

Procedurális modellezéssel készült, szabadfelületekkel határolt parametrikus talajművelő szerszámgeometria tervezése geometriaoptimalizáláshoz

Design of Parametric Tillage Tool Geometry Bounded by Freeform Surfaces Using Procedural Modeling Techniques for Geometric Optimization

SZABÓ Bence¹, TAMÁS Kornél¹

¹Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Gép- és Terméktervezés Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3., szabo.bence@gt3.bme.hu

Abstract

The optimization of the interaction between tillage tools and soil is an intensively researched field due to both economic and environmental reasons. Even a small increase in efficiency during tillage can lead to significant energy savings due to the large areas involved. Moreover, the proper design of tillage tools is crucial for maintaining soil health. The aim of this research is to model the geometry of a sweep tool with a parametric design, defined by freeform surfaces. The Blender Geometry Nodes (GN) tool was used to create the geometry. The parametrically designed sweep tool is defined by 14 parameters. Its 3D model enables geometric optimization through numerical simulations, such as the discrete element method (DEM), and serves as a basis for manufacturing. The results of this research contribute to the development of more cost-effective and environmentally friendly tillage tools in the future.

Keywords: Blender Geometry Nodes, geometric optimization, parametric geometry, tillage tool, procedural modeling

Kivonat

A talajművelő szerszámok és a talaj kölcsönhatásának optimalizálása intenzíven kutatott terület. Ennek gazdasági és környezetvédelmi okai is vannak. A talajművelés során elért kis hatásfoknövekedés ugyanis nagy mennyiségű energiamegtakarítással jár a nagy területek miatt. Továbbá a talajegészség megőrzésének szempontjából is kiemelt fontosságú a megfelelő talajművelő szerszámok kialakítása. Ezen kutatás célja egy parametrikus geometriával rendelkező, szabadfelületek által határolt kultivátorszerszám geometriájának modellezése. A geometria létrehozásához a Blender Geometry Nodes (GN) eszközt alkalmaztuk. A procedurális modellezési technikával kifejlesztett parametrikus kultivátorszerszám geometriája 14 paraméterrel definiálható. A szerszám parametrikus 3D modellje lehetővé teszi a geometriai optimalizálást numerikus szimulációk, például diszkrét elemes módszer (DEM) segítségével, és a gyártás alapjául is szolgál. A kutatás eredményei hozzájárulhatnak a jövőbeli gazdaságosabb és környezetbarátabb talajművelésre alkalmas szerszámok fejlesztéséhez.

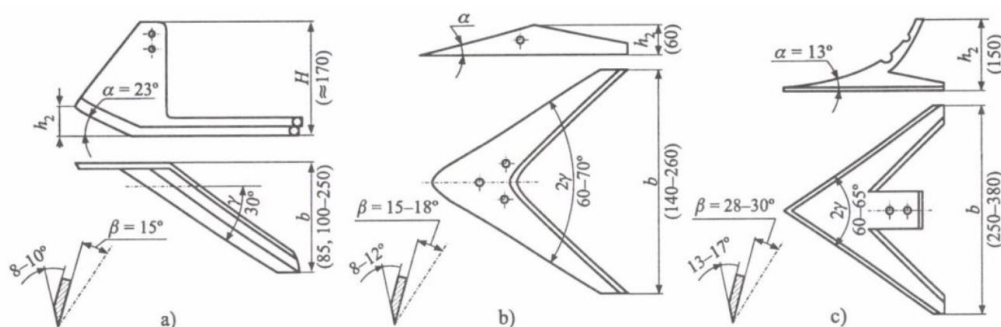
Kulcsszavak: Blender Geometry Nodes, geometriaoptimalizálás, parametrikus geometria, talajművelő szerszám, procedurális modellezés

1. BEVEZETÉS

A talaj-szerszám kölcsönhatásának optimalizálása környezetvédelmi és gazdasági érdek is. A talajművelés során elért kis hatásfoknövekedés ugyanis nagy mennyiségű energiamegtakarítással, így üzemanyagmegtakarítással jár a nagy területek miatt. Továbbá a talajegészség megőrzésének szempontjából is kiemelt fontosságú a megfelelő szerszám kialakítás [11]. A talajnedvesség megtartásában is nagy szerepe van a szerszám munkájának. Továbbá a talajművelés során a talajból felszabaduló széndioxid-kibocsátásának mértéke is függ a szerszám geometriájától, és annak vontatási paramétereitől. Ezen okok miatt célszerű a talaj-szerszám kölcsönhatását vizsgálni és optimalizálni.

