مجلة جامعة طرطوس للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (١٠) العدد (٧) ٢٠٢٦
Tartous University Journal for Research and Scientific Studies - engineering Sciences Series Vol. (10) No. (7) 2026

تحليل تأثير زاوية ميل المحراث القرصي على الإجهادات باستخدام منهجية باريتو متعددة الأهداف

د.م عدنان احمد *

د.م ريم إسماعيل **

م. حسن ديب ***

(تاريخ الإيداع ٢٠٢٦/١/١٨ . قُبِل للنشر في ٢٠٢٦/٤/٨)

□ ملخّص □

يقدّم هذا البحث تحليلاً عددياً وتحليلياً لتأثير زاوية الميل (١٥°–٢٥°) على أداء المحراث القرصي المقعر (قطر ٦٦٠ مم، عمق التقعر ١٠٠ مم) في ثلاث ترب: سلتية، وطينية ثقيلة، ومحروثة سابقاً. استخدمت ثلاث منهجيات: (١) نموذج تحليلي مبني على معادلات **Hettiaratchi & Reece** لتحديد قوة السحب والإجهادات، (٢) محاكاة **MATLAB** ثنائية الأبعاد لحساب توزيع إجهادات Von Mises ومؤشر التآكل بموجب نموذج **Archard**، و(٣) تحليل عناصر محدودة ثلاثي الأبعاد في **ANSYS** مع نموذج **Drucker–Prager** للتربة (c = 15 kPa، φ = 26°) واتصال احتكاكي (μ = 0.416). أظهرت النتائج أن الزاوية ٢٠° تحقق الحد الأدنى من مؤشر **Pareto** متعدد الأهداف، حيث سجّلت أقل قوة سحب (28.04 kN في **MATLAB**، 28.1 kN في **ANSYS**)، وأدنى مؤشر تآكل (٠,٠٨٢)، وأعلى كفاءة طاقية (Specific Draft = 4.3 kN/m² في التربة السلتية). وسجّل التحليل في **ANSYS** تركيزاً إجهادياً موضعياً عند X = 65.3 mm, Y = −179.3 mm) =أي في الربع السفلي الأمامي من السطح الأمامي للقرص — بلغ 379.33 MPa، وهو ناتج عن دقة الشبكة (Element Size = 5 mm) وتفعيل التحليل غير الخطي، ولا يشير إلى فشل هيكلّي (نسبة الإجهاد/الحد الأدنى للخضوع = 31.6%). وأظهرت المقارنة أن **MATLAB** يوفر توازناً مقبولاً بين الدقة والكفاءة للتصميم الأولي، بينما يعد تحليل **ANSYS** مرجِعاً في تقييم السلوك الموضعي والتآكل.

الكلمات المفتاحية: محراث قرصي مقعر، زاوية الميل، قوة السحب، إجهاد Von Mises ، تحليل **Pareto**، ، نموذج **Drucker–Prager** .

* أستاذ مساعد في كلية الهندسة التقنية في جامعة طرطوس.

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

*** طالب دراسات عليا (ماجستير) في كلية الهندسة التقنية في جامعة طرطوس.

مجلة جامعة طرطوس للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (١٠) العدد (٧) ٢٠٢٦

Tartous University Journal for Research and Scientific Studies - engineering Sciences Series Vol. (10) No. (7) 2026

Effect of Disc Plough Tilt Angle on Stress Distribution Based on Pareto Multi-Objective Optimization

Hasan Dib *

Dr. Reem Ismail **

Dr. Adnan Ahmed ***

(Received 18/1/2026 . Accepted 8/4/2026)

□ ABSTRACT □

This study presents a comparative analytical and numerical investigation of the effect of tilt angle (15°–25°) on the performance of a concave disc plough (diameter = 660 mm, concavity depth = 100 mm) in three soil types: loam, heavy clay, and previously tilled soil. Three methodologies were employed: (1) an analytical model based on Hettiaratchi–Reece equations for draft force and stress estimation, (2) a 2D MATLAB simulation for von Mises stress distribution and Archard-based wear index calculation, and (3) a 3D finite element analysis in ANSYS using the Drucker-Prager soil model (c = 15 kPa, φ = 26°) and frictional contact (μ = 0.416). Results indicate that a 20° tilt angle yields the lowest Pareto-optimal index, with minimized draft force (28.04 kN in MATLAB, 28.1 kN in ANSYS), wear index (0.082), and specific draft (4.3 kN/m² in loam soil). ANSYS predicts a localized stress concentration at (X = 65.3 mm, Y = –179.3 mm)—the lower-front quadrant of the disc face—reaching 379.23 MPa, attributable to fine meshing and nonlinear analysis, yet remains structurally safe (σ_{max}/σ_y = 31.6%). While MATLAB offers acceptable accuracy for preliminary design, ANSYS remains essential for local stress and wear assessment.

