

# Fuzzy-alapú értékelési modell az 1.2379 szerszámacél forgácsolhatóságának vizsgálatára

## Fuzzy-based evaluation model for testing the machinability of 1.2379 tool steel

Mészáros Béla\*, Mikó Balázs\*, Laufer Edit\*

\*Óbudai Egyetem, Budapest, Magyarország

[meszaros.bela@bgk.uni-obuda.hu](mailto:meszaros.bela@bgk.uni-obuda.hu), [laufer.edit@bgk.uni-obuda.hu](mailto:laufer.edit@bgk.uni-obuda.hu), [miko.balazs@bgk.uni-obuda.hu](mailto:miko.balazs@bgk.uni-obuda.hu)

**Összefoglalás** — A tanulmány egy Mamdani-típusú fuzzy következtető rendszer kidolgozását mutatja be az 1.2379 szerszámacél forgácsolhatóságának meghatározására. A modell célja, hogy rugalmasabban és valóságghűbben kezelje a forgácsolási folyamatokban megjelenő bizonytalanságokat és nemlineáris összefüggéseket, mint a hagyományos, egyszerű arányszámítási eljárások. A kutatás során három különböző fogszámú és spirálszögű marószerszámmal végeztünk forgácsolási vizsgálatokat, ahol a fogankénti előtolást négy szinten változtattuk (0,03; 0,05; 0,07; 0,09 mm/fog). A kísérletek során az átlagos felületi érdesség ( $R_a$ ) mérési, míg a szakítószilárdság ( $R_m$ ) értékei a szerszámacél katalógusadatai alapján kerültek be a fuzzy modellbe. A fuzzy rendszer két almodulból épül fel: az első az ötvözőelemek hatását egy Ötvöző Hatás Indexben (ÖHI) foglalja össze, míg a második az ÖHI, az  $R_a$  és az  $R_m$  értékek alapján számítja ki a Forgácsolhatósági Indexet (FOI). A módszer eredményeit összehasonlítottuk egy általunk összeállított, hagyományos lineáris számításokon alapuló értékelési modellel, amely a fuzzy rendszerhez képest kevésbé érzékeny, és diszkrét, éles határértékeken alapuló átmeneteket ad. A fuzzy alapú megközelítés ezzel szemben folyamatosabb, valóságghűbb viselkedést mutat, így hatékonyabb eszközt biztosít a forgácsolhatóság prediktív elemzéséhez és döntéstámogatásához.

**Kulcsszavak:** fuzzy logika, forgácsolhatóság, döntéstámogató rendszer, ötvözőelemek hatása

**Summary** — This study presents the development of a Mamdani-type fuzzy inference system for evaluating the machinability of 1.2379 tool steel. The aim of the model is to handle uncertainties and nonlinear relationships arising in machining processes in a more flexible and realistic manner than traditional, simple ratio-based evaluation methods. Machining experiments were carried out using three milling tools with different numbers of teeth and helix angles, while the feed per tooth was varied at four levels (0.03, 0.05, 0.07, and 0.09 mm/tooth). The experiments provided the arithmetic mean of measured surface roughness ( $R_a$ ), whereas the tensile strength ( $R_m$ ) values were incorporated into the fuzzy model based on catalog data. The fuzzy system consists of two submodules: the first aggregates the influence of the alloying elements into an Alloying Effect Index (AEI), while the second calculates the Machinability Index (MI) using the AEI,  $R_a$ , and  $R_m$  parameters. The results of the fuzzy-based evaluation were compared with an assessment model constructed by us based on traditional linear

calculations, which exhibits lower sensitivity and produces discrete, sharp transitions. In contrast, the fuzzy-based approach provides smoother and more realistic transitions, making it a more effective tool for the predictive analysis of machinability and for supporting decision-making.