1.1. A kultivátorozás és annak szerszáma

A kultivátorozás a talajművelés egyik alapvető művelete [15], melynek szerszáma a kultivátorszerszám. A kultivátorozás egy talajforgatás nélküli talajművelés, melynek célja általában a talajlazítás, gyommentesítés, tarlóhántás, magágykészítés, valamint a talaj tápanyag-ellátottságának elősegítése, például a műtrágya talajba dolgoztatásával. A kultivátorozás során csökkennek a felszíni egyenetlenségek, valamint javul a talaj hő- és vízgazdálkodása is. A kultivátorok különböző típusai lehetővé teszik a különféle talajművelési igényekhez való alkalmazkodást, így a megfelelő eszköz kiválasztása alapvető a sikeres talajkezeléshez. A különböző kultivátor típusok a művelés célja alapján és a művelési mélység függvényében különböztethetők meg [3, 7]. Létezik szántóföldi kultivátor, nehéz kultivátor, közép- és mélylazító, mélylazító. Feladattól függően különböző kultivátorgeometriákat alkalmaznak. Például saraboló és gyomirtó szerszámokat, lazítószerszámokat, töltőgető és barázdahúzó szerszámokat. Ezen változatok láthatóak az 1. ábrán: az egyoldalas vagy L alakú, a kétoldalas vagy lúdtalp alakú, illetve a nyíl alakú kapák.



1. ábra. Kultivátorszerszámok: a) L alakú, b) nyíl alakú, c) lúdtalp alakú. Az ábrán lévő szögek jelentései: α : ráillesztési szög, β : lazítószög, γ : nyílásszög [15].

1.2. Talajművelő szerszámok tervezési és optimalizálási módszerei

A talajművelés optimalizálását a szerszám geometriájának és vontatási paramétereinek – mint a vontatási mélység, a vontatási sebesség és a szerszámkiosztás – meghatározása befolyásolja.

A talajművelő szerszámok geometriai optimalizálásával már a múlt században is foglalkoztak. Kezdetben a vonóerő becslésére fejlesztettek modelleket. Godwin és Spoor (1977) mechanikai modellt alkottak a talaj törési viselkedésének leírására, amely jól egyezett a kísérleti adatokkal [5]. McKyes és Maswauré (1997) terepi kísérletekkel vizsgálták a geometriai paraméterek hatását a vonóerőigényre és a talajlazítás hatékonyságára, megállapítva, hogy egy 30°-os dőlésszögű, keskeny eszköz nyújtja a legkedvezőbb eredményeket az összes vizsgált geometria közül [12].

A számítástechnika fejlődése lehetővé tette a talaj és a szerszám kölcsönhatásának vizsgálatát numerikus szimulációk alkalmazásával [10]. Ilyen módszerek például a véges elemes módszer (FEM) [6], a számítógépes áramlástani szimuláció (CFD) [8], valamint a diszkrét elemes módszer (DEM) [14]. A numerikus szimulációk a talaj-szerszám kölcsönhatások elemzésével együtt a szerszámok geometriájának optimalizálására is alkalmasak, mivel lehetővé teszik különböző geometriák tesztelését virtuális környezetben. Ehhez azonban olyan parametrikus 3D szerszámmodellek szükségesek, amelyekkel széles körű geometriai variációk hozhatók létre.