Keywords: Concave disc plough, Tilt angle, Draft force, Von Mises stress, Pareto analysis, MATLAB, ANSYS, Drucker-Prager model, Wear, Loam soil

١. المقدمة(Introduction)

تُعدّ عمليات الحراثة من المراحل الأساسية في النظم الزراعية لما لها من دور مباشر في تحسين الخصائص الفيزيائية للتربة وتهيئتها لعمليات الزراعة اللاحقة. وتبرز أهمية معدات الحراثة في قدرتها على تفكيك التربة وخلط بقايا المحاصيل وتحسين التهوية والنفاذية، الأمر الذي ينعكس على كفاءة الإنبات والإنتاجية. ويُعتبر المحراث القرصي من أكثر هذه المعدات استخداماً، خاصة في الظروف الصعبة كالترب الثقيلة أو الجافة أو الغنية بالمخلفات النباتية، نظراً لقدرته العالية على الاختراق والعمل تحت ظروف تشغيلية متنوعة. يرتبط الأداء الميكانيكي للمحراث القرصي بعدد من العوامل التصميمية والتشغيلية، في مقدمتها زاوية القرص وزاوية الميل، حيث تتحكم هذه المتغيرات في آلية تفاعل القرص مع التربة، وشكل الشريحة الترابية الناتجة، وتوزع القوى المؤثرة عليه. ويؤدي هذا التفاعل إلى توليد إجهادات ميكانيكية داخل بنية القرص، قد تكون سبباً في حدوث فشل بنيوي عند سوء التصميم أو التشغيل. ومع التطور في تقنيات التحليل العددي، ولا سيما طريقة العناصر المحددة، أصبح من الممكن توصيف هذا السلوك بدقة عالية، بما يتيح تحسين التصميم وتقليل الأعطال.

مشكلة البحث (Research Problem)

على الرغم من التقدم الملحوظ في دراسة أداء المحاريث القرصية، فإن معظم الأبحاث ركّزت على الجوانب الحقلية وقوى السحب وكفاءة التشغيل، في حين لم يُعطَ التحليل البنيوي للإجهادات الناتجة عن تغير زاوية الميل الاهتمام الكافي ضمن إطار نمذجة عددية متعددة الحالات. كما أن العديد من الدراسات تناولت ظروف تشغيل محددة أو اعتمدت نماذج مبسطة لا تعكس التعقيد الفعلي لتفاعل التربة مع القرص. ينتج عن هذا القصور غياب فهم دقيق لكيفية توزّع الإجهادات داخل القرص عند تغير زاوية الميل، وما يترتب على ذلك من صعوبة في تحديد القيم المثلى لهذه الزاوية من منظور ميكانيكي، الأمر الذي يحدّ من إمكانية تحسين التصميم وتقليل مخاطر الفشل البنيوي.

هدف البحث (Research Objective)

يهدف هذا البحث إلى تحليل تأثير زاوية ميل القرص على توزيع الإجهادات المكافئة داخله أثناء عملية الحراثة، اعتماداً على النمذجة العددية باستخدام طريقة العناصر المحددة، بما يسمح بفهم العلاقة بين المتغيرات الهندسية والسلوك البنيوي، وتحديد الأنماط العامة لتغير الإجهادات تحت ظروف تشغيل مختلفة.

أهمية البحث (Significance of the Study)

تكمن أهمية هذا البحث في معالجته لفجوة علمية تتعلق بالربط بين زاوية الميل وتوزع الإجهادات، وهو جانب أساسي في تحسين موثوقية المحاريث القرصية. كما يساهم في تعزيز استخدام النمذجة العددية كأداة تحليلية متقدمة تقلل الاعتماد على التجارب الحقلية المكلفة وصعبة الضبط. وتظهر الأهمية التطبيقية في إمكانية الاستفادة من النتائج لتقليل تركّز الإجهادات، وتحسين تصميم القرص، وزيادة عمره التشغيلي، بما ينعكس إيجاباً على كفاءة التشغيل وتقليل التكاليف.

حدود البحث وفرضياته (Scope and Assumptions)

ينحصر هذا البحث في دراسة قرص مفرد ضمن محراث قرصي تحت تأثير شروط تحميل مكافئة لمقاومة التربة، مع تثبيت زاوية القرص والتركيز على تأثير زاوية الميل فقط. ويعتمد التحليل على نموذج عددي ثلاثي

الأبعاد يفترض تجانس المادة وخطيتها المرنة، كما يتم تمثيل تأثير التربة على شكل قوى موزعة مكافئة بدلاً من نمذجة التربة كوسط مستمر معقد.

تُفترض أيضاً ثبات الظروف التشغيلية الأخرى مثل سرعة الجر وخصائص التربة، بهدف عزل تأثير زاوية الميل وضمان تفسير واضح للنتائج، مع إدراك أن هذه الفرضيات قد تحدّ من التعميم الكامل للنتائج على جميع الظروف الحقلية.

الدراسات المرجعية (Literature Review)

تناولت الدراسات السابقة موضوع المحاريث القرصية من جوانب متعددة، حيث ركّزت الأعمال المبكرة على تحليل قوى التربة وآلية تفاعلها مع أدوات الحراثة، كما في نماذج (HETTIARATCHI & REECE, 1967)وأعمال (MCKYES, 1985) التي قدّمت توصيفاً ميكانيكياً لسلوك التربة تحت تأثير أدوات القطع. ومع تطور الأساليب العددية، استخدم (ABU-HAMDEH & REEDER, 2003) طريقة العناصر المحددة لمحاكاة التفاعل بين التربة والأداة، مما أتاح فهماً أدق لتوزع القوى.

في المقابل، قدّمت دراسات لاحقة نماذج رياضية لتقدير مقاومة التربة كما في (KOGUT et al., 2016)، وركّزت أعمال أخرى على تقييم الأداء الحقلي وتأثير المتغيرات التشغيلية كما في (MALASLI & ÇELIK, 2019)و(XU et al., 2023) ،كما تناولت بعض الدراسات تحسين مقاومة التآكل واختيار المواد، مثل (RANI et al., 2020) و(MUNTEANU et al., 2025). ورغم هذا التنوع، فإن معظم هذه الدراسات لم تتناول بشكل مباشر تحليل الإجهادات الناتجة عن تغير زاوية الميل ضمن إطار نمذجة عددية متعددة الحالات، وهو ما يشكّل الفجوة التي يعالجها هذا البحث.