**Keywords:** fuzzy logic; machinability; decision support system; effect of alloying elements

### 1 BEVEZETÉS

A modern gyártástechnológiák fejlődésével a megmunkálási folyamatok pontosabb megértése és optimalizálása kulcsfontosságúvá vált mind a termelékenység, mind a minőség javítása szempontjából. A korszerű ipari környezetben egyre nagyobb igény mutatkozik olyan előrejelző és döntéstámogató rendszerekre, amelyek képesek kezelni a megmunkálási folyamatok során fellépő számos befolyásoló tényezőt – például az anyagtulajdonságok változékonyságát, a szerszámkopást vagy a megmunkálási paraméterek kölcsönhatását. Az ilyen rendszerek hozzájárulnak a gyártási hibák csökkentéséhez, a költségek mérsékléséhez és a termékminőség stabilizálásához.

A korszerű megmunkálási technológiák fejlődésével egyre inkább előtérbe kerülnek azok a módszerek, amelyek képesek kezelni a bizonytalanságot és a komplex rendszerekben rejlő nemlineáris összefüggéseket. A fuzzy logika ezen megközelítések egyik prominens képviselője, különösen olyan prediktív és döntéstámogató rendszerek kialakításában, ahol éles határok helyett finom átmenetek szükségesek.

A korábbi szakirodalmak alátámasztják a fuzzy logika relevanciáját hasonló megmunkálási problémák kezelésében. Chandrasekaran és munkatársai fuzzy modellt fejlesztettek az alumínium-szilícium karbid (Al-SiCp) kompozitok marásánál kapott felületi érdesség előrejelzésére, amely jól demonstrálja a fuzzy megközelítés alkalmazhatóságát a komplex, nemlineáris rendszerek esetén [1]. Ehhez hasonlóan, Karim és munkatársai adaptív neuro-fuzzy rendszert alkalmaztak a forgácsolási folyamat során keletkezett felületi érdesség előrejelzésére [2]. Az anyagösszetétel hatását a forgácsolhatóságra szintén sikerrel vizsgálták fuzzy alapú modellek segítségével más kutatók, például Barzani és társai, akik alumínium alapú ötvözetek forgácsolási viselkedését vizsgálták [3].

Jelen tanulmány célja annak vizsgálata, hogy a fuzzy logika Mamdani-típusú megvalósítása mennyiben nyújt érzékenyebb és árnyaltabb értékelést a forgácsolhatóság predikciójában, mint a hagyományos statisztikai modellek. A kutatás során az anyag összetételéből származtatott ötvöző hatás indexet, a felületi érdességi adatokat és a szakítószilárdságot integráltuk a fuzzy rendszerbe. Az eredmény egy ötfokozatú forgácsolhatósági index, amely a szakértői tudásra épülő szabályrendszer révén kezeli a nemlineáris összefüggéseket. A vizsgálat hozzájárulhat a forgácsolási technológiák pontosabb tervezéséhez és optimalizálásához.

## 2 KÍSÉRLET LEÍRÁSA, FELHASZNÁLT ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK

A kutatás során az 1.2379-es szerszámacél megmunkálását vizsgáltuk. Elemeztük a vegyi összetételét, különösen a króm- és mangántartalom szerepére koncentrálna. Célunk egy ötvözőhatás-index meghatározása volt, amelyet ezt követően az átlagos felületi érdesség ( $Ra$ ) és a szakítószilárdság ( $Rm$ ) adataival kiegészítve egy ötfokozatú kategóriarendszerben értelmezhető forgácsolhatósági index kialakítására használtunk fel. A palástmarási vizsgálatban alkalmazott szerszámgeometriák kiválasztását az indokolta, hogy a spirálszög és a fogszám meghatározó módon befolyásolja a forgácsolási folyamat stabilitását, a hőfejlődést és a szerszámterhelést. A nagyobb spirálszög általában lágyabb vágást eredményez, ugyanakkor érzékenyebb lehet a rezgésre, míg a kisebb spirálszög nagyobb axiális komponenshez és erőteljesebb szerszámterheléshez vezethet. A vizsgálat célja ezért az volt, hogy különböző geometriákon (spirálhorony emelkedése, fogszám) keresztül vizsgáljuk a geometriai paraméterek hatását a felületminőségre, az erőhatásokra és az ötvözőelemek szerepére a forgácsolhatóság értékelésében.