1.3. A procedurális 3D modellépítési módszer

A procedurális kifejezés a számítógépes grafikában azt jelenti, hogy a 3D modelleket, az anyagokat vagy textúrákat nem manuálisan hozzák létre, hanem algoritmusokkal és szabályrendszerekkel automatikusan generálják [2, 16]. A procedurális 3D modellezési technikával szabályrendszer szerinti formák és felületek alkothatók, melyek általában szélesebb geometriai tartományok között paraméterezhetők. Több procedurális modellezésre alkalmas felhasználóbarát célszoftverben a procedurális modellalkotás grafikus programozási felület segítségével hozható létre. A procedurális technikák két modellezési szinten értelmezhetők. Először létre kell hozni egy szabályrendszert, amely alapján egy általános modell felépül, második lépésben meg kell határozni a modellparamétereket egy konkrét modellegyed létrehozásához. Különböző modellparaméterek megadásával nagy mennyiségű hasonló felépítésű, de különböző geometriájú 3D modell hozható létre [13].

1.4. Célok

A szakirodalomban nem találtunk arra példát, hogy procedurális módszerekkel modelleztek volna kultivátorszerszám geometriát. Jelen kutatás célja, szabadfelületekkel határolt, parametrikus kultivátorszerszám geometriájának az elkészítése geometriaoptimalizáláshoz.

2. ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK

2.1. A Blender Geometry Nodes procedurális modellező eszköz bemutatása

A parametrikus kultivátorszerszám modellezési folyamat során a Blender Geometry Nodes (GN) eszköze által nyújtott procedurális modellezési technikát alkalmaztunk [9].

A Blender alapvető 3D modellező eszközei elsősorban kreatív és művészi 3D modellek, animációk készítésére optimalizáltak és különösen hasznosak komplex szabad felületek és organikus formák létrehozásához [1]. A Blender GN lehetőséget biztosít a 3D modellek grafikus programozással történő létrehozására [4]. A modellépítéshez a szoftver előre definiált függvényeket kínál, amelyeket úgynevezett node-ok (csomópontok) reprezentálnak. Egy node bemenetekkel, belső változókkal és kimenetekkel rendelkezhet. A különböző típusú node-ok logikus sorrendben történő összekapcsolásával procedurális módon generált 3D geometriák hozhatók létre. Ez a csomópont-alapú grafikus programozási felülettel rendelkező modellező rendszer nagy rugalmasságot biztosít 3D modellek felépítéséhez, miközben paraméterekkel kontrollálhatók az épített háló alapú – sokszor szabad felületekkel határolt – modell geometriája és méretei [9].

A Blenderben készített modell háló alapú, háromszögek alkotta geometriával rendelkezik, mely például .STL, vagy .OBJ formátumban exportálható. A Blender GN eszköze lehetőséget kínál a háló alapú modellek parametrikus és hierarchikus módon történő felépítéséhez.

A Blender előnye még, hogy Python-szkriptekkel programozható, console parancsokkal a háttérben futtatható, így könnyen összekapcsolható szimulációs környezetekkel. Például geometriaoptimalizálás során genetikus algoritmus segítségével meghatározhatók a 3D modell paraméterei, amelyet diszkrét elemes módszeren (DEM) alapuló szimulációval tesztelhetünk.