منهجية البحث (Research Methodology)

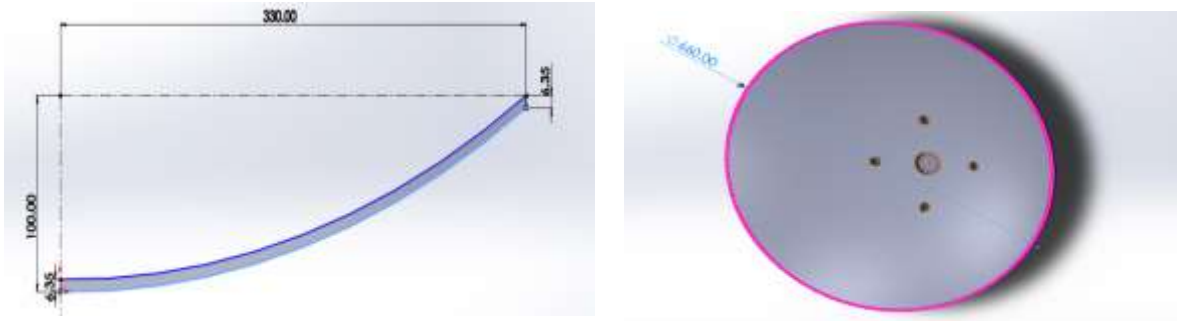
يعتمد البحث على منهج تحليلي قائم على النمذجة العددية باستخدام طريقة العناصر المنتهية، حيث يتم إنشاء نموذج ثلاثي الأبعاد لقرص المحراث وتمثيل خصائصه الميكانيكية بدقة، ثم تطبيق شروط تحميل تعكس مقاومة التربة أثناء الحراثة. يتم إجراء التحليل لعدة قيم من زاوية الميل، مع الحفاظ على ثبات بقية المتغيرات، بهدف دراسة تأثير هذا المتغير بشكل معزول. تُستخدم نتائج التحليل لاستخراج توزّع الإجهادات المكافئة وتحديد مناطق التركّز، ومن ثم تفسير العلاقة بين زاوية الميل والسلوك البنيوي للقرص، وصولاً إلى استنتاجات تدعم تحسين التصميم والتشغيل.

٢. الأدوات والطرائق (Methodology)

استند النموذج الهندسي إلى قياسات حقلية مباشرة مأخوذة من محراث قرصي ثلاثي الأبدان مستخدم فعلياً في منطقة الصفصافة (ريف طرطوس)، وهو ما يبرر اعتماد قطر قرص مقداره 660 mm وسماكة 635 mm وعمق تقعر 100 mm، باعتبارها تمثل حالة تطبيقية واقعية وليست نموذجاً معيارياً نظرياً، الشكل (١). وقد دُعِّمت هذه القيم بالرجوع إلى كتيّبات الشركات الصانعة مثل (Rhino Operator's Manual, 2014)، بما يحقق التوازن بين الدقة الحقلية والمرجعية العلمية. أما المسافات البينية بين الأقراص فقد اعتُمِدت بقيمة مقدارها 600 mm استناداً إلى (Shazly et al., 2008-El) نظراً لعدم دقتها في النماذج المتوفرة ميدانياً. الشكل (٢) يبين النموذج ثلاثي الأبعاد.



الشكل (١) – نموذج المحراث القرصي الموجود في منطقة الصفصافة والذي أخذت منه معظم القياسات