A vizsgálat tárgyát képező forgácsolási kísérletet a Ø80 mm melegen hengerelt, előnemesített állapotú, HB 230-250 keménységű, 1.2379 (X153CrMoV12; ANSI D2 szerszámacél) minőségű (1,53% C, 0,35% Si, 0,4% Mn, 12% Cr és 0,85% V) acélon végeztük el. A megmunkálást Mazak Nexus 410A-II típusú CNC megmunkáló központon hajtottuk végre. A kísérlet során hosszú kinyúlású marószerszámokat alkalmaztunk, három különböző geometriával és fogszámmal:

F1 típusú szerszám:  $z = 4$  fog;  $d = 10$  mm; spirálszög:  $43^\circ$

(Fraisa P46210.450)

F3 típusú szerszám:  $z = 5$  fog;  $d = 10$  mm; spirálszög:  $45^\circ$

(Fraisa P8315.450)

F4 típusú szerszám:  $z = 7$  fog;  $d = 10$  mm; spirálszög:  $55^\circ$

(Fraisa P8311.450)

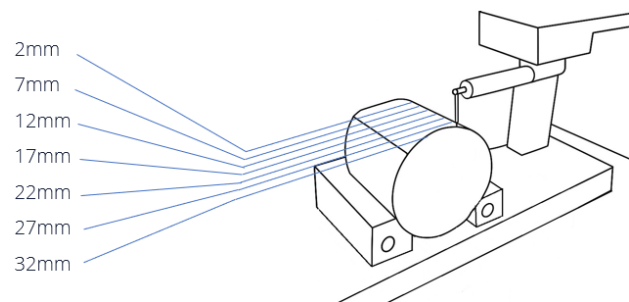
A vágósebesség ( $Vc$ ) paraméterek állandóak voltak a kísérlet során, hogy kizárólag az anyag és a szerszámváltozás hatását vizsgálhassuk a felületi minőségre. A fogankénti előtolás ( $fz$ ) négy szinten változott: 0,03; 0,05; 0,07 és 0,09 mm/fog, míg az axiális fogásmélység ( $ap$ ) minden esetben 35 mm, a radiális fogásmélység ( $ae$ ) pedig 0,2 mm volt. A beállított paraméterek nagyságát az 1. táblázat tartalmazza.

A választott  $ap = 35$  mm fogásmélység és az  $ae = 0,2$  mm radiális fogásvétel jól reprezentálja a szerszámacélok nagy pontosságú marási környezetét. Ezek a paraméterek lehetővé tették, hogy a forgácsolóerők és a keletkező hőmennyiség a folyamat stabilitását ne veszélyeztesse, ugyanakkor elegendő terhelést biztosítson az eltérő geometriájú szerszámok valós különbségeinek kimutatásához. A négy előtolási szint lefedi a gyakran alkalmazott ipari tartományt, így az eredmények a gyakorlat számára közvetlenül hasznosíthatók.

1. táblázat: Beállított paraméterek táblázata

Szerszám jelölés	$fz$ Fogankénti előtolás (mm)	$Vf$ Előtolósebesség (mm/min)
F1	0,03	190,8
F1	0,05	318
F1	0,07	445,2
F1	0,09	572,4
F3	0,03	238,5
F3	0,05	397,5
F3	0,07	556,5
F3	0,09	715,5
F4	0,03	333,9
F4	0,05	556,5
F4	0,07	779,1
F4	0,09	1001,7

A forgácsolási kísérlet elvégzése után a felület érdességének a mérését Mahr-Perten GD120 érdességmérő berendezésen hajtottuk végre. Az így kapott adatok szolgálták bemenő paraméterként. A mérés sematikus ábrája és a mért felületek bejelölt helye látható az 1. ábrán.