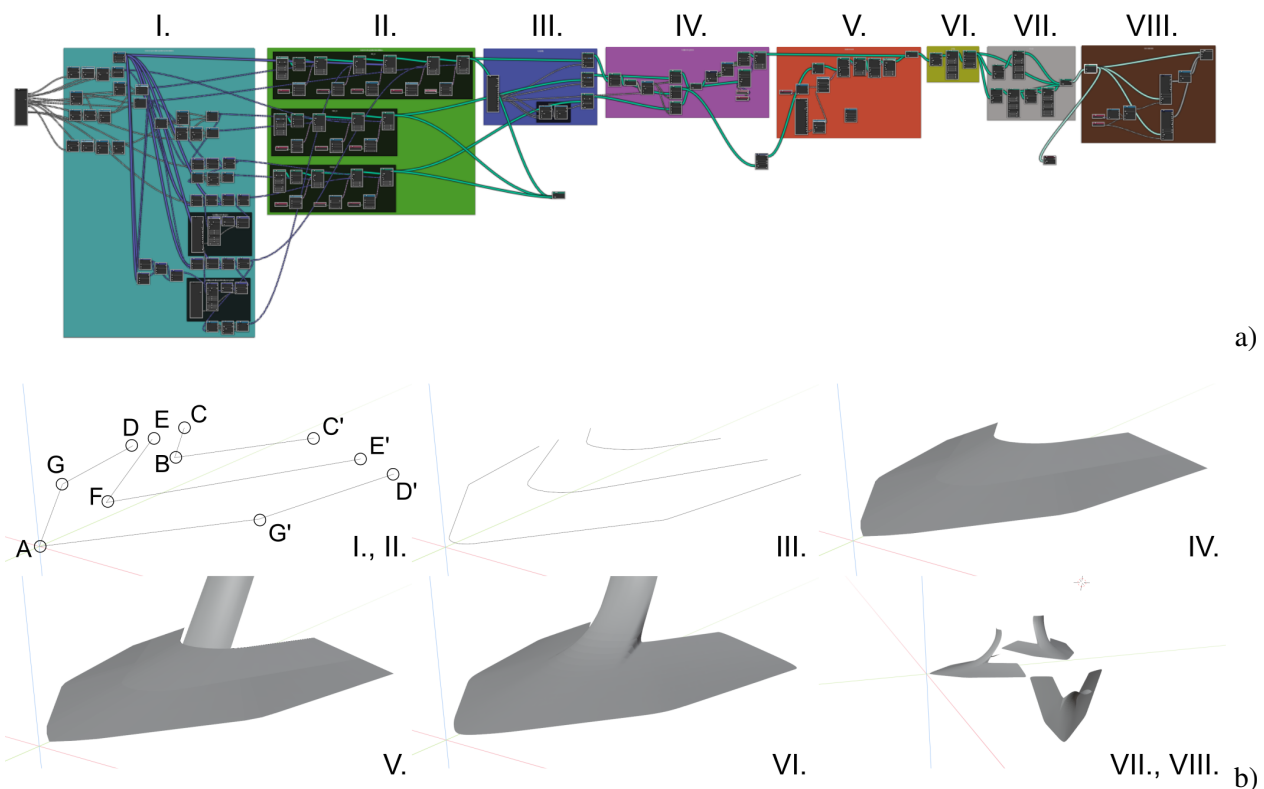
3. EREDMÉNYEK

3.1. A fejlesztett kultivátorszerszám procedurális modelljének felépítése

A szerszám geometriájának felépítését a 2. ábrán látható logika szerint készítettük el a Blender GN eszköz segítségével, az alábbi lépések mentén:

- I. Kezdetben pontokat definiáltunk a térben, amelyek meghatározzák a szerszám működési felületének alapvető határait.
- II. A pontokat éllel kötöttük össze, így három meridiángörbét alakítottunk ki, amelyek a szerszám fő geometriáját meghatározzák.
- III. A létrehozott éleket lekerekítettük.
- IV. Az élek közé felületet feszítettünk ki.
- V. Elkészítettük a szerszám szárának modelljét.
- VI. További simítást végeztünk a felületen.
- VII. Különböző nézeteket alakítottunk ki a szerszámról, ezzel megkönnyítve a geometria áttekinthetőségét a tervezési folyamatban.
- VIII. Végül lehetővé tettük a szerszám geometriai adatainak lekérdezését, például a szerszám felületének nagyságára vonatkozóan, amely fontos lehet a tervezési és optimalizálási folyamatokhoz.

A létrehozott szerszámgeometriát a Blender GN közel 140 csomópontja írja le. Ezek biztosítják a szerszámgeometria komplexitását és a modell rugalmasságát.