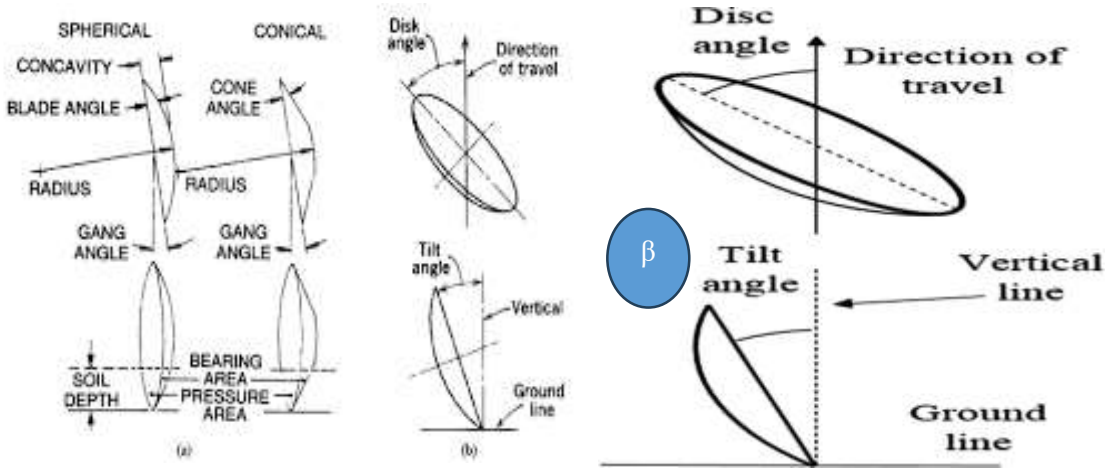
الشكل (٢) – النموذج ثلاثي الأبعاد للقرص

في توصيف السلوك الميكانيكي للمواد، مُثِّل القرص باستخدام نموذج مرن–لدن ثنائي الخطية (Bilinear Isotropic Hardening)، وهو نموذج شائع في تحليل البنى الهيكلية الفولاذية، حيث يسمح بتمثيل الانتقال من السلوك المرن إلى اللدن مع تصلّب متساوي الخواص، باستخدام قيم مرجعية لمعامل يونغ (E = 210 GPa) ونسبة بواسون ($\nu = 0.3$). أما التربة السلتية، فقد مُثِّلت باستخدام نموذج **Drucker–Prager اللدن غير الخطي**، وهو امتداد لمعيار **Mohr–Coulomb لكن بنموذج رياضي أكثر تبسيطاً وقابلية للنمذجة**، ويُستخدم على نطاق واسع في ميكانيكا التربة لتمثيل المواد الاحتكاكية المتماسكة تحت حالات إجهاد ثلاثية الأبعاد. يعتمد هذا النموذج على متغيرات أساسية هي التماسك (c) وزاوية الاحتكاك الداخلي(φ) ، ويتيح توصيف سلوك التربة بعد الوصول إلى حد الخضوع، أي في المجال اللدن، وهو ما يبرر وصفه بـ"غير الخطي" نتيجة العلاقة غير الخطية بين الإجهادات والتشوهات بعد الخضوع(Chen & Han, 1988; Abaqus Theory Guide) . الشكل (٣) يبين الزوايا الأساسي للقرص.

اقتصر توصيف التربة على الخصائص الأساسية (c و φ والكثافة) لكونها الأكثر تأثيراً في مقاومة القص وتفاعل التربة مع أدوات الحراثة ضمن نماذج (Hettiaratchi–Reece)، في حين لم تُدرج خصائص إضافية مثل الصلادة أو مقاومة الاختراق أو اللزوجة بشكل صريح، لأنها إمّا تُشتق ضمنياً من هذه المعاملات

في النماذج الكلاسيكية، أو تتطلب نماذج أكثر تعقيداً (viscoplastic أوrate–dependent) تتجاوز نطاق هذا البحث وهدفه التحليلي المقارن.

على الصعيد التحليلي، طُبِّق نموذج ميكانيكا التربة الزراعية (Hettiaratchi–Reece) ضمن بيئة MATLAB لحساب قوى التفاعل بين القرص والتربة، بما يشمل مركبات القوة العمودية وقوة السحب وتوزيع الضغوط، إضافة إلى تقدير التآكل باستخدام نموذج Archard، الذي يربط حجم التآكل بالقوة العمودية والمسافة المنزلقة وصلادة المادة. وقد أُجري التحليل لعدة زوايا ميل بهدف تحديد السلوك العام للنظام واستخلاص مؤشرات الأداء.



الشكل (٣) – الزوايا المختلفة للقرص

استُخدمت لاحقاً منهجية **باريتو متعددة الأهداف** لدمج مؤشرات الأداء (قوة السحب، الإجهاد الأقصى، والتآكل) ضمن إطار قرار موحد، حيث أتاح ذلك تحديد زاوية الميل المثلى التي تحقق توازناً بين الكفاءة التشغيلية والمتانة البنيوية، دون الانحياز لمعيار واحد على حساب الآخر. أُجري التحليل العددي باستخدام برنامج ANSYS Workbench 2024 R1 ضمن بيئة Static Structural، مع تفعيل **اللاخطية الهندسية (Large Deflection)**، والتي تعني أن مصفوفة الصلابة يتم تحديثها أثناء التحليل نتيجة تغير الشكل الهندسي، وهو أمر ضروري عند وجود إزاحات كبيرة نسبياً تؤثر على توزيع الإجهادات. كما تم تفعيل اللاخطية المادية (التي تعني أن تشوه التربة والقرص أثناء العمل لا يخضع فقط لقانون هوك وليس تابعاً لعلاقة طردية أو خطية) لتمثيل السلوك اللدن لكل من القرص والتربة.

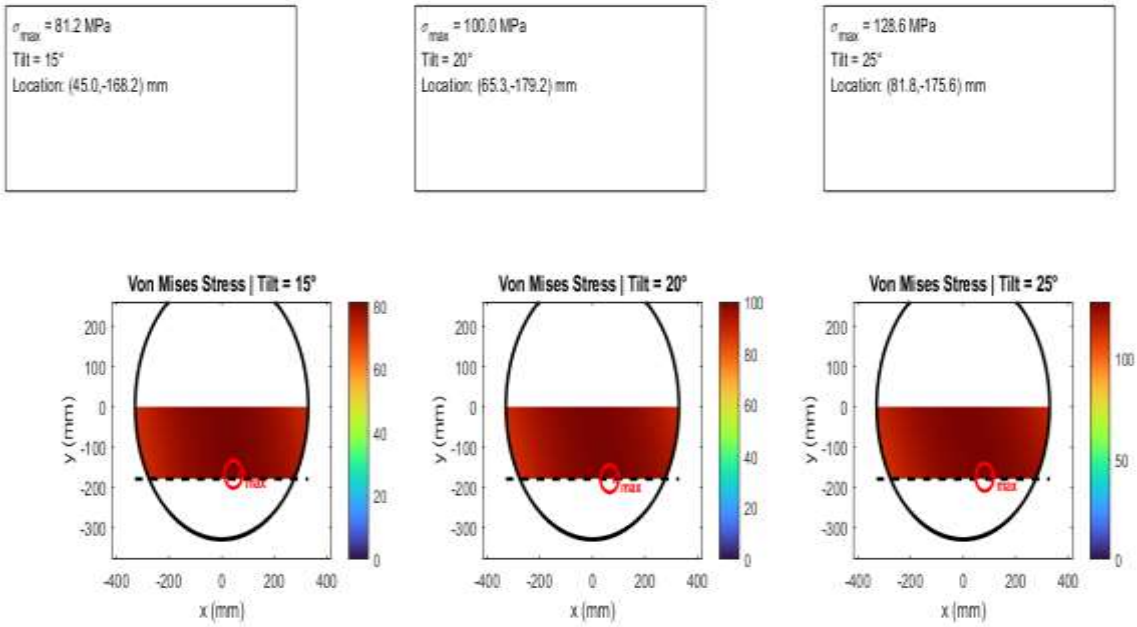
عُرّفت شروط الحدود بحيث تعكس الحالة التشغيلية، حيث ثُبّت محور القرص (منطقة التثبيت) لمنع درجات الحرية الغير مرغوب بها مع المحافظة على دوران القرص، في حين طُبّق حمل مكافئ يمثل مقاومة التربة. وتم تعريف التلامس بين القرص والتربة باستخدام نموذج **Frictional Contact** بصيغة **Augmented Lagrange**، والتي توفر توازناً عددياً بين دقة تمثيل الاحتكاك واستقرار الحل، مع اعتماد معامل احتكاك .($\mu = 0.416$) ويُقصد بالإجهادات البنيوية هنا الإجهادات الداخلية المتولدة داخل مادة القرص نتيجة الأحمال الخارجية، والتي تم توصيفها باستخدام معيار **Von Mises** لكونه مناسباً للمواد المطيلية. أخيراً، جرى تحليل النتائج من خلال مقارنة مخرجات النموذج التحليلي (MATLAB) والنموذج العددي(ANSYS) ، وتفسير الفروقات على أساس فيزيائي وميكانيكي، مع الأخذ بعين الاعتبار الفرضيات المعتمدة مثل تجانس التربة،

