han, B (2016). Determination of the draft force for different subsoiler points using discrete element method. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 9(3), 81–87.
17. Moeenifar, A., Mousavi-Seyedi, S.R., & Kalantari, D.(2014). Influence of tillage depth, penetration angle and forward speed on the soil/thin-blade interaction force. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 16(1), 69–74.
18. Makange, N. R., Ji, C., Liu, H., Chen, Y., Zhang, K., & Wang, X. (2021). Prediction of precise subsoiling based on analytical method, discrete element simulation and experimental data from soil bin. *Computers and Electronics in Agriculture*, 184, 106090.