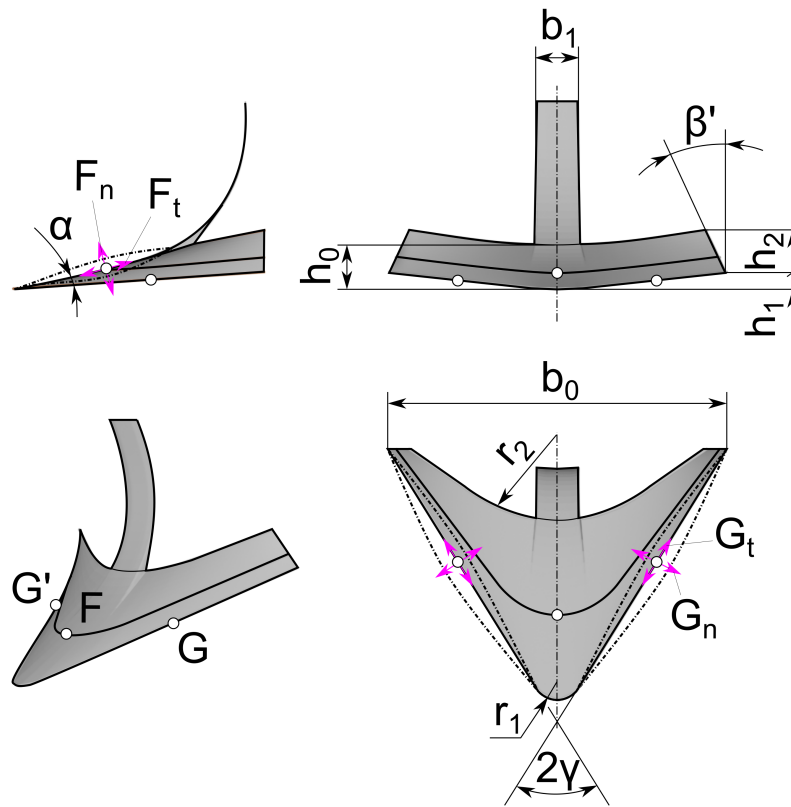
2. ábra. Az organikus felületek alkotta parametrikus kultivátorszerszám modelljének felépítésének logikája. a) A szerszámgeometriát leíró csomópontstruktúra képe a Blender szoftverben. b) A szerszámgeometria alakulásának lépései.

3.2. A fejlesztett kultivátorszerszám 3D modellje

A Blender GN eszköz segítségével fejlesztett 3D kultivátorszerszám-modell alapját a szakirodalomban ismert kultivátorszerszámok geometriai sajátosságai adják (1. ábra), amelyeket további új geometriai elemekkel bővítettünk. Az 3. ábrán látható az általunk fejlesztett 3D kultivátorszerszám geometriai modellje, mely 14 különböző paraméterrel definiálható. Ezek a paraméterek lehetővé teszik a szerszám geometriájának rugalmas szabályozását, amely így különböző talajtípusokhoz és művelési körülményekhez igazítható. A következő paraméterek határozzák meg a fejlesztett szerszámmodell geometriáját: ráillesztési szög (α), a lazítószög (β'), a nyílásszög (2γ), valamint a szerszám különböző szélességei és magasságai (b_0, b_1, h_0, h_1, h_2), továbbá a hajlított geometriai elemekért felelős pontok eltolásai (G_n, G_t, F_n, F_t).

Jelenleg a modell csupán egyetlen felülettel rendelkezik, amelynek nincs vastagsága. Ez a szimulációk során egyrészt hasznos, mert a kevesebb elemből álló szerszámgeometria tesztelése gyorsabb, másrészt ez egy geometriai egyszerűsítés, mely hat a szimulációs eredményekre, ami problémát jelenthet, hiszen a valós szerszámok anyagi vastagságot igényelnek. A 3D modell továbbfejlesztésével lehetne kezelni ezt a problémát, például a felületek vastagságának definiálásával.

A 3D modell fejlesztésében egy következő lépés lehet a szimulációk eredményeinek felhasználásával esetleg újabb "alaksajátosság" bevezetése. A modell egy korlátja még, hogy a kapaszár szélessége a modell felépítéséből eredően kissé függ a kapa más geometriai elemeinek méretétől, így az egyes esetekben az a megadott névleges értéktől való néhány mm-es eltérést mutathat. Ez biztosan hatással van a szimulációs eredményekre.



3. ábra. Blender alkalmazás segítségével épített parametrikus 3D kultivátorszerszám geometria. Az ábra tartalmazza a paramétereket, melyek pontosan meghatározzák a geometriát: α : ráillesztési szög, β' : lazítószöget jellemző szög, 2γ : nyílásszög, h_0 : szerszámmagasság, h_1 : szerszámtalp magasság, h_2 : szárnymagasság, b_0 : munkaszélesség, b_1 : kapaszárszélesség, r_1 : hegyrádiusz, r_2 : hátrádiusz, G_n : G pont normál irányú eltolása, G_t : G pont tangenciális irányú eltolása, F_n : F pont normál irányú eltolása, F_t : F pont tangenciális irányú eltolása.

4. KONKLÚZIÓ

Ebben a kutatásban szabadfelületekkel határolt kultivátorszerszám geometriáját modelleztük procedurális modellezési technikával. A 3D modell elkészítéséhez a Blender Geometry Nodes eszközt alkalmaztuk, mely alkalmasnak bizonyult a feladat megoldására. Az elkészített modellt 14 paraméter határozza meg, és geometriájának az alapját szakirodalomban ismert kultivátorszerszámok geometriai sajátosságai adják. Az így létrehozott modell alkalmas arra, hogy a kutatás következő szakaszában numerikus szimulációk segítségével geometriaoptimalizálást végezzünk.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezt a dolgozatot a Magyar Tudományos Kutatási Alap (NKFIH FK-146067) támogatta. A kutatás a Kulturális és Innovációs Minisztérium EKÖP-24-2-BME-329 és az EKÖP-24-3-BME-327 kódszámú Egyetemi Kutatói Ösztöndíj Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból Finanszírozott szakmai támogatásával készült.

HIVATKOZÁSOK

- [1] John M Blain. *The complete guide to Blender graphics: computer modeling & animation*. AK Peters/CRC Press, 2019.
- [2] David S Ebert és tsai. *Texturing and modeling: a procedural approach*. Elsevier, 2002.
- [3] Gerber Gábor Ferdinánd. *Talajművelés gépeinek megismerése, működésük*. Nemzeti Szakképzési és Felnőttképzési Intézet, 2008.
- [4] *Geometry Nodes - Blender 4.3 Manual* — docs.blender.org. https://docs.blender.org/manual/en/latest/modeling/geometry_nodes/index.html. [Accessed 09-03-2025].

- [5] RJ Godwin és G Spoor. „Soil failure with narrow tines”. *Journal of Agricultural Engineering Research* 22.3 (1977), 213–228. old.
- [6] Kerényi György. „Talaj vágásának modellezése végeselem módszerrel”. Disszertáció. Budapest: Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 1997.
- [7] Kocsis István. *Talajművelő gépek szerkezete, szerelése*. Nemzeti Szakképzési és Felnőttképzési Intézet, 2008.
- [8] Subrata Karmakar és R Lal Kushwaha. „Dynamic modeling of soil–tool interaction: an overview from a fluid flow perspective”. *Journal of Terramechanics* 43.4 (2006), 411–425. old.
- [9] Siemen Lens. *Procedural 3D Modeling Using Geometry Nodes in Blender: Discover the professional usage of geometry nodes and develop a creative approach to a node-based workflow*. Packt Publishing Ltd, 2023.
- [10] MN Lysych. „Review of numerical methods for modeling the interaction of soil environments with the tools of soil tillage machines”. *Journal of Physics: Conference Series*. 1399. köt. 4. IOP Publishing. 2019, 44014. old.
- [11] Birkás Márta. *Talajművelők zsebkönyve*. Mezőgazda Lap- és Könyvkiadó kft., 2010.
- [12] E McKyes és J Maswauré. „Effect of design parameters of flat tillage tools on loosening of a clay soil”. *Soil and Tillage Research* 43.3-4 (1997), 195–204. old.
- [13] Pascal Müller és tsai. „Procedural modeling of buildings”. *ACM SIGGRAPH 2006 Papers*. 2006, 614–623. old.
- [14] László Pásthly, Bence Szabó és Kornél Tamás. „Measuring and modelling of soil displacement from a horizontal penetrometer and a sweep using an IMU sensor fusion and DEM”. *Soil and Tillage Research* 244 (2024), 106207. old.
- [15] Szendrő Péter. *Mezőgazdasági gépszerkezettan*. Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, Budapest, 2000.
- [16] Ruben M Smelik és tsai. „A survey on procedural modelling for virtual worlds”. *Computer graphics forum*. 33. köt. 6. Wiley Online Library. 2014, 31–50. old.