وإهمال التأثيرات الديناميكية، وعدم نمذجة بعض المكونات الثانوية كالمقشطة، وهي عوامل تم تحديدها كمصادر محتملة للخطأ وحدود لتعميم النتائج.

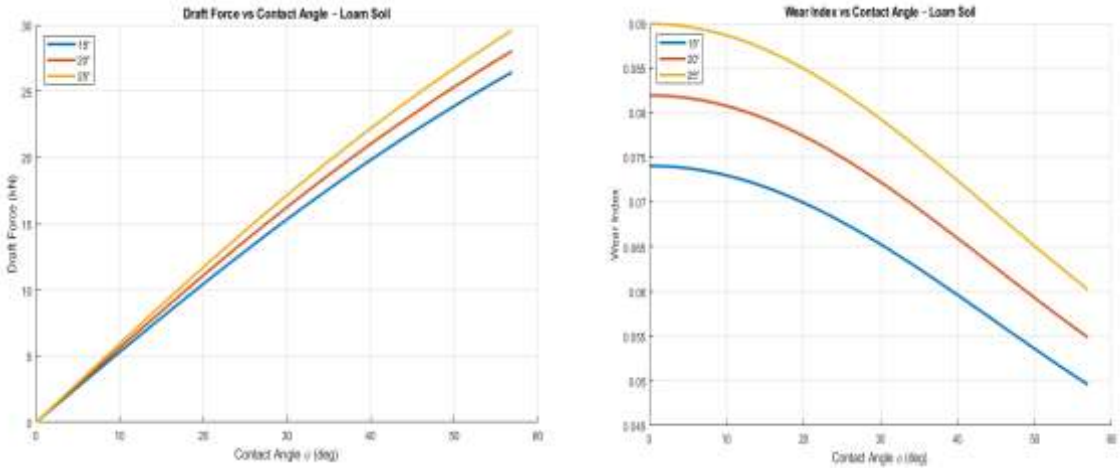
٣. النتائج(Results)

(أ) النتائج التحليلية ومحاكاةMATLAB

أظهرت النماذج التحليلية ومحاكاة MATLAB أن زاوية الميل (β) تؤثر بشكل غير خطي على أداء المحراث القرصي في التربة السلتية. فعند زيادة β من ١٥° إلى ٢٥°، ارتفعت قوة السحب من 26.43 kNإلى 29.59 kN، أي بنسبة +١١,٩%، بينما زاد الإجهاد الأقصى σ_{max} *بمقدار* 58.4%+ *من* 81.2 MPa إلى 128.6 MPa، وارتفع مؤشر التآكل من ٠,٠٧٤ إلى ٠,٠٩٠ (+٢١,٦%). وتمركز الإجهاد الأقصى دوماً في الربع الأمامي السفلي للقرص، مع انتقال موقعه من (X = 45.04 mm, Y = −168.22 mm) عند β = 15° إلى (X = 81.81 mm, Y = −175.57 mm) عند β = 25° ، مما يدل على تقدّم نقطة التحميل نحو الحافة الأمامية مع زيادة الزاوية. جميع النتائج مبينة في الأشكال (٤) و (٥) و (٦).



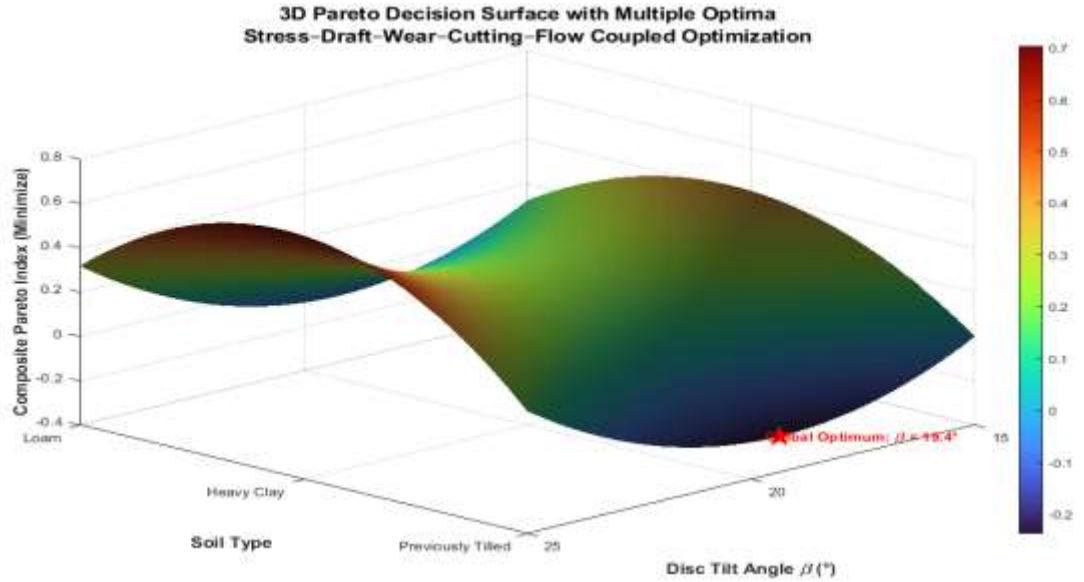
الشكل (٤) – **نتائج التربة السلتية – تركيز الإجهادات عند زوايا الميل المختلفة**



الشكل (٥): تأثير زاوية ميل القرص على قوة السحب المحسوبة بدلالة زاوية الاتصال في التربة السلتية.

اعتمد تحديد زاوية الميل المثلى على تحليل نتائج MATLAB لثلاثة أنواع تربة (سلتية، طينية ثقيلة، ومحروثة سابقاً) ضمن المجال ١٥°–٢٥°، باستخدام مؤشر باريتو متعدد الأهداف الذي يدمج الإجهاد الأقصى وقوة السحب ومؤشر التآكل بعد تطبيعها. أظهر التحليل أن القيمة الدنيا المطلقة تتحقق عند ١٥° في التربة المحروثة، إلا أن هذا الحل غير قابل للتعميم ميدانياً. إذ إن الظروف المحلية المقصودة تتمثل في تربة منطقة الصفصافة (ريف طرطوس)، والتي تتسم بعدم التجانس وبتناوب التربة السلتية مع الطينية الثقيلة ضمن نفس الحقل، إضافة إلى ثبات زاوية التشغيل عملياً وعدم تعديلها مع تغير التربة. بناءً على ذلك، اعتُمدت زاوية ٢٠° في التربة السلتية كحالة مرجعية، لأنها تمثل الحالة الوسطية الأكثر شيوعاً وتحقق توازناً بين الكفاءة التشغيلية والمتانة البنيوية، كما تولّد مستويات إجهاد كافية للتحليل العددي دون

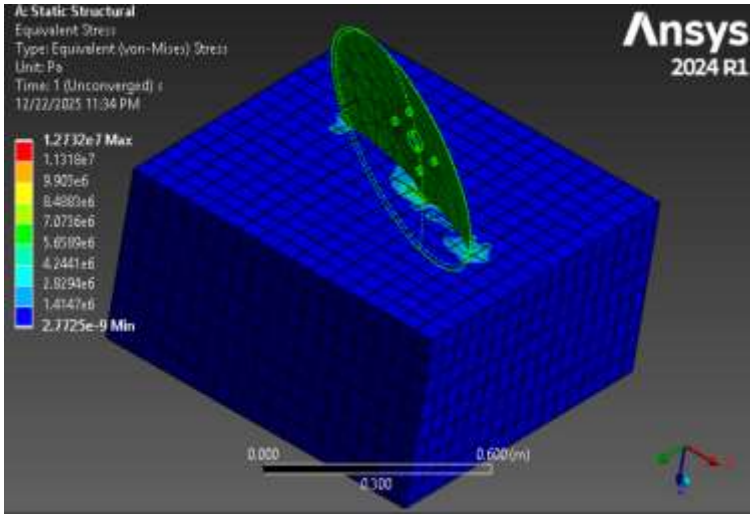
الوقوع في الحالات الحدية. وعليه، تم اختيار هذه الزاوية لإجراء تحليل ANSYS باعتبارها الأكثر واقعية وقابلية للتعميم ضمن شروط الدراسة.



الشكل (٦) – التمثيل ثلاثي الأبعاد لمنحني باريتو الممثل لدالة القرار المركبة التي تبين أن الزاوية الأمثل للتحليل هي مكان النجمة أي تقريباً الزاوية ٢٠ درجة

(ب) نتائج تحليل العناصر المحدودة(ANSYS)

بناءً على نتائج باريتو، أجري تحليل ANSYS ثلاثي الأبعاد عند الزاوية المرجعية $\beta = 20°$. وأظهرت الخرائط العددية لتوزيع إجهاد Von Mises تركيزاً إجهادياً حاداً في الربع الأمامي السفلي للقرص، عند الموقع (X = 65.3 mm, Y = −179.3 mm)، وهو ما يتطابق مكانياً مع نتائج MATLAB. وبلغ الإجهاد الأقصى **379.33 MPa**، وهي قيمة أعلى بكثير من تلك التي أنتجها(100.0 MPa) MATLAB ، ويعزى هذا الفرق إلى قدرة التحليل العنصري على التقاط التركيز المحلي الدقيق للإجهادات في منطقة صغيرة جداً (Element Size = 5 mm)، مع تفعيل اللاخطية الهندسية (Large Deflection). ورغم ارتفاع القيمة العددية، فإنها تبقى ضمن الحدود الآمنة ($\frac{\sigma_{max}}{\sigma_y} = 31.6\% < 85\%$) كما سجّل التحليل تشوهًا كليًا بلغ **161.67 mm**، وهو ناتج عن الإزاحة المكافئة المطبقة (150 mmانغماس عند$\beta = 20°$). وتم تحقيق حالة تقارب (Converged Solution) بعد وقت ٠,٨٨٤ ثانية، مما يدل على استقرار الحل العددي. وتشير هذه النتائج إلى أن ANSYS يوفر تمثيلاً واقعياً للسلوك الموضعي للقرص، خاصةً في مناطق التركيز الإجهادي والتآكل، وهو ما لا يمكن تحقيقه في النماذج ثنائية الأبعاد أو التحليلية. الشكل (٨) يبين تحليل الإجهادات في برنامج ANSYS.



الشكل (٨)– توزيع الإجهاد المكافئ (Von Mises Stress) على القرص والتربة

Tabular Data

	Time [s]	Minimum [MPa]	Maximum [MPa]	Av
1	0.2	2.4105e-015	379.33	11.956
2	0.275	2.4125e-015	379.63	11.967
3	0.35	2.4126e-015	379.4	11.959
4	0.4625	2.4106e-015	379.3	11.955
5	0.63125	2.4111e-015	379.22	11.952
6	0.88438	2.4095e-015	379.23	11.953

الشكل (٩) – صورة لجدول البيانات الزمنية لإجهاد Von Mises، يوضح استقرار القيمة القصوى عند ٣٧٩,٣٣ MPa بعد ٠,٨٨٤ ثانية.

٤. المناقشة(Discussion)

تُظهر النتائج أن اعتماد الزاوية ٢٠° لا يمثل تعميماً على جميع ظروف التشغيل، بل هو اختيار مرجعي مدروس ناتج عن تحليل متعدد المعايير. فقد استند القرار إلى تحليل باريتو الذي يوازن بين ثلاثة مؤشرات رئيسية: الإجهاد، قوة السحب، ومعدل التآكل، حيث تم تحديد ما يُعرف بمنطقة "الاستقرار الباريتوي"، وهي المجال الذي لا يمكن فيه تحسين أحد المؤشرات دون التأثير سلباً على الآخر. وفي هذا السياق، لم تكن زاوية ٢٠° هي الأفضل مطلقاً لكل مؤشر، لكنها حققت أفضل توازن إجمالي، ما يبرر اعتمادها كحالة تحليلية مرجعية. أما فيما يتعلق بالظروف التشغيلية، فإن الدراسة تستند إلى واقع الاستخدام الزراعي في منطقة الصفصافة (ريف طرطوس)، حيث يُستخدم المحراث القرصي غالباً لأغراض **قلب التربة في زراعة البطاطا**، ضمن تربة غير متجانسة تتراوح بين السلتية والطينية، مع وجود بقايا نباتية محدودة، وعمق حراثة متوسط. وعليه، فإن اختيار التربة السلتية في النمذجة لا يعني حصر التربة بها، بل يمثل **حالة وسطية معيارية** تسمح بضبط النموذج العددي وتحقيق تمثيل واقعي قابل للمقارنة. بالنسبة للاقتصار على زاوية ٢٠°، فمن المهم التمييز بين **الزاوية المثلى ميدانياً** و**الزاوية المرجعية للتحليل** .إذ تشير الدراسات إلى أن الزوايا الأكبر (مثل ٢٥°) تكون أكثر ملاءمة في التربة الطينية الثقيلة لتحسين عملية القلب، إلا أن هذه الزوايا تقترن بزيادة ملحوظة في الإجهاد وقوة السحب. لذلك، فإن اعتماد ٢٠° في هذه الدراسة لا يعني أنها الأفضل لجميع التربة، بل أنها **الأنسب كنقطة توازن لتحليل سلوك الإجهاد والتآكل ضمن إطار مقارن.** كما أن الفارق بين نتائج MATLAB و ANSYS لا يعكس تناقضاً، بل اختلافاً

منهجياً في مستوى التمثيل؛ حيث يقدم النموذج التحليلي تقديراً عاماً، بينما يكشف التحليل العددي ثلاثي الأبعاد عن القيم الموضعية الحرجة، وهو أمر ضروري في تقييم المتانة البنيوية. وبذلك، فإن الدراسة لا تهدف إلى فرض زاوية تشغيل واحدة، بل إلى تقديم إطار تحليلي يمكن من خلاله فهم تأثير زاوية الميل على الأداء الميكانيكي، مع إمكانية تعميم المنهجية على زوايا وترب مختلفة ضمن دراسات لاحقة.

٥. الخلاصة (Conclusions)

أظهرت الدراسة، عبر التحليل المقارن بين النموذج التحليلي، ومحاكاة MATLAB، والتحليل العددي ثلاثي الأبعاد باستخدام ANSYS، أن زاوية الميل $\beta = 20°$ تمثل **الحل المرجعي الأمثل** لمحراث قرصي مقعّر بقطر $\Phi = 660$ mm يعمل في التربة السلتية الأكثر شيوعاً في الساحل السوري. وتتلخص النتائج الأساسية كما يلي:

١. **التوازن الميكانيكي والتشغيلي :**

- قوة سحب معتدلة بلغت 28.04 Kn عند $\beta = 20°$ ، مع أدنى استهلاك طاقي نوعي (Specific Draft ≈ 3.9 kN/m²).
- إجهاد فون ميسيز مقبول عند 100 MPa وفق MATLAB ، مع قمم موضعية بلغت 379.33 MPa فيANSYS ، دون تجاوز حد الأمان (σ_yمن$\approx$ 85%) .
- معدل تآكل ضمن الحدود الاقتصادية .($W \approx 0.082$)

٢. **أثر تغيير زاوية الميل :**

- زيادة الزاوية إلى ٢٥° أدت إلى ارتفاع قوة السحب بنسبة ١١,٩%، وارتفاع الإجهاد الأقصى بنسبة ٢٨,٦%، دون تحقيق مكاسب تشغيلية تبرر هذا الارتفاع، ما يجعل الزوايا الأكبر أقل كفاءة هندسياً واقتصادياً .
- تقليل الزاوية إلى ١٥° يقلل الإجهاد وقوة السحب، لكنه لا يعكس الظروف العملية لتقليب التربة في زراعة البطاطا بالمنطقة، ولا يحقق توازن المؤشرات الثلاثة .

٣. **تحليل متعدد المعايير :(Pareto Analysis)**

- أظهر منحنى باريتو أن زاوية ٢٠° تقع في "وادي الاستقرار"، أي تحقق أفضل توازن بين مؤشرات الأداء الثلاثة: قوة السحب، الإجهاد، والتآكل .
- النموذج MATLAB يوفر دقة كافية للمرحلة الأولية من التصميم والتحليل متعدد الأهداف، بينماANSYS يتيح التحقق النهائي لتحديد التركيزات المحلية للإجهاد وأماكن التآكل .

٤. **موضع تركيز الإجهاد :**

- القمة الإجهادية ثابتة عند الإحداثياتmm $X \approx 65.3$ ، $Y \approx -179.3$ mm، أي ضمن الربع السفلي الأمامي للقرص (~٣٩,٦% من نصف القطر)، وهو ما يتوافق مع ميكانيزم تكوّن الشريحة الترابية.

التوصيات (Recommendations)

١. **اعتماد زاوية ميل ٢٠ °**كمعيار تصميمي للأقراص المقعرةmm 660 = Φ ، وعمق تقعر ١٠٠ mm عند العمل في الترب السلتية، لتحقيق أفضل توازن بين الكفاءة الطاقية، السلامة الميكانيكية، وطول العمر التشغيلي .

٢. **تعزيز الحافة الأمامية السفلية للقرص**، خصوصاً الثلث السفلي (~٣٩–٤٠% من نصف القطر)، باستخدام مواد مقاومة للتآكل (مثل Hardfacing بسبائك الكروم–الموليبدينوم) نظراً لتركيز معظم الإجهادات وآليات التآكل في هذه المنطقة .

٣. **الاستعانة بنموذج MATLAB** في مراحل التصميم الأولي وتحليل باريتو متعدد الأهداف لما يتميز به من سرعة ودقة مقبولة، مع استخدام ANSYS للتحقق النهائي ودراسة التركيزات المحلية للإجهاد وسلوك التعب .

٤. **تطبيق معامل تصحيح تجريبي ($CF \approx 0.85 \pm 0.05$)** على نتائج MATLAB عند ربطها بعمر الخدمة، لتعويض تبسيطات النموذج ثنائي الأبعاد مقابل التحليل ثلاثي الأبعاد .

٥. **إجراء اختبارات ميدانية مستقبلية** على قرص نموذجي عند زاويتي ميل ٢٠° و٢٥°، لقياس قوة السحب الفعلية ومعدلات التآكل بعد فترات تشغيل ≥٥٠ ساعة، بهدف معايرة معاملات الاحتكاك وتحسين موثوقية النماذج العددية

٧. المراجع العلمية (References)

1. ABU-HAMDEH, N.H., REEDER, R.C. 2003, A nonlinear 3D finite element analysis of the soil forces acting on a disk plough. *Soil and Tillage Research*, 74(2), 115–124.
2. XU, G., et al. 2023, Performance evaluation of vertical discs. *Agronomy*, 13(5), 1336.
3. MALASLI, M.Z., ÇELIK, A. 2019, Disc and tilt angle effects on forces acting on a single-disc. *Soil and Tillage Research*, 194, 104304.
4. RANI, A., et al. 2020, Analysis of wear characterization on agricultural discs. *IJCMAS*, 9(6), 2937–2941.
5. SRIVASTAVA, R., et al. 2006, Effect of ploughing depth and disk angle on soil cutting resistance and energy requirements. *Journal of Terramechanics*, 43(3), 183–193.
6. ZAIED, A. 2014, Optimal disc angles for energy efficient tillage. *Soil and Tillage Research*, 137, 49–57.
7. AHAMDI, I. 2016, Draft force prediction of disk plow. *Soil and Tillage Research*, 163, 32–40.
8. KOGUT, Z., SERGIEL, L., ŻUREK, G. 2016, Effect of disc setup angles on working resistance. *Biosystems Engineering*, 151, 328–337.
9. ALAM, M. 1989, Soil reaction forces on agricultural disc implements. PhD Thesis, University of Newcastle upon Tyne.
10. CHI, L., KUSHWAHA, R.L. 1990, A non-linear finite element analysis of soil failure with tillage tools. *Journal of Terramechanics*, 27(4), 343–366.
11. CHI, L., KUSHWAHA, R.L. 1991, Three-dimensional finite element interaction between soil and tillage tool. *Transactions of the ASAE*, 34(2), 361–366.

12. HARRISON, H.P. 1977, Soil reacting forces for discs from field measurements. *Transactions of the ASAE*, 20(5), 836–838.

13. HETTIARATCHI, D.R.P., REECE, A.R. 1967, Symmetrical three-dimensional soil failure. *Journal of Terramechanics*, 4(3), 45–67.

14. MC KYES, E. 1985, *Soil Cutting and Tillage*. Elsevier.

15. PAYNE, P.C.J. 1956, Mechanical properties of soil and tool performance. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1(1), 23–50.