Mathematical models for predicating draft forces of tillage tools: A Review

النماذج الرياضية لتوقع قوى الشد لأسلحة الحرث: دراسة مرجعية

عبد الله مسعد زين الدين [1] ، رشا محمد يوسف طه [1] ، رضا جلال عبد الحميد [1]

[1] قسم الهندسة الزراعية والنظم الحيوية – كلية الزراعة الشاطبي – جامعة الإسكندرية – جمهورية مصر العربية.

DOI: 10.21608/jalexu.2021.170698

Article Information

Received:January21th2021

Revised: January30th2021

Accepted:February11th2021

Published: May 11th 2021

ENGLISH SUMMARY: tillage play an important aspect in the evolution of agriculture. Also, it has a direct influence on soil productivity and sustainability. The function of the tillage includes seedbed preparation, water and soil conservation and weed control. A large amount of energy is consumed during tillage operations. Furthermore, the draft force results in frictional and wear losses of the tillage equipment. Since the cost of energy is high and there are significant energy losses due to the friction and wear, the development of highly efficient tillage tools that require less energy while providing a satisfactory soil environment for seed emergence is of paramount importance . There is a lack of knowledge in soil conditions required for crop, soil dynamics to apply energy to the soil, to change its state from the original to the desired state and development of control algorithms and tillage transducers. With increased use of computers, it is possible to model the entire machine- soil – plant system in order to make the analysis of tillage a more deterministic rather than the present stochastic process. To achieve this goal, the system must be divided into soil – machine sub-model and soil-plant sub model. Draft force prediction, clod sizes distribution and negative effect of erosion have been some of the motivation topics for studying and modeling soil-tillage interaction. Data from field process and lab experiments are combined on mathematical models; supporting by the increment on informatics resources more accurate, fasters and extended prognostics are performed (Bravo et al., 2012). These models can be classified as:

1-Experimental models.

2 -Analytical models.

3 -Numerical model (Finite Element Models).

On the other hand, Dimensional Analysis Models, and statistical models were also included.in order to recommend one model on the other, it was decided to compare their results with some experimental tests. Some of the models were succeeded to predict the draft in a range of 40-60%, And they fail in some other conditions. Wherever the FEM give prediction up to 80-90 % accurate .

Any development in that direction will be rewarded, where it represents the real situation during loading, Where the close relation between soil and tool is thoroughly considered.

Keywords: Mathematical models, draft forces, tillage tools.

.

تهدف عملية حرث التربة إلى تجهيز مهد مناسب لنمو البذور. ولما كانت الزراعة المصرية زراعة مكثفة حيث تزرع الأرض عدة مرات فى العام وفى كل مرة تحتاج إلى عملية حرث مناسبة لنوع المحصول المنزرع، لذلك فإن عمليات الحرث تستهلك قدر كبير من الطاقة بالإضافة إلى سرعة تآكل الأسلحة. ومن الجدير بالذكر أن وزن التربة المراد حرثها فى الفدان الواحد لعمق 30 سم لا يقل عن 3000 طن/عام (على الأقل مرتين كل عام). هذه الحقيقة ألقت بعض الضوء حول أهمية تطوير آلات الحراثة للوصول إلى أسلحة حرث تستهلك قدر أقل من الطاقة توفر المهد المناسب للبذرة.

ناقش إمكانية الوصول (Schafer et al., 1984) إلى آلة حراثة أوتوماتيكية مزودة بأجهزة تحكم تعمل مع حاسب آلى والتى يمكن برمجتها للوصول إلى المهد المناسب للبذرة بأقل طاقة ممكنة. وقد حدد أن المشكلة الرئيسية فى وجود هذه الآلة هو نقص المعلومات التى تربط منظومة (النبات – الأرض – الآلة). ولهذا فإنه يجب تقسيم المشكلة إلى دراسة منظومة النبات – الأرض فى شق ونظم الأرض – الآلة فى شق آخر وذلك للتوصل إلى تفهم أعمق للمنظومة العامة.

تقييم التفاعل بين السلاح – التربة:

Journal Article © 2021 by (JAAR) is licensed under CC BY-NC 4.0

تقييم التفاعل بين السلاح – التربة مبنى أساساً على هدفين أساسيين هما:

1. الحاجة إلى استخدام أسلحة الحرث بكفاءة عالية.
2. الحاجة إلى توفير مهد جيد للبذرة والوصول بالتربة إلى الحالة التى يتطلبها المحصول.