1. ábra. Érdességmérés pozíciói a megmunkált darabon (sematikus ábra)

A marószerszám jelentős fogásmélysége miatt a felületméréseket a szerszám tengelyirányában végeztük, több szinten. Ennek célja az volt, hogy a munkadarab teljes mélységi tartományában adatokat rögzítsünk, így a mérési eredmények átfogó képet adnak a megmunkált felület minőségéről. A méréseket 5 mm-es osztásokban végeztük el a megmunkált 35 mm-es mélység teljes tartományában, így minden kísérleti beállításra hét külön mérési pont állt rendelkezésre. Ez a felbontás lehetővé tette a felületminőség mélység szerinti változásának részletes vizsgálatát, valamint annak megállapítását, hogy a szerszámgeometria és az előtolás hogyan befolyásolja az érdességi profil stabilitását és ismételhetőségét.

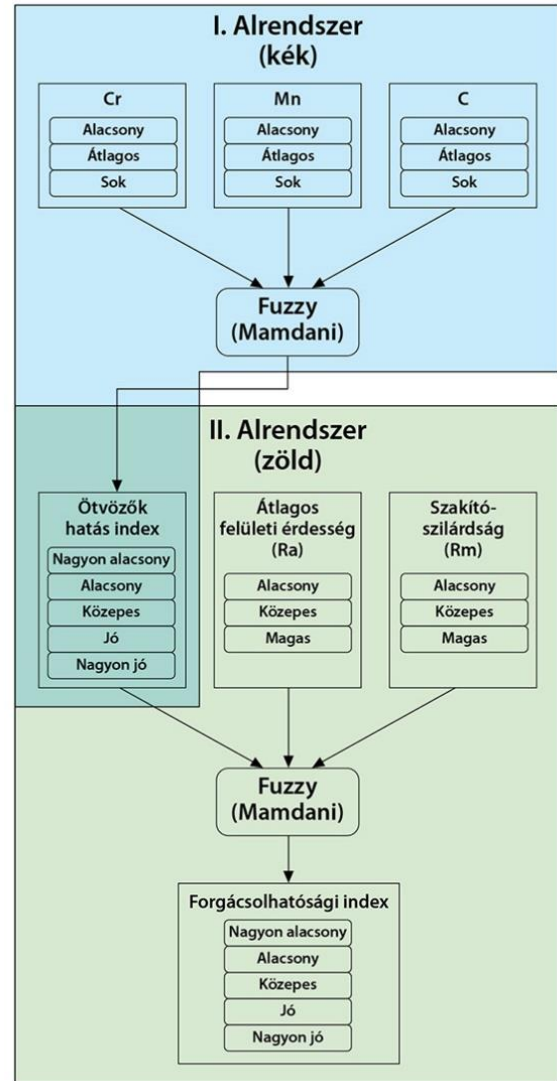
### 3 A JAVASOLT MODELL FELÉPÍTÉSE

Az ötvözők arányának hatásának értékelésre egy fuzzy alapú hierarchikus rendszert dolgoztunk ki, amely felépítésének köszönhetően könnyen bővíthető, továbbfejleszhető. A modell Mamdani-féle következtetési rendszert alkalmaz, amely végső kimeneteként egy ötfokozatú kategóriarendszerben értelmezhető forgácsolhatósági indexet állít elő az ötvözők hatás index, valamint a szakítószilárdság és a felületi érdesség figyelembevételével. A Mamdani-típusú fuzzy következtetési rendszer a legelterjedtebb klasszikus fuzzy logikai megközelítés, amelyet kifejezetten olyan mérnöki feladatokhoz fejlesztettek ki, ahol a döntések szakértői tudáson alapuló szabályokból származnak. Lényege, hogy a bemeneti változókhoz tartozó fuzzy halmazokat nyelvi szabályok („HA... AKKOR...”) kapcsolják össze, amelyben a szabályok egyesítése után áll elő a kimeneti fuzzy. A rendszer utolsó lépése ennek a komplex halmaznak a defuzzifikálása, amely egy olyan *crisp* értéket állít elő, ami a kimeneti halmazt a feladatnak megfelelően a lehető legjobban reprezentálja. A Mamdani-módszer ezért különösen alkalmas olyan komplex és nemlineáris rendszerek leírására, ahol az emberi szakértők tapasztalata jól átültethető szabálybázisba, és ahol a bemeneti változók között finom átmenetek és összefüggések figyelhetők meg [7]. A jelen tanulmányban alkalmazott Mamdani következtető rendszer trapéz alakú tagsági függvényeket alkalmaz mind a bemenetek, mind a kimenetek partícionálására, a kiértékelés során a minimum és a maximum operátort, majd a centroid típusú defuzzifikációt alkalmazza. A javasolt modell a kiértékelés eredményeként biztosítja a Forgácsolhatósági Index (FOI) folyamatos és valóságghű változását a bemenetek függvényében. A fuzzy modell az index előállításához emberi szakértői tudás alapján felépített szabálybázist használ.

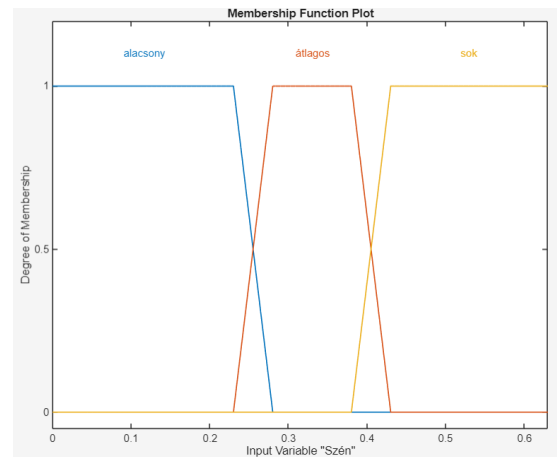
A javasolt modell két alrendszerből épül fel. Az I. alrendszer az alapanyag százalékos összetételének vizsgálatára szolgál (lásd 2. ábra, kék keret), ahol az egyes ötvözőelemek hatását (Ötvöző Hatás Index, ÖHI) értékeltük a forgácsolhatóság szempontjából. A II. alrendszer bemeneteként az I. alrendszer kimeneteként meghatározott ÖHI jelenik meg, amelyet kiegészít a kísérletek során mért átlagos felületi érdesség ( $R_a$ ). E paraméterek integrálásával a modell kimeneteként a FOI paraméter kerül meghatározásra, amely ötfokozatú skálán (nagyon alacsony, alacsony, közepes, magas, nagyon magas) jellemzi az adott forgácsolási folyamatot, lehetőséget biztosítva annak előrejelzésére és kiértékelésére.

A modellben, mindkét alrendszerben, minden bemeneti tényező esetében trapéz alakú tagsági függvényeket alkalmaztunk, csakúgy, mint a kimeneti fuzzy halmazok esetében. Ezek a tagsági függvények lehetővé teszik a bemeneti paraméterek értékeinek rugalmas értelmezését, és jól illeszkednek a gyakorlati, bizonytalan környezetek modellezéséhez.

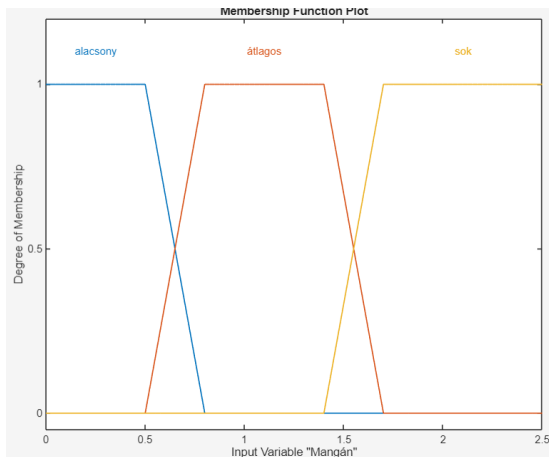
Az I. alrendszerben használt bemeneti tagsági függvényeket az 3–5. ábrák szemléltetik, amelyek részletesen bemutatják az egyes bemeneti tartományok fuzzy partícióit, a kimenetet pedig a 6. ábra illusztrálja.



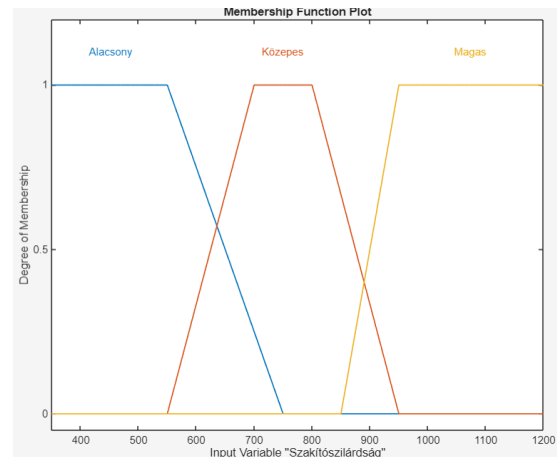
2. ábra. A javasolt modell felépítése



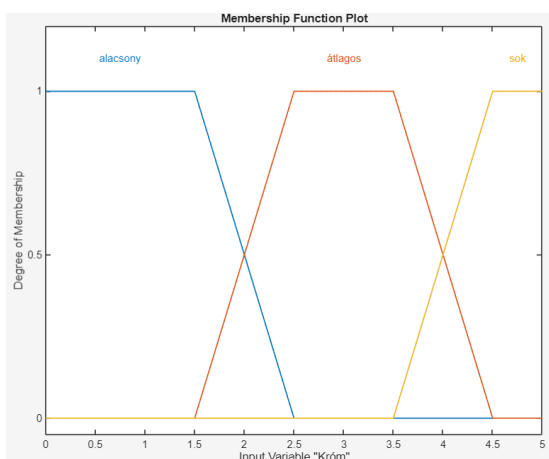
3. ábra: A szén bemeneti tagsági függvényei



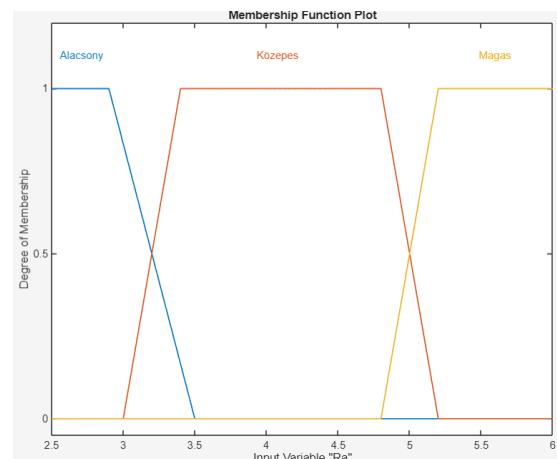
4. ábra. A mangán bemeneti tagsági függvényei



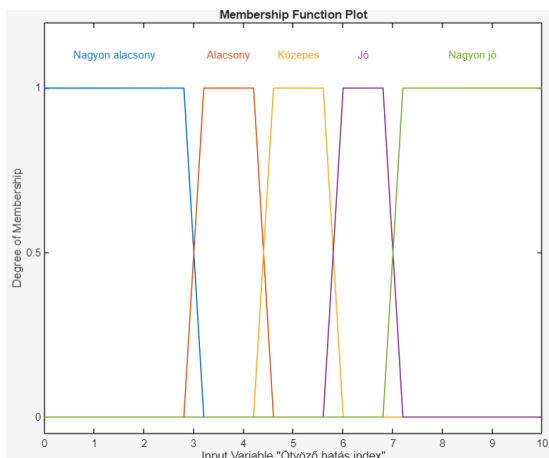
7. ábra. A Szakítészilárdság tagsági függvényei



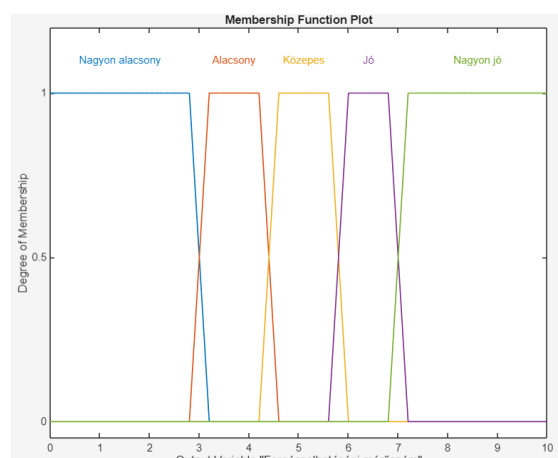
5. ábra. A króm bemeneti tagsági függvényei



8. ábra. Az átlagos felületi érdesség tagsági függvényei



6. ábra. Az ötvöző hatás index tagsági függvényei



9. ábra. A forgácsolhatósági mérőszám (FOI) tagsági függvényei

A II. alrendszerben használt bemeneti tagsági függvényeket az 7, 8. ábrák szemléltetik, amelyek részletesen bemutatják az egyes bemeneti tartományok fuzzy partícióit, illetve az I. alrendszer kimenetét (ÖHI), ebben az alrendszerben bemenetként használjuk, ugyanazokkal a tagsági függvényekkel, mint az I. alrendszerben (6. ábra). A kimenet öt kategóriáját és annak partícióját a 9. ábra mutatja be.

Jelen tanulmányban elsősorban az I. alrendszerre fókuszáltunk, ennek keretein belül az 1.2379-es acél kémiai összetételét vizsgáltuk. A vizsgálat jelen esetben a króm, mangán és szén elemek tömegszázalékos arányát veszi figyelembe, de a modell tovább bővíthető. Az összetétel adatok a Böhler gyártói katalógusból [4] származnak, így biztosítva az adatok ipari relevanciáját és hitelességét. Ezeket a komponenseket is fuzzy logikai rendszerben értelmeztük, ahol a nyelvi változókat (pl. *alacsony*, *átlagos*, *sok*) numerikus értékskálákra transzformáltuk, majd

szabályalapú rendszerrel végeztünk kimeneti előrejelzést a forgácsolhatóság minőségére. Ezt az alrendszert továbbá összevetettük egy általunk kidolgozott, egyszerű arányszámításon alapuló elemzési módszerrel, amely azt szemlélteti, hogy minél nagyobb az ötvözők mennyisége egy adott alapanyagban, annál kedvezőtlenebb forgácsolási viszonyok várhatók. Ennek megfelelően az index értékének az ötvözők százalékos növekedésével csökkennie, míg csökkenésükkel növekednie kell a mutatószámoknak – ezt a mutatót neveztük el ötvöző hatás indexnek. Mivel ez a megközelítés éles határokat képez az anyagtulajdonságok között, célunk az volt, hogy összevegyük a módszert a finom átmenetekkel dolgozó fuzzy modell eredményeivel, amely várhatóan nem produkál ilyen merev határfelületeket.

#### 4 EREDMÉNYEK ÉRTÉKELÉSE

Összehasonlításképpen, a kapott eredményeket egy klasszikus döntési táblázattal is feldolgoztuk. Ebben az esetben a bemeneti nyelvi értékeket (pl. alacsony, sok) numerikus értékekhez rendeltük (pl. alacsony = 1, sok = 3), majd ezen értékekből súlyozott átlagokat és egyszerű arányosításokat képeztünk, melyek alapján becsültük a forgácsolhatóságot. