

การประยุกต์ใช้ Discrete Element Method สำหรับการออกแบบอุปกรณ์กวาดล้างถนน

อรรถพล เจริญผล^{1*} วรณชพัฒน์ ฤทธิเลื่อน²

วันที่รับ 2 กันยายน 2568 วันที่แก้ไข 23 ธันวาคม 2568 วันที่ตอบรับ 27 ธันวาคม 2568

บทคัดย่อ

ในการออกแบบอุปกรณ์กวาดล้างถนน การพิจารณาแรงต้านจากดินและการทำนายพฤติกรรมทางกลศาสตร์ของดินมีความจำเป็นและสำคัญอย่างยิ่งต่อประสิทธิภาพในการกวาดล้างถนนโดยการคำนวณแรงต้านดินเชิงทฤษฎีโดยใช้สมการ Reece และศึกษาพฤติกรรมทางกลศาสตร์ของดินโดยการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีองค์ประกอบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Element Method, DEM) ซึ่งผลจากการคำนวณแรงต้านทานโดยสมการของ Reece และการพิจารณาแรงที่เกิดขึ้นจริงระหว่างอนุภาคดินกับใบไถในระดับจุลภาคด้วย DEM แสดงให้เห็นว่าแรงที่ได้จาก DEM มีการเพิ่มขึ้นตามความลึกของการไถและมีค่ามากกว่าค่าที่คำนวณโดยใช้ทฤษฎี ค่าของแรงที่สูงขึ้นนี้เป็นผลมาจากพฤติกรรมการกระทำระหว่างอนุภาคดินที่มีการสัมผัสและผลัดกันเป็นช่วง ๆ ส่งผลให้ค่าแรงจากระเบียบวิธีองค์ประกอบไม่ต่อเนื่อง มีค่าสูงกว่าที่ได้จากการคำนวณแบบเชิงทฤษฎีมากถึง 30% ที่การไถที่ความลึก 0.3 เมตร สำหรับการไถที่ความลึกน้อยกว่า 0.15 เมตร นั้นค่าแรงต้านทานจากทฤษฎีและจากระเบียบวิธีองค์ประกอบไม่ต่อเนื่องนั้นใกล้เคียงกัน ผลการจำลองด้วยระเบียบวิธีองค์ประกอบไม่ต่อเนื่องสามารถทำนายพฤติกรรมการตัดของดินและแสดงพฤติกรรมการไหลของดินผ่านใบไถดินได้อย่างละเอียด ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญสำหรับการออกแบบและปรับปรุงใบไถดินให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นต่อไป

คำสำคัญ: กลศาสตร์ดิน, แรงต้านดิน, อุปกรณ์กวาดล้างถนน

¹ ฝ่ายวิจัยและพัฒนา, สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

² ฝ่ายวิจัยและพัฒนา, สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

* ผู้แต่ง, อีเมล: attapon.c@dti.or.th

Simulation of the tillage process using LIGGGHTS based on the Discrete Element Method (DEM)

Attapon Charoenpon ^{1*} Watchaphat Ridluan ²

Received 2 September 2025, Revised 23 December 2025, Accepted 27 December 2025

Abstract

In the design of mine-clearing equipment, consideration of soil resistance and the prediction of soil mechanical behavior are critically important for achieving effective mine-clearance performance. In this study, soil resistance was first estimated theoretically using the Reece equation, and the mechanical behavior of soil was further investigated by applying the Discrete Element Method (DEM). The results show that both the resistance predicted by the Reece equation and the forces obtained from DEM simulations increase with increasing plowing depth; however, the forces predicted by DEM are consistently higher than those obtained from the theoretical calculation. This difference arises from the intermittent contact and interaction between individual soil particles and the plow, which are explicitly captured at the microscale in DEM simulations. As a result, the resistance force predicted by DEM is up to 30% higher than that obtained from the theoretical model at a plowing depth of 0.3 m. For shallower plowing depths below 0.15 m, the resistance forces predicted by the theoretical approach and by DEM are in close agreement. Overall, the DEM simulations are able to predict the soil cutting behavior and to visualize the detailed flow of soil over the plow blade, providing valuable insight for the design and further optimization of plow blades for improved performance.

Keywords: Soil Mechanical, Soil Resistance Force, Surface Clearance Device

¹ Research and Development Division, Defence Technology Institute

² Research and Development Division, Defence Technology Institute

* Corresponding author: attapon.c@dti.or.th

1. บทนำ

ทุ่นระเบิดที่หลงเหลือจากความขัดแย้งและสงครามนับเป็นภัยคุกคามต่อความปลอดภัยของมนุษย์และกระทบต่อการพัฒนาเศรษฐกิจภาคประชาชนที่อาศัยอยู่ในพื้นที่ใกล้เคียง การเก็บกู้หรือการกวาดล้างทุ่นระเบิดจึงเป็นสิ่งสำคัญและต้องดำเนินการได้อย่างรวดเร็ว มีประสิทธิภาพ และมีความปลอดภัยสูง

วิธีการขจัดทุ่นระเบิดที่มีการใช้อย่างแพร่หลายคือการใช้เครื่องจักรกลติดตั้งไปไถดิน (Mine Plow) [1] ซึ่งสามารถเปิดเส้นทางจราจรให้มีความปลอดภัยโดยการขุดหรือเบี่ยงเบนทุ่นระเบิดจากแนวการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ

อย่างไรก็ตามการออกแบบไปไถดินสำหรับอุปกรณ์กวาดล้างทุ่นระเบิดให้สามารถเคลื่อนที่ทุ่นระเบิดได้อย่างมีประสิทธิภาพต้องอาศัยความรู้ทางกลศาสตร์ของดิน การประเมินแรงต้านจากดิน และประสิทธิภาพในการตัดดินในสภาพแวดล้อมที่หลากหลายเพื่อให้แน่ใจว่าไปไถดินสามารถกวาดหรือเบี่ยงเบนทุ่นระเบิดได้โดยไม่สร้างความเสียหาย

บทความนี้นำเสนอการหานายแรงต้านจากการไถดินโดยอาศัยการเปรียบเทียบระหว่างการคำนวณด้วยทฤษฎีกลศาสตร์ประยุกต์และการจำลองเชิงตัวเลขด้วยระเบียบวิธีองค์ประกอบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Element Method) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อทำความเข้าใจพฤติกรรมทางกลศาสตร์ของดินและแรงที่กระทำต่อไปไถดินอย่างละเอียดและนำผลการวิเคราะห์ไปใช้ในการออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์กวาดล้างทุ่นระเบิดให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นทั้งในด้านความปลอดภัยของยานพาหนะและความสามารถในการปฏิบัติการเคลื่อนที่ทุ่นระเบิดในสภาพแวดล้อมที่มีความเสี่ยงสูง

2. วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบอุปกรณ์กวาดล้างทุ่นระเบิด สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน ดังนี้

- (1) ทฤษฎีแรงต้านจากดินและกลศาสตร์ของดิน
- (2) การออกแบบทางกล
- (3) การประยุกต์ใช้เครื่องมือวิเคราะห์ทางวิศวกรรม

เช่น การจำลองเชิงตัวเลขและการทดสอบภาคสนาม

Reece [2] ได้นำเสนอสมการพื้นฐานของกลศาสตร์งานดินซึ่งใช้ในการคำนวณแรงต้านทานจากดินที่กระทำต่อไปไถดิน โดยสมการดังกล่าวอธิบายว่าแรงต้านเกิดจากผลรวมขององค์ประกอบหลัก ได้แก่ แรงจากการยึดเหนี่ยวของดิน แรงจากน้ำหนักของดินแรงที่สัมพันธ์กับมุมเสียดทานภายในของดินและแรงกดทับผิวดินที่เกิดจากความลึกของการทำงานของไปไถ โดยแรงต้านจะเพิ่มขึ้นตามความกว้างและความลึกของไปไถ รวมถึงคุณสมบัติเชิงกลของดิน

McKyes [3] แรงต้านที่เกิดขึ้นระหว่างการไถดินขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ระหว่างมุมของไปไถ ความเร็วในการไถ และชนิดของดิน โดยมุมของไปไถมีผลโดยตรงต่อกลไกการตัดและการไหลของดิน มุมที่เพิ่มขึ้นทำให้ดินถูกตัดได้แต่จะมีแรงต้านสูง และที่มุมไปไถต่ำลงนั้นแรงต้านทานจะน้อยแต่การตัดดินก็จะมีประสิทธิภาพน้อยลงตาม สำหรับความเร็วในการไถเมื่อความเร็วสูงขึ้นแรงต้านจะเพิ่มขึ้นจากผลของแรงเฉื่อยและการแตกตัวของดิน ทั้งนี้ จะแตกต่างกันไปตามชนิดดิน ขณะที่ดินที่มีการยึดเหนี่ยวสูง เช่น ดินร่วนหรือดินเหนียว จะมีแรงต้านจากแรงยึดเหนี่ยวของดินและแรงยึดติดระหว่างดินกับผิวไปไถสูง

สำหรับการออกแบบทางกลของไปไถดิน Harrison [4] แสดงให้เห็นว่าไปไถแบบขาอ (bent-leg) ซึ่งมีส่วนของไปไถบิดเอียงออกด้านข้าง ทำให้ดินด้านหน้าถูกฉีกเป็นลิ่มและไหลเบี่ยงไปตามทิศของไปไถแทนที่

จะถูกดันกองอยู่ด้านหน้าเท่านั้น ไบโกลเียงออกด้านข้าง ส่งผลให้เกิดแรงดันข้างที่ช่วยควบคุมการไหลของดิน และวัตถุที่ฝังอยู่ในดินอย่างเป็นระบบ หลักการนี้ถูกนำไปใช้โดยตรงกับการออกแบบไบโกลดินแบบ V-shape ของ mine plough โดยจัดปีกซ้าย-ขวาให้เอียงออกจากแนวศูนย์กลางรถอย่างสมมาตร ทำให้มวลดินและท่อนระเบิดที่ถูกยกตัวขึ้นมาหน้าไบโกลดินและถูกบังคับให้ไหลออกไปตามผิวของไบโกลดินทั้งสองด้านไปสู่ด้านข้างของรถ ขณะเดียวกันแรงดันข้างจากปีกซ้ายและขวาจะหักล้างกัน ทำให้เครื่องมือยังคงเคลื่อนที่อยู่แนวตรงได้

Hoseinian [5] ได้เปรียบเทียบรูปทรงไบโกลไต้ผิวดินสามแบบ ได้แก่ ไบทรงสี่เหลี่ยม ไบทรงสามเหลี่ยม และไบทรงตัววี โดยวัดแรงดันการไถ (draft) และคุณลักษณะการแตกตัวของดินรอบเครื่องมือผลการทดลองพบว่าไบทรงตัววีให้ค่าแรงดันการไถต่ำที่สุด ในขณะที่ยังคงความสามารถในไถดินในแนวราบได้ดีเทียบเท่าหรือดีกว่าทรงอื่นซึ่งแสดงให้เห็นว่ารูปทรงตัววีสามารถลดความเข้มของแรงดันต่อหน่วยความกว้างซึ่งช่วยลดกำลังลากที่ต้องใช้

จากความก้าวหน้าทางคณิตศาสตร์และเทคโนโลยีการใช้เครื่องมือทางวิศวกรรมในการวิเคราะห์อย่างแพร่หลาย เช่น Finite Element Method (FEM) และ Discrete Element Method (DEM) Bashir & Yahya [6] ได้ทบทวนงานวิจัยที่ใช้ FEM ในการจำลองปฏิสัมพันธ์ระหว่างไบมิตกับดิน เพื่อตรวจสอบแรงดันแรงสั่นสะเทือน และพฤติกรรมของดินที่เปลี่ยนไปขณะไบโกลดินเคลื่อนผ่าน การจำลองเหล่านี้ช่วยลดต้นทุนในการทดสอบจริง และสามารถปรับปรุงการออกแบบให้เหมาะสมกับสภาพดินที่หลากหลาย เช่น ดินทราย ดินเหนียว หรือดินปนหิน

S. Murray [7] เมื่อความเร็วในการไถมากขึ้น ความลึกทำงานเพิ่มขึ้น หรือรูปทรงไบโกลที่มีความซับซ้อน ความแตกต่างระหว่างผลคำนวณแบบ DEM กับแบบ

เชิงวิเคราะห์ตามทฤษฎี Reece จะเด่นชัดขึ้น แบบจำลอง Reece อาศัยสมมติฐานแบบสองมิติและสภาวะกึ่งสถิตยศาสตร์ทำให้ได้ค่าแรงดันการไถเฉลี่ยที่ราบเรียบและไม่สามารถแสดงแรงที่เกิดจากการแตกตัวของดิน การชนกันของอนุภาค และการไหลสามมิติรอบไบโกลได้ ขณะที่ DEM จำลองดินเป็นอนุภาคเดี่ยวจำนวนมาก ทำให้สามารถจับพฤติกรรมแบบไม่ต่อเนื่องได้ ส่งผลให้เกิดค่าแรงปฏิกิริยาในช่วงสั้นซึ่งมักสูงกว่าค่าแรงเฉลี่ย จากทฤษฎี Reece โดยความคลาดเคลื่อนของค่าแรง ณ ช่วงเวลาหนึ่งอาจอยู่ในช่วงประมาณ 15% และอาจสูงถึง 20-30% ได้

สามารถสังเกตได้ว่าถึงแม้มีความก้าวหน้าในการออกแบบไบโกลดินและการใช้แบบจำลองทางกลศาสตร์ในการทำนายประสิทธิภาพในการเคลื่อนที่ท่อนระเบิด แต่ยังคงมีช่องว่างในด้านการพิจารณาข้อมูลจากการทดสอบรวมเข้ากับการจำลองทางวิศวกรรม และการออกแบบที่สามารถปรับตัวได้กับสภาพดินที่ไม่สม่ำเสมอหรือซับซ้อน

บทความนี้จึงเสนอแนวทางการประยุกต์ใช้สมการ Reece ร่วมกับ DEM ในการวิเคราะห์แรงดันจากดินสำหรับการพัฒนาไบโกลดินและสามารถนำไปปรับใช้ในภารกิจเคลื่อนที่ท่อนระเบิดได้ในสภาวะแวดล้อมทางทหาร

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การออกแบบที่ไม่คำนึงแรงดันดินอาจทำให้ไบโกลดินหักหรือระบบจับยึดหลุดหรือเสียหายระหว่างการกวาดล้างท่อนระเบิด นอกจากนี้หากแรงดันสูงเกินไปและยานพาหนะไม่มีกำลังเพียงพอที่จะเอาชนะแรงดันดินได้ เครื่องยนต์หรือระบบขับเคลื่อนอาจไม่สามารถดึงไบโกลดินผ่านดินได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ดังนั้นทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับกลศาสตร์ของดิน กลศาสตร์การตัดดิน และสมการที่ใช้ในการคำนวณแรงดันจากดินอย่างแม่นยำมีความสำคัญและมีผลต่อ

กระบวนการออกแบบอุปกรณ์กำจัดทุ่นระเบิดสำหรับภารกิจเคลียร์ทุ่นเป็นอย่างยิ่ง

กลศาสตร์ของดินเป็นศาสตร์ที่ศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมของดินภายใต้แรงกระทำซึ่งมีตัวแปรที่สำคัญต่อที่มีผลต่อพฤติกรรมทางกลศาสตร์ดิน เช่น ความหนาแน่น ความยึดเหนี่ยวภายใน มุมเสียดทานภายใน และความสามารถในการรับน้ำหนัก พารามิเตอร์ดังกล่าวส่งผลต่อการพัฒนาแรงต้านที่ดินส่งไปสู่วัตถุใต้อุปกรณ์กวาดล้างทุ่นระเบิดขณะที่ไถดินเคลื่อนที่แทรกผ่านชั้นดิน

กลศาสตร์การตัดดินอธิบายพฤติกรรมของดินเมื่อถูกไถดินกวาด โดยดินจะแตกตัว เคลื่อนที่ และไหลไปรอบไถดินตามแรงเฉือนและแรงดันที่กระทำซึ่งพฤติกรรมเหล่านี้จะส่งผลกระทบต่อารออกแบบมุมความโค้ง ความลึกที่เหมาะสม และรูปทรงของไถดิน

เพื่อให้พัฒนาความเข้าใจถึงกลไกการเกิดแรงต้านดินที่สามารถควบคุมได้และเพิ่มประสิทธิภาพในการเบี่ยงเบนวัตถุที่ฝังอยู่ในดิน เช่น ทุ่นระเบิด งานวิจัยนี้ได้นำสมการของ Reece ซึ่งจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย คำนวณแรงต้านจากดินที่กระทำต่อไถดินโดยพิจารณาทั้งแรงจากน้ำหนักของดิน ความยึดเหนี่ยว การยึดเกาะผิวไถดิน แรงกดดันจากภายนอก และแรงในแนวตั้ง โดยสมการของ Reece แสดงในสมการที่ (1)

$$D_S = \frac{[yz^2N_\gamma + czN_c + c_a zN_a + qzN_q]}{\sin(\alpha + \delta) + V \tan \phi} \quad (1)$$

โดยที่ D_S คือ แรงต้านทานจากดิน, γ คือ ความหนาแน่นของดิน, z คือ ความลึกของการตัดดิน, c คือ ค่าความยึดเหนี่ยวของดิน, c_a คือ แรงยึดเกาะระหว่างดินกับไถดิน, q คือ แรงกดดันภายนอก เช่น น้ำหนักจากล้อหรือเครื่องจักร, V คือ แรงแนวตั้งจากดิน, ϕ คือ มุมเสียดทานภายในของดิน, α คือ มุมของไถดิน และ δ คือ มุมเสียดทานระหว่างดินกับไถดิน

ส่วน N_γ, N_c, N_a, N_q เป็นค่าคงที่ทางทฤษฎีที่ใช้แสดงอิทธิพลของแต่ละองค์ประกอบต่อแรงต้านโดยรวม

จากสมการที่ (1) สามารถสังเกตได้ว่าแรงต้านดินประกอบด้วยแรงจากน้ำหนักของดิน แรงจากความยึดเหนี่ยวของดิน แรงยึดเกาะกับผิวไถดิน และแรงจากแรงกดทับบนผิวดิน ซึ่งแรงทั้งหมดจะถูกปรับทิศทางตามมุมไถดินและมุมเสียดทาน นอกจากนี้ยังมีแรงเสริมจากแรงแนวตั้งของดินที่เปลี่ยนเป็นแรงต้านผ่านมุมเสียดทานภายใน ซึ่งสมการ ของ Reece จึงเป็นเครื่องมือสำคัญที่ช่วยให้สามารถประเมินแรงที่ต้องใช้ในการออกแบบและใช้งานเครื่องจักรที่มีการกระทำต่อดินในสถานะต่างๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

อย่างไรก็ตาม สมการของ Reece มีลักษณะเป็นสถิตยศาสตร์ซึ่งยังไม่คำนึงถึงผลจากการเคลื่อนที่ ดังนั้นจำเป็นต้องมีพจน์ที่สามารถอธิบายผลทางพลศาสตร์เสนอโดย Gill & Vanden Berg [8] แสดงในสมการที่ (2) สำหรับการไถอย่างรวดเร็วดังนี้

$$D_D = \rho A v_b^2 \quad (2)$$

โดยที่ D_D คือ แรงต้านทานจากดินแบบพลศาสตร์, ρ คือ ความหนาแน่นของดิน, A คือ หน้าตัดของไถตัดดินที่สัมผัสกับดิน, v_b คือ ความเร็วของการไถ

จากสมการ (1) และ (2) แรงต้านดินรวม (D) นั้นจะเท่ากับแรงต้านดินเชิงสถิตยศาสตร์และทางพลศาสตร์ ดังแสดงในสมการที่ (3)

$$D = D_S + D_D \quad (3)$$

จะเห็นได้ว่าสมการ ของ Reece เป็นสมการที่ใช้คำนวณแรงต้านดินแบบแม่นยำซึ่งไม่สามารถอธิบายทางกลศาสตร์ของดินและลักษณะการทำงานของอุปกรณ์ตัดดินอย่างละเอียดและเป็นระบบ

ดังนั้นในการออกแบบอุปกรณ์กวาดล้างทุ่นระเบิดนี้จะนำเสนอการประยุกต์ใช้สมการของ Reece

ควบคุมไปกับการใช้ระเบียบวิธีการแบบองค์ประกอบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Element Method: DEM) ซึ่งสามารถจำลองดินในลักษณะของกลุ่มอนุภาคแยกจากกัน แทนที่จะมองดินเป็นตัวกลางต่อเนื่องโดยอนุภาคสามารถเปลี่ยนตำแหน่ง หมุนตัว และส่งแรงกระทำต่อกันได้อย่างอิสระ ในแต่ละช่วงเวลา DEM จะคำนวณแรงรวมที่กระทำต่ออนุภาคโดยใช้กฎของนิวตัน ซึ่งสามารถเขียนในรูปสมการได้ดังแสดงในสมการที่ (4) [9]

$$m_i \frac{d^2 u_i}{dt^2} = \sum F_{ij} + F_i^{ext} \quad (4)$$

โดยที่ m_i คือ มวลของอนุภาค, u_i คือ เวกเตอร์ตำแหน่งของอนุภาค, F^{ext} คือ แรงภายนอกที่กระทำต่ออนุภาค เช่น แรงจากการไถ หรือแรงโน้มถ่วง เป็นต้น และ F_{ij} คือ แรงที่อนุภาคอื่นกระทำต่ออนุภาค i ที่สนใจ ซึ่งจะประกอบไปด้วยแรงปกติ F_n และแรงเฉือน F_t ดังสมการที่ (5) และ (6)

$$F_n = k_n \delta_n n - \gamma_n v_n n \quad (5)$$

$$F_t = \min(k_t \delta_t - \gamma_t v_t, \mu |F_n|) \cdot t \quad (6)$$

โดยที่ k_n, k_t คือ ค่าคงที่ของสปริงในแนวปกติและแนวเฉือน, γ_n, γ_t คือ ค่าหน่วงในแนวปกติและแนวเฉือน, δ_n, δ_t คือ การแทรกซ้อนของอนุภาคในแนวปกติและแนวเฉือน, v_n, v_t คือ ความเร็วสัมพัทธ์ของอนุภาค, μ คือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัส

การรวมแรงเหล่านี้ในแต่ละอนุภาคจะถูกนำไปคำนวณการเคลื่อนที่โดยใช้วิธี explicit Euler หรือ Velocity-Verlet [10] เพื่อคำนวณตำแหน่งและความเร็วของอนุภาคตลอดช่วงเวลาการจำลอง

อย่างไรก็ตาม DEM มีข้อจำกัดในด้านต้นทุนการคำนวณที่สูง และจำเป็นต้องตั้งค่าพารามิเตอร์อย่าง

ระมัดระวัง เช่น ค่าสปริง ค่าหน่วง และขนาดอนุภาค เพื่อให้ได้ผลการจำลองที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริง การเปรียบเทียบระหว่าง DEM และสมการของ Reece จึงเป็นสิ่งสำคัญที่ช่วยให้เกิดความเข้าใจในพฤติกรรมของดินและประสิทธิภาพของไบโกลในการเคลียร์ทุ่งระเบิดอย่างปลอดภัยได้อย่างลึกซึ้ง

ในการศึกษานี้ ใช้ซอฟต์แวร์ LIGGGHTS (LAMMPS Improved for General Granular and Granular Heat Transfer Simulations) [11] ซึ่งเป็นโปรแกรม Open Source ที่พัฒนามาจาก LAMMPS ซึ่งเน้นการจำลองวัสดุเม็ด (granular materials) ด้วยวิธี Discrete Element Method (DEM) โดยเฉพาะ เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของดินเมื่อถูกไบโกลดินแหวกผ่าน LIGGGHTS มีความสามารถในการจำลองปฏิสัมพันธ์ระหว่างอนุภาคจำนวนมาก คำนวณแรงปะทะแรงเสียดทาน การหมุนของอนุภาค รวมถึงการจำลองแรงภายนอกที่กระทำจากไบโกลดินหรือการระเบิดได้ด้วยความสามารถในการกำหนดขอบเขตที่ยืดหยุ่นและรองรับการจำลองแบบขนาน (Parallel Computing)

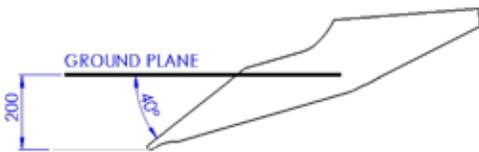
4. แบบไบโกลดิน

แบบจำลองของไบโกลดินได้จากการวัดขนาดจริงของไบโกลดินที่ ศูนย์การทหารม้า ค่ายอดิศร จ.สระบุรี และนำมาพัฒนาต่อยอดโดยมุ่งเน้นหลักการเบี่ยงและแยกวัตถุระเบิดออกจากแนวการเคลื่อนที่ของรถ ดังแสดงในรูปที่ 1 ไบโกลดินของอุปกรณ์ขจัดทุ่งระเบิดมีลักษณะเป็นไบโกลคู่แบบแยกซ้าย-ขวา ติดตั้งอยู่บนแขนกลที่สามารถปรับระดับและมุมได้ด้วยกระบอกลไฮดรอลิก ไบโกลดินแต่ละข้างประกอบด้วยไบโกลวงตัวแบบ V-shape พร้อมฟันชุด (Tine) ปลายแหลมด้านล่างสำหรับเจาะและยกดินขึ้นและเพื่อเบี่ยงวัตถุที่ฝังอยู่ใต้ดิน เช่น ทุ่งระเบิด ไปยังด้านข้างของยานพาหนะ



รูปที่ 1 การออกแบบไ้ไ้ดิน
สำหรับภารกิจเคลียร์ทุ่นระเบิด

ไ้ไ้ดินทั้งสองถูกยึดโยงไว้ด้วยโครงสร้างแบบไขว้เพื่อเพิ่มความแข็งแรงโดยไม่เพิ่มน้ำหนักเกินความจำเป็น และยังรองรับแรงกระแทกที่อาจเกิดขึ้นในกรณีที่ทุ่นระเบิดทำงานโดยตรงกับไ้ไ้ดิน ดังนั้นการออกแบบไ้ไ้ดินมีความเหมาะสมสำหรับการใช้งานในภารกิจทางทหารหรืองานที่ต้องการความปลอดภัยสูง และสามารถเข้าถึงพื้นที่เสี่ยงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

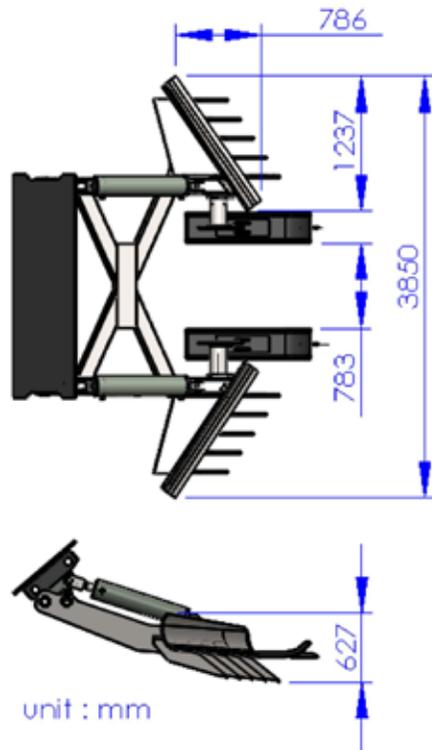


รูปที่ 2 รูปตัดด้านข้างของฟันขุด (tine)

รูปที่ 2 แสดงรูปตัดด้านข้างของฟันขุด (Tine) ซึ่งมีลักษณะเป็นซี่แหลมติดอยู่ด้านล่างของไ้ไ้ดิน ฟันขุดเป็นองค์ประกอบสำคัญในการเจาะทะลุและพลิกผิวดินเพื่อให้ดินเคลื่อนที่ผ่านไปตามรูปทรงของไ้ไ้ดินเพื่อเบี่ยงทุ่นระเบิด รูปทรงของฟันขุดถูกออกแบบให้มีความลาดเอียงเข้าหาพื้นดินที่มุมประมาณ 40 องศา จากพื้นระนาบ มีความยาวจากพื้นดินถึงจุดปลายที่ 200 มิลลิเมตร โดยฟันขุดออกแบบให้เรียวยาวตลอดความยาวของไ้ไ้ดินทั้งสองข้าง

ความกว้างของไ้ไ้ดินออกแบบให้มีความกว้างไม่น้อยกว่าความกว้างของรถ เพื่อให้มั่นใจว่าทุ่นระเบิด

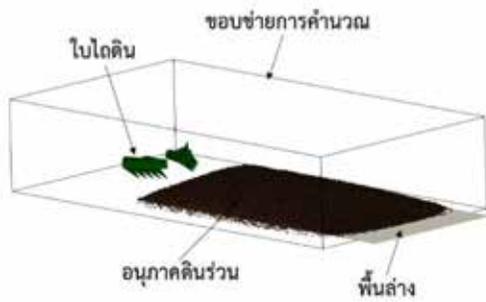
จะถูกขจัดออกจากในพื้นที่ที่รถวิ่งผ่านแสดงในรูปที่ 3 โดยความกว้างมากที่สุดมีขนาด 3850 มิลลิเมตร และสูง 627 มิลลิเมตร การจัดวางของไ้ไ้ดินมีลักษณะเป็นรูปตัววี ซึ่งช่วยลดแรงต้านในการแหวกดิน แต่ยังคงเพิ่มประสิทธิภาพในการเบี่ยงทุ่นระเบิดออกจากแนววิ่งตรงของรถ ทำให้ลดความเสี่ยงที่ทุ่นจะอยู่ใต้ท้องรถหรือใต้ล้อ



รูปที่ 3 ขนาดของไ้ไ้ดิน

5. แบบจำลองการดันดิน

รูปที่ 4 แสดงแบบจำลองการดันดินด้วยวิธีการจำลองด้วยระเบียบวิธีองค์ประกอบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Element Method: DEM) โดยใช้ซอฟต์แวร์โอเพนซอร์ส LIGGGHTS เพื่อศึกษาพฤติกรรมของดินและเปรียบเทียบแรงต้านดินที่ได้จากการคำนวณทฤษฎี



รูปที่ 4 แบบจำลองการดันดินใน LIGGGHTS

เงื่อนไขขอบเขตของวิธีการจำลองด้วยระเบียบวิธีองค์ประกอบไม่ต่อเนื่องที่ใช้ในการวิเคราะห์นี้มีองค์ประกอบหลักสำคัญคือไบโกลินที่เป็นวัสดุแข็งเกร็งจะเคลื่อนที่ผ่านชั้นดินด้วยความเร็ว 5 กิโลเมตรต่อชั่วโมงเพื่อผลักดันอนุภาคดินไปด้านหน้าและข้าง โดยอนุภาคดินร่วนเป็นกลุ่มของอนุภาคจำลอง (Spherical Particles) ที่แทนดินร่วนโดยกำหนดขนาดที่ 40 มิลลิเมตร [11] จำนวนทั้งหมด 200,000 อนุภาค ที่รวมคุณสมบัติเชิงกลของดินร่วนและค่าการยึดเหนี่ยวของดิน (Cohesion) ในการจำลอง พื้นล่างทำหน้าที่เป็นผิวกั้นเพื่อให้อนุภาคดินกองรวมอยู่ในที่ระดับความสูงที่ต้องการ

การจำลองนี้ซึ่งเปรียบเทียบความลึกของการไถ 3 ระดับ ได้แก่ 0.1 เมตร, 0.2 เมตร และ 0.3 เมตร โดยความลึกนี้พิจารณาจากขอบเขตของการฝังทุ่นระเบิดและกำลังของเครื่องยนต์ของรถที่มี

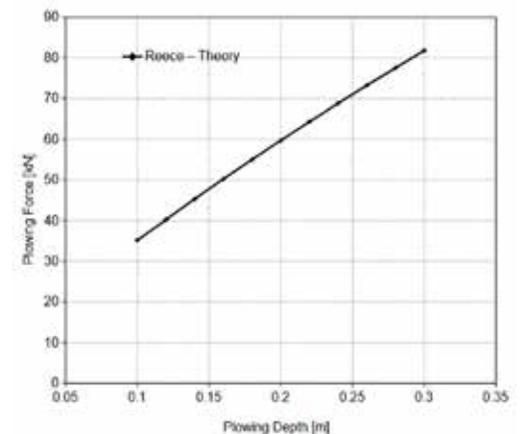
ขอบข่ายการคำนวณ (Computational Domain) เป็นขอบเขตพื้นที่ของการคำนวณที่จะเกิดขึ้น พื้นที่ผิวของขอบข่ายการคำนวณนี้จะเปิดโล่งทั้งหมด อนุภาคสามารถที่จะทะลุผ่านผิวนี้ออกไปได้ ขอบเขตคำนวณต้องมีขนาดเหมาะสมครอบคลุมการเคลื่อนที่ทั้งหมด แต่ออกแบบให้มีขนาดเล็กที่สุดเพื่อลดการใช้ทรัพยากรที่ใช้คำนวณ ในการวิเคราะห์นี้ใช้ขอบข่ายการคำนวณขนาด กว้าง 7 เมตร ยาว 13 เมตร และ สูง 3 เมตร

สำหรับแบบจำลองนี้ยังไม่ได้รวมทุ่นระเบิดลงไปในการวิเคราะห์ ทั้งนี้ทุ่นระเบิดนั้นทำให้อนุภาคดินมีความไม่สม่ำเสมอ (Non-homogeneous) ซึ่งทำให้การเปรียบเทียบกับสมการที่ 1 นั้นมีความผิดพลาดเพิ่มขึ้นได้

5. ผลการวิเคราะห์

จากข้อมูลทางเรขาคณิตที่ได้จากการออกแบบไบโกลิน ความกว้างของไบโกลิน มุมเอียงของไบโกลิน ความลึกของการแทรกลงดิน รวมถึงรูปทรงของทุ่นชุดใช้ในการคำนวณแรงต้านดินที่กระทำต่อไบโกลินด้วยสมการที่ (1)

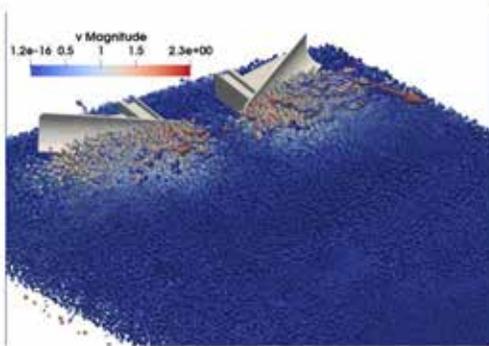
ทั้งนี้กำหนดให้ดินที่ถูกไถนั้นเป็นดินร่วน (Loam) [12] ซึ่งพบได้ทั่วไปในประเทศไทย โดยที่ γ มีค่า 17.95 kN/m³, c มีค่า 30 kN/m² และ c_a มีค่า 15 kN/m² และมีกำหนดความเร็วการไถ 5 กิโลเมตรต่อชั่วโมง สามารถทำนายค่าแรงต้านดินรวม (Plowing Force) ที่ระยะความลึก (Plowing Depth) ต่างๆ ได้ดังแสดงในรูปที่ 5 สามารถสังเกตได้ว่าที่ระยะความลึก 0.2 เมตร นั้นจะใช้แรงต้านดินรวมเท่ากับ 60 กิโลนิวตัน



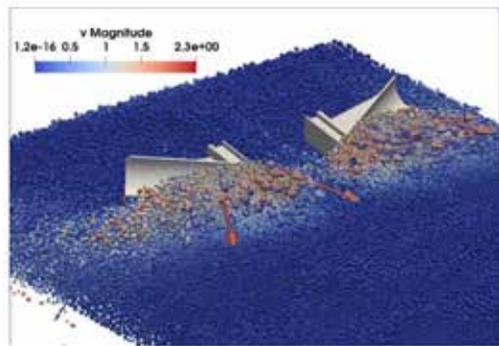
รูปที่ 5 แรงต้านดินที่เกิดขึ้นที่ระยะความลึกต่าง ๆ

รูปที่ 6 เป็นพฤติกรรมการดันดินจากการคำนวณด้วยวิธีการจำลององค์ประกอบไม่ต่อเนื่อง โดยใช้แบบจำลองไหลไถดินรูปตัววีดินผ่านชั้นของอนุภาคดินร่วน (Loam Soil Particles) ซึ่งถูกแทนด้วยอนุภาคทรงกลมขนาดเท่ากันภายในขอบเขตการคำนวณที่กำหนดไว้ โดยลูกศรในภาพแสดงเวกเตอร์ความเร็ว (Velocity Vector) ของอนุภาคในช่วงเวลาของการไถดินทิศทางและความยาวและสีของลูกศรแสดงถึงทิศทาง

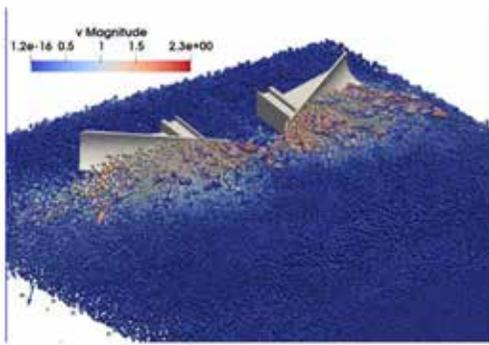
และขนาดของความเร็วของอนุภาคนั้น ๆ รูปที่ 6ก) ช่วง Timestep 10500 นั้นเป็นช่วงเวลาเริ่มต้นของการไถดิน รูปที่ 6ข) ช่วง Timestep 11500 เป็นช่วงเวลาที่การไถดินเริ่มเต็มใบไถ รูปที่ 6ค) ช่วง Timestep 12000 เป็นช่วงเวลาที่เกิดแรงต้านสูงสุดกระทำที่ใบไถ รูปที่ 6 ง) ช่วง Timestep 13000 เป็นช่วงเวลาเมื่อแรงต้านลดลงและเกิดการไถอย่างต่อเนื่อง



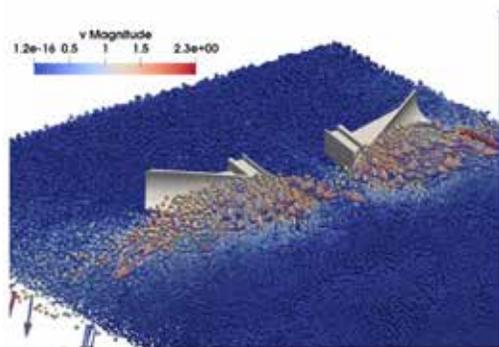
ก)



ค)



ข)

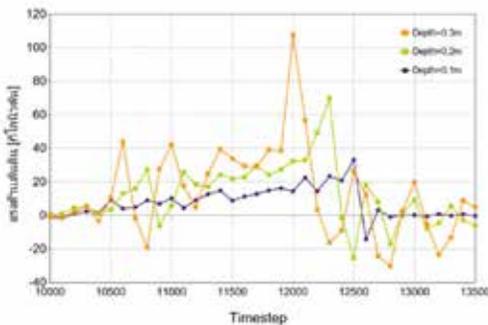


ง)

รูปที่ 6 ผลการจำลองการดันดินตามเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป

ก) Timestep 10500 ข) Timestep 11500 ค) Timestep 12000 ง) Timestep 13000

จากผลการจำลองสามารถสังเกตเห็นได้ว่าระหว่างที่ไถไถดินไถดินก่อให้เกิดการเคลื่อนที่ของมวลดินออกไปทางด้านข้างทั้งสองฝั่ง โดยมีรูปแบบการเคลื่อนที่แบบเฉียงขึ้นและออกด้านข้างตามแนวของไถไถดินแสดงดังทิศทางของเวกเตอร์ความเร็ว ซึ่งสอดคล้องกับรูปทรงที่ได้ออกแบบไว้และเป็นไปตามหลักการทำงานของไถไถดินตัววี ไถไถดินสามารถผลักดันดินให้เบี่ยงออกจากแนวกลางของการเคลื่อนที่

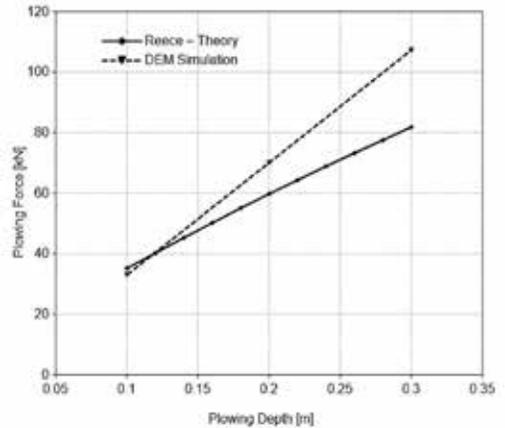


รูปที่ 7 แรงต้านดินที่เกิดขึ้นที่ไถไถดินจากการจำลอง DEM

รูปที่ 7 แสดงผลการทำนายแรงต้านดินที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลา (Time Step) โดยใช้วิธีการจำลองด้วยระเบียบวิธีองค์ประกอบไม่ต่อเนื่องซึ่งเปรียบเทียบความลึกของการไถ 3 ระดับ ได้แก่ 0.1 เมตร (สีม่วง), 0.2 เมตร (สีเขียว) และ 0.3 เมตร (สีส้ม)

โดยผลจากกราฟแสดงให้เห็นว่าแรงที่กระทำต่อไถไถมีลักษณะเพิ่มขึ้นจนถึงเรื่อยๆจนไถไถดินสามารถเอาชนะแรงเสียดทาน แรงยึดเกาะของดินได้แล้วแรงที่กระทำจะลดลงมาซึ่งเป็นลักษณะปกติของการตัดดินแบบอนุภาค (Particle-Based-Interaction) โดยแรงที่เปลี่ยนแปลงตามการกระแทกและการหมุนของอนุภาคดินในแต่ละช่วงเวลา สำหรับความลึก 0.1 เมตร (เส้นสีม่วง) พบว่าแรงต้านดินมีค่าอยู่ในช่วง 10-30 กิโลนิวตัน ส่วนความลึก 0.2 เมตร (เส้นสีเขียว) ให้ค่าแรงต้านดินสูงกว่าและมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ

30-70 กิโลนิวตัน ในขณะที่ความลึก 0.3 เมตร (เส้นสีส้ม) ให้ค่าแรงต้านดินสูงที่สุด โดยมีค่าสูงสุดเฉียบพลัน 100 กิโลนิวตัน



รูปที่ 8 การเปรียบเทียบค่าแรงต้านดินระหว่างผลการคำนวณด้วยทฤษฎีของ Reece และค่าที่ได้จากการจำลองด้วยวิธี DEM

รูปที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบแรงต้านดินระหว่างผลการคำนวณด้วยทฤษฎีของ Reece และค่าที่ได้จากการจำลองด้วยวิธี DEM โดยพิจารณาความลึกของการไถที่แตกต่างกัน ผลการเปรียบเทียบพบว่าสำหรับความลึกน้อยกว่า 0.15 เมตร ค่าแรงจาก DEM ใกล้เคียงกับที่ได้จาก Reece หรืออาจต่ำกว่าเล็กน้อยโดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ในช่วง 5-10% อย่างไรก็ตาม เมื่อความลึกเพิ่มขึ้น ค่าแรงต้านดินที่ทำนายได้จาก DEM สูงกว่าค่าแรงต้านดินที่คำนวณด้วยทฤษฎี Reece โดยเฉพาะในช่วงความลึกดินมากกว่า 0.2 เมตร ความแตกต่างสูงถึง 20-30% ซึ่งทฤษฎีของ Reece นั้นตั้งอยู่บนสมมติฐานสมการเชิงเส้น อาจประเมินแรงต้านดินต่ำเกินไปในกรณีที่มีความลึกมาก ซึ่งอาจมีผลมาจากพฤติกรรมไม่เชิงเส้นของดิน อย่างไรก็ตาม การคำนวณในครั้งนี้ได้นำสมการทางทฤษฎีของ Reece เปรียบเทียบกับผลลัพธ์จากการจำลองแบบ DEM เพื่อให้เข้าใจพฤติกรรมแรงต้านดินที่ระดับความลึกต่าง ๆ

ซึ่งผลการเปรียบเทียบนี้สามารถนำมาใช้เป็นแนวทางในการออกแบบใบไถเบื้องต้นให้มีประสิทธิภาพและความเหมาะสมกับสภาพดินได้อย่างมีประสิทธิภาพ

6. สรุปผล

ในการศึกษาครั้งนี้ ได้ดำเนินการประเมินแรงต้านทานจากดินด้วยสมการเชิงทฤษฎีของ Reece และการจำลองด้วยระเบียบวิธีองค์ประกอบไม่ต่อเนื่อง (DEM) ให้ผลที่สอดคล้องกันในช่วงความลึกการไถดิน โดยเฉพาะที่ความลึกน้อยกว่า 0.15 เมตร ซึ่งค่าแรงต้านจากการจำลองด้วยระเบียบวิธีองค์ประกอบไม่ต่อเนื่องมีค่าใกล้เคียงหรืออาจต่ำกว่าค่าที่คำนวณจากทฤษฎี Reece เล็กน้อย โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยประมาณ 5–10% อย่างไรก็ตาม เมื่อความลึกในการไถเพิ่มขึ้นมากกว่า 0.2 เมตร ค่าแรงต้านดินที่ได้จากการจำลองด้วยระเบียบวิธีองค์ประกอบไม่ต่อเนื่องมีแนวโน้มสูงกว่าค่าที่คำนวณจากทฤษฎีอย่างชัดเจน และความแตกต่างอาจเพิ่มขึ้นถึงประมาณ 20–30% ซึ่งสะท้อนให้เห็นข้อจำกัดของสมการ Reece ที่ตั้งอยู่บนสมมติฐานของพฤติกรรมดินแบบต่อเนื่องและความสัมพันธ์เชิงเส้น ขณะที่การจำลองด้วยระเบียบวิธีองค์ประกอบไม่ต่อเนื่องสามารถอธิบายพฤติกรรมไม่เชิงเส้น การเปลี่ยนแปลงของแรงตามเวลา และปฏิสัมพันธ์ระหว่างอนุภาคดินกับใบไถ ความแตกต่างดังกล่าวชี้ให้เห็นว่า สมการ Reece ยังเหมาะสมสำหรับการประมาณค่าแรงต้านดินในขั้นตอนการออกแบบเบื้องต้น แต่สำหรับการออกแบบใบไถดินที่ต้องการความแม่นยำสูง โดยเฉพาะในกรณีการไถลึก ควรอาศัยผลจากการจำลองด้วยระเบียบวิธีองค์ประกอบไม่ต่อเนื่องร่วมด้วย ทั้งนี้ แนวทางในการลดความคลาดเคลื่อนระหว่างผลเชิงทฤษฎีและการจำลองสามารถทำได้โดยการปรับค่าพารามิเตอร์ดินในสมการ Reece ให้สอดคล้องกับพฤติกรรมจริงจากการจำลอง

ด้วยระเบียบวิธีองค์ประกอบไม่ต่อเนื่องหรือการใช้ค่าตัวปรับแก้ (correction factor) ที่ขึ้นกับความลึกการไถหรือการพัฒนาสมการของ Reece ที่รวมปฏิสัมพันธ์ระหว่างอนุภาคดินกับใบไถในอนาคตต่อไป

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Pearson Engineering, "Route opening mine plough." [Online]. Available: <https://www.pearson-eng.com/product/route-opening-mine-plough/>. Accessed: Oct. 1, 2024.
- [2] A. R. Reece, "The fundamental equation of earth-moving mechanics," *Proc. Inst. Mech. Eng.*, vol. 179, pp. 16-22, 1964.
- [3] E. McKyes, *Soil Cutting and Tillage*. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Science Publishers B.V., 1985.
- [4] H. P. Harrison, "Soil reacting forces for models of three bentleg plows," *Soil Tillage Res.*, vol. 14, no. 4, pp. 325-340, 1989.
- [5] S. H. Hoseinian *et al.*, "Development of a dual sideways-share subsurface tillage tool," *Soil Tillage Res.*, vol. 216, Art. no. 105247, 2022.
- [6] M. R. Bashir and A. Yahya, "Simulation of soil-tool interaction using finite element method and discrete element method: A review," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 127, pp. 615-626, 2016.
- [7] S. Murray, "Modelling of soil-tool interactions using the discrete element method," M.Sc. thesis, Dept. Biosyst. Eng., Univ. Manitoba, Winnipeg, MB, Canada, 2016.

- [8] W. R. Gill and G. E. Vanden Berg, *Soil Dynamics in Tillage and Traction*, USDA Agric. Handbook No. 316. Washington, DC, USA: U.S. Government Printing Office, 1968.
- [9] K. Bagi, *Introduction to Discrete Element Methods: A Numerical Method for Granular and Discontinuous Materials*. Cham, Switzerland: Springer, 2022.
- [10] M. Marigo and J. P. K. Seville, "Discrete element method (DEM) for industrial applications," *KONA Powder Part. J.*, vol. 32, pp. 201-223, 2015.
- [11] C. Kloss, C. Goniva, A. Hager, S. Amberger, and S. Pirker, "Models, algorithms and validation for open source DEM and CFD-DEM," *Prog. Comput. Fluid Dyn.*, vol. 12, no. 2-3, pp. 140-152, 2012.
- [12] L. Lyle and N. P. Woodruff, "Surface soil cloddiness in relation to soil density at time of tillage," *Soil Sci.*, vol. 91, no. 3, pp. 150-159, 1961.