وعادة يتم تقييم أداء آلات الحرث باستخدام قوة الشد، القوى الرأسية والجانبية بالإضافة إلى شكل الأخدود الناتج من عملية الحرث. شكل انهيار التربة يحدد بمسافة الانهيار – وزاوية الانهيار

عمق القطع وحجم الانهيار وعمق القطع وحجم الانهيار الجانبى ومساحة مقطع الحرث الأمامية وكذلك حجم التربة المنهارة ومقدار الانتفاخ الحادث على السطح. باستخدام هذه المعلومات يمكن وصف كفاءة المحراث فى صورة قوة الشد النوعية أو مقدار الطاقة المستهلكة لوحدة الحجوم من التربة المحروثة. ولما كان التقييم من خلال التجارب الحقلية أو المعملية يحتاج إلى وقت وجهد كبير بالإضافة إلى التكلفة العالية. علاوة على أن التجارب تكون محددة لنوع معين من التربة وظروف خاصة لزم الأمر تكرارها عند تقييم نفس السلاح تحت ظروف أخرى وكذلك عند تغيير أى من خصائص السلاح. وهذا بالطبع يعيق من عملية تطوير التصميمات الهندسية للأسلحة. ولذلك ظهرت الحاجة إلى عمل نماذج رياضية لوصف سلوك الأسلحة عند التفاعل مع التربة. هذه النماذج الرياضية يمكن تقسيمها إلى ثلاث أنواع رئيسية هى:

1- النماذج التجريبية.
2- النماذج التحليلية الرياضية.
3- النماذج العددية (ذات العناصر الدقيقة).

أولاً: النماذج التجريبية

وهى النماذج التى تنتج من تحليل نتائج التجارب العملية سواء فى المعمل أو فى الحقل وهى تنقسم إلى نوعين أساسيين، نماذج التحليل البعدى والنوع الثانى هو النماذج الإحصائية التى تنتج من تحليل الارتداد لتأثير عامل أو أكثر من العوامل المؤثرة على قوة الشد. وتتميز النماذج التجريبية بسهولة ولكنها تعتبر مكلفة لأنها تحتاج إلى قدر كبير من التجارب كما أنها محددة فى حيز التطبيق لأنها مرتبطة بحدود التجارب فقط ولا يمكنها الوصول إلى وصف عام لنظام السلاح – التربة (Drwish, 2020).

أ- نماذج التحليل البعدى

حدد (Young, 1968) أنه يمكن استخدام التحليل البعدى فى دراسة التفاعل بين أسلحة الحرث والتربة كما أنه اقتراح استخدام Distorted model كبديل لـ Scale models لصعوبة استخدامه فى وصف خصائص التربة الطبيعية والميكانيكية. ولكنه أيضاً أكد عدم دقة هذه النماذج فى توقع شدة الشد.

هذا وقد بدأ (Osman, 1964) فى تقديم معادلات تحليل بعدى على اعتبار أن تكون أسلحة الحرث مسطحة وتميل بزاوية قدرها α وأدخل للمعادلة خصائص هامة للتربة. وتلى هذه المحاولة محاولات أخرى جادة لكل من (Reaves et al., 1968)، (Krastin, 1973) وآخرون كثيرون. كل محاولة أدخلت عوامل جديدة وحاولت تطويعها إلى أنواع مختلفة من المحاريث. إلا انه لا زالت هذه النماذج مرتبطة بظروف إجراء التجارب التى تستنتج منها ثوابت المعادلات وهذا يفسر أنه عندما قام هؤلاء الباحثون فى تحقيق فاعلية نماذجهم كانت دقة التوقع عالية ومقبولة ولكن عندما استخدمها البعض الآخر أظهرت عدم دقتها فى معظم الظروف.

ب- النماذج الإحصائية

بدأ بعض الباحثين فى استخدام معادلات الارتداد الخطية والغير خطية فى وصف النتائج العملية كمحاولة للوصول إلى وصف عام رياضى لتأثير بعض العوامل الهامة مثل عمق الحرث وعرض السلاح والسرعة المستخدمة ودرجة تماسك التربة وغيرها على قوة الشد المطلوبة لآلات الحراثة. ولذلك قدمت الجمعية الأمريكية للهندسة الزراعية معادلات يمكن استخدامها كتقدير مبدئى لقوة الشد إلا أن هذه المعادلات كانت تختلف طبقاً لنوع التربة والمحتوى الرطوبى لها. كما كانت هناك محاولات جادة أخرى مثل محاولات كلا من :

(Bowers, 1985)،(Upadhyaya, 1984)، (Nicholson et al., 1984)، (Yasin et al., 1991), (Oni et al., 1992),(Grisso et al., 1996).

ومن الجدير بالذكر أن كل هذه النماذج لم تدخل فى الاعتبار شكل انهيار التربة وحجم التربة المنهارة وتأثير نسبة العمق/العرض .(Aspect ratio) وكذلك فإنها ركزت على بعض العوامل وأهملت البعض الآخر. كما أنها تشترك مع النماذج التحليلية للأبعاد فى أنها مرتبطة فقط بنطاق التجارب المأخوذة منها وهذا يعطيها صفة الخصوصية ويبعدها عن كونها معادلات عامة للاستخدام.

ثانياً: النماذج التحليلية الرياضية:

وهذه النماذج تعتمد على وصف شكل انهيار التربة وتحديد حجم التربة المنهارة والقوى المؤثرة على السلاح من احتكاك داخلى وخارجى وكذلك تأثير وزن التربة. وقد اعتمد الباحثون فى هذا المجال على تصوير شكل انهيار التربة الحقيقى بآلات تصوير سريعة جداً عند تشغيل آلات الحرث فى صناديق التربة الزجاجية وكذلك الاستعانة بوسائل أخرى لتحديد مسارات القص فى التربة. وقد ظهر من هذه النماذج ما هو ثنائى الاتجاه وما هو ثلاثى الاتجاه. وتتميز أيضاً بأنها توفر معلومات هامة عن القوى الرأسية والقوى الجانبية التي تتعرض لها الأسلحة. وقد استخدم الباحثون نظريات هندسية عديدة فى الوصول إلى معادلات عامة ويمكن تلخيصها فى ثلاث طرق رئيسية هامة هى:

1- Trial wedge method
2- Stress characteristic method
3- Critical state soil mechanics models

1- Trial wedge method

وتعتمد هذه الطريقة على Rankines theory التى تستخدم passive earth pressure approach المستخدمة فى الهندسة المدنية فى تحليل القوى فى الحوائط الساندة (Terzaghi, 1943)وقد استخدمت هذه الطريقة فى تحليل نظام السلاح – التربة حيث مثل السلاح بالحوائط الساندة. وتعتمد على فرض شكل انهيار التربة حيث يحدد خط انهيار التربة يفصل التربة المنهارة عن الثابتة ويحدد Failure boundary.وبالتالى تصبح التربة المنهارة فى حالة اتزان بلاستيكى. وبتحديد القوة المؤثرة والتى اختلفت هذه النماذج فى فرضها وعمل اتزان لهذه القوى مع استخدام أى طريقة رياضية لـ.To minimize forces

ومن الجدير بالذكر أن هناك العديد من النماذج التحليلية قد ظهرت حتى الآونة الأخيرة إلا أنها تختلف فيما بينها حسب فرض شكل الانهيار فمنها من يفرض rupture line على أنه خط مستقيم لسهولة الحل ومنها من يفرض على شكل دالة لوغاريتمية أو مزيج من الإفتراضين أو افتراضات أخرى. إلا أنه فى الحقيقة أن شكل الانهيار يعتمد على نوع التربة وحالتها ويعتمد أيضاً على خصائص السلاح من زاوية قطع ومن نسبة العمق إلى العرض. وأن فرض شكل ثابت لا يمكن الوصول إلى معادلة عامة تصلح لكافة الأغراض. وهذا يفسر

السبب فى عدم دقة هذه النماذج فى معظم الدراسات التى هدفت لتحقيق فاعليتها (Onwualu & Watts, 1998) وغيرهم.

وقد تضمنت هذه الدراسة المرجعية دراسة لأهم النماذج التحليلية التى ظهرت حتى عام 2001. مبيناً أهم الفروض لكل منها ومميزات وقصور كل منها. وهذه النماذج هى:

(Godwin & Spoor, 1977; Hettiaratchi & Reece, 1967; E McKyes & Ali, 1977; O'callaghan & Farrelly, 1964; Payne, 1956; Perumpral et al., 1983; Swick & Perumpral, 1988; Zein El-Din & Sayedahmed, 2000)

2- Stress characteristic model

معظم نماذج Wedge approach تعتمد على محاولات حسابية To minimize the tools forces ولذلك فإن محاولة الوصول إلى شكل انهيار التربة الحقيقي بدون محاولة تبسيطه إلى شكل معروف يجعل الحل مستحيلاً. ولكن هذه الطريقة تغلبت على هذه الصعوبة. فإنها تحسب الإجهادات عند كل نقطة فى التربة. وقد اعتمدت هذه الطريقة أساساً على Mohr-Coulomb failure.ومع أنها تفرض شكل انهيار التربة أيضاً إلا أنها لا تعامل كتلة التربة المنهارة كأنها وحدة واحدة إنما تفصلها بخطوط انزلاق كانهيار قص داخلى. وتعتمد هذه الطريقة على استنتاج معادلات تفاضلية جزئية لتعطى التغير فى الإجهادات الناتجة فى التربة كدالة فى المحاور الرئيسية وخصائص التربة الطبيعية (Graham, 1968; Edward McKyes, 1985)وآخرون. وعادة ما تستخدم أحد الطرق العددية لحل هذه المعادلات.

إلا أن بعض الباحثين استخدموا بعض التسهيلات الفرضية مثل فرض أن خطوط الانزلاق خطوط مستقيمة وذلك لتسهيل الحل (Reece & Hettiaratchi, 1989) مما أضعف دقة توقعها. كما أن اعتمادها على نظرية Mohr حال دون تطويرها إلى ثلاثية الاتجاه.

3- Critical state soil mechanics models

بالنظر إلى جميع الطرق السابق مناقشتها نجد أنها تفرض أن كتلة التربة تحت اتزان بلاستيكى وأنه لا يوجد تشكل (deformation)قبل الانهيار. إلا أن هذه الطريقة تعتمد على إيجاد علاقات بين الإجهادات التى تتعرض لها التربة أثناء التحميل والتغير الحجمى للتربة والتغير فى الفراغات البيئية لها (Kawamura, 1985).

ومن الجدير بالذكر أن هذه الطريقة رغم أنها ثلاثية الاتجاه فى طبيعتها إلا أنها لم تحظى بقدر كبير من الاستخدام فى هذا المجال. فى حين يمكن استخدامها فى توقع التغيرات فى نسبة مسام التربة أثناء التحميل بكفاءة عالية.

ثالثاً: النماذج العددية (النماذج ذات العناصر الدقيقة):

بدأ استخدام طريقة العناصر المحدودة فى تطبيقات الهندسة المدنية وهندسة الطيران من أوائل الخمسينات. ولكن بدأ استخدامها فى مجال الهندسة الزراعية فى معالجة مشاكل اندماج التربة من بداية السبعينات وحتى الآن. وفى الحقيقة، هذه الطريقة تغلبت على الصعوبات التى واجهت الطرق التجريبية والطرق التحليلية فهى:

1- لا تعتمد على فرض شكل انهيار محدد وثابت للتربة مع كل الظروف. كالطرق الأخرى، بل يمكن بواسطتها تحديد شكل الانهيار لكل نوع من التربة ولكل ظرف من ظروف التحميل.

2- يمكن بواسطتها وضع شكل الحدود الحقيقية فى الاعتبار دون تبسيطها. فهى قادرة على معالجة الظروف المحيطة المعقدة.

3- تأخذ فى الإعتبار كل التغيرات التى تحدث فى التربة قبل الانهيار مما يجعلها قادرة على توقع القوى الحقيقية.

4- يمكن بواسطتها إيجاد إجهادات التربة المختلفة فى ثلاث اتجاهات.

5- توفر هذه الطريقة توزيع الإجهادات على السلاح وتعطى القوى المؤثرة على السلاح (قوة شد – قوة رأسية – قوة جانبية).

وتعتمد هذه الطريقة على تقسيم نظام السلاح – التربة إلى ثلاث أقسام رئيسية هى .interface – tool – soil وكل جزء من هذه الأجزاء يتم تقسيمه إلى عناصر متناهية فى الصغر وترتبط هذه العناصر بنقاط ربط تسمى .nodes ويتم استنتاج معادلات تربط بين الإجهادات والانفعال داخل العنصر. وباستخدام طريقة اتزان الطاقة أو أى من الطرق المستخدمة فى هذا المجال طبقاً لنوع التطبيق يتم التوصل إلى Stiffness matrixوالتى تربط الاجهادات بين نقاط الربط للعناصر المختلفة. ولهذا فإنها تحتاج إلى Constitution relation shipلتعديل قيم خصائص التربة طبقاً لمستويات التحميل. ومنها نتوصل إلى معادلات جبرية يمكن حلها بالحاسب الآلى للوصول إلى قيم القوى اللازمة لتشغيل الأسلحة.

وقد ظهرت فى الآونة الأخيرة نماذج عديدة تعتمد على FEM منها

(Constantin et al., 2019; Fielke, 1999; Plouffe et al., 1999; Yong & Hanna, 1977; Zein Eldin et al., 1990; Zhang et al., 2020)

وبرغم المميزات العديدة التى تتميز بها هذه الطريقة إلا أنها تحتاج مزيد من التركيز على كيفية معالجة.interface

نتائج مقارنة أهم النماذج الرياضية بالنتائج العملية:

للوقوف على مدى نجاح بعض النماذج الرياضية الهامة. تم مقارنة نتائجها مع نتائج اختبارات عملية (Onwualu & Watts, 1998).منها تحقق أن معظم النماذج التحليلية لم تحقق نجاح ملموس فى توقع قوة الشد حيث تراوحت دقة التوقع ما بين 40 – 60%. علاوة على فشلها فى بعض الحالات تماماً. وقد أعطت نماذج العناصر المحددة نتائج دقيقة إلى حد ما حيث بلغت الدقة ما بين 80 – 90%. ومن هذه الدراسة ومن واقع هذه الاختبارات يمكننا القول أن تطوير المعالجة باستخدام طريقة العناصر المحدودة بحيث تمثل الواقع الحقيقى لما يحدث أثناء التحميل قد يؤدى إلى دقة أعلى وتمثيل واقعى. فالمشكلة الحقيقية الآن تتمثل فى المنطقة التى يلامس فيها السلاح التربة. البعض مثلها بعنصر ذو نقطتين ربط-line) (Eأو (Joint-E) وهذا لا يمثل الواقع حيث أن هذه المنطقة تنهار فى البداية تحت تأثير الكبس ثم يحدث ذلك بعد الاحتكاك أو يحدثان فى نفس الوقت. ومن هنا فإن هذه الدراسة تقترح الميزد من المعالجة فى هذه الجزئية فى أعمال بحثية مستقبلة.

REFERENCES

Bowers, C. G. (1985). Southeastern tillage energy data and recommended reporting. *Transactions of the ASAE*, *28*(3), 731–737.

Bravo, E. L., Suárez, M. H., Cueto, O. G., Tijskens, E., & Ramon, H. (2012). Numerical Simulation of Soil-Tool Interaction by Discrete Element Method. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, *21*(4), 5–11.

Constantin, G. A., Voicu, G., Olac, B., Ilie, F., &

Paraschiv, G. (2019). Structural analysis with finite elements of a subsoiler working part. *International Symposium, ISB-INMA-TEH, Agricultural and Mechanical Engineering, Bucharest, Romania, 31 October-1 November 2019.*, 89–95.

Drwish, L. A. (2020). Modeling the Effect of Soil-Tool Interaction on Draft Force Using Visual Basic. *Annals of Agricultural Science, Moshtohor*, *58*(2), 223–232.

Fielke, J. M. (1999). Finite element modelling of the interaction of the cutting edge of tillage implements with soil. *Journal of Agricultural Engineering Research*, *74*(1), 91–101.

Godwin, R. J., & Spoor, G. (1977). Soil failure with narrow tines. *Journal of Agricultural Engineering Research*, *22*(3), 213–228.

Graham, J. (1968). Plane plastic failure in cohesionless soils. *Geotechnique*, *18*(3), 301–316.

Grisso, R. D., Yasin, M., & Kocher, M. F. (1996). Tillage implement forces operating in silty clay loam. *Transactions of the ASAE-American Society of Agricultural Engineers*, *39*(6), 1977–1982.

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

Kawamura, H. (1985). Phase transition of the three-dimensional Heisenberg antiferromagnet on the layered-triangular lattice. *Journal of the Physical Society of Japan*, *54*(9), 3220–3223.

Krastin, E. N. (1973). use of methods of theory of dimensional analysis for the evaluation of the draft characteristics of the plow during operation in different conditions. *Dokfady Milsp*, *8*(1), 61–72.

McKyes, E, & Ali, O. S. (1977). The cutting of soil by narrow blades. *Journal of Terramechanics*, *14*(2), 43–58.

McKyes, Edward. (1985). *Soil cutting and tillage*. Elsevier.

Nicholson, R. I., Bashford, L. L., & Mielke, L. N. (1984). Energy requirement for tillage from a reference implement. *Paper-American Society of Agricultural Engineers [Microfiche Collection](USA). No. Fiche No. 84-1028.*

O'callaghan, J. R., & Farrelly, K. M. (1964). Cleavage of soil by tined implements. *Journal of Agricultural Engineering Research*, *9*(3), 259–270.

Oni, K. C., Clark, S. J., & Johnson, W. H. (1992). The effects of design on the draught of undercutter-sweep tillage tools. *Soil and Tillage Research*, *22*(1–2), 117–130.

Onwualu, A. P., & Watts, K. C. (1998). Draught and vertical forces obtained from dynamic soil cutting by plane tillage tools. *Soil and Tillage Research*, *48*(4), 239–253.

Osman, M. S. (1964). The mechanics of soil cutting blades. *Trans. of ASAE*, *9*(4), 318–328.

Payne, P. C. J. (1956). The relationship between the mechanical properties of soil and the performance of simple cultivation implements. *Journal of Agricultural Engineering Research*, *1*(1), 23–50.

Perumpral, J. V, Grisso, R. D., & Desai, C. S. (1983). A soil-tool model based on limit equilibrium analysis. *Transactions of the ASAE*, *26*(4), 991–995.

Plouffe, C., Richard, M. J., Tessier, S., & Lague, C. (1999). Validations of moldboard plow simulations with FEM on a clay soil. *Transactions of the ASAE*, *42*(6), 1523.

Reaves, C. A., Cooper, A. W., & Kummer, F. A. (1968). Similitude in performance studies of soil-chisel systems. *Transactions of the ASAE*, *11*(5), 658–660.

Reece, A. R., & Hettiaratchi, D. R. P. (1989). A slip-line method for estimating passive earth pressure. *Journal of Agricultural Engineering Research*, *42*(1), 27–41.

Schafer, R. L., Young, S. C., Hendrick, J. G., & Johnson, C. E. (1984). Control concepts for tillage systems. *Soil and Tillage Research*, *4*(4), 313–320.

Swick, W. C., & Perumpral, J. V. (1988). A model for predicting soil-tool interaction. *Journal of Terramechanics*, *25*(1), 43–56.

Terzaghi, K. (1943). Theoretical soil mechanics. johnwiley & sons. *New York*, 11–15.

Upadhyaya, S. K. (1984). Prediction of tillage implement draft. *Microfiche Collection*.

Yasin, M., Grisso, R., & Bashford, L. (1991). Reference implement concept for predicting tillage draft. *ASAE Paper No. 91-1525*.

Yong, R. N., & Hanna, A. W. (1977). Finite element analysis of plane soil cutting. *Journal of Terramechanics*, *14*(3), 103–125.

Young, D. F. (1968). Similitude of soil-machine systems. *Transactions of the ASAE*, *11*(5),

653–657.

Zein El-Din, A. M., & Sayedahmed, A. A. (2000). A mathematical model for predicting draft forces for flat, chisel, sweep and winged chisel tools. *M.J.Agric.Eng.*, *17*(1), 208–232.

Zein Eldin, A. M., Watts, K. C., Younis, S. M., & Shaibon, M. (1990). Development of a two dimensional finite element model for soil-tool interaction. *Paper-American Society of Agricultural Engineers*, *90–1544*.

Zhang, J.-W., Zhu, L., Chen, P., Wu, Q.-M., Wei, M., Yin, C.-L., & Li, G.-L. (2020). Flowing interaction between cutting edge of ploughbreast with soil in shifting tillage operations. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, *14*(1), 1404–1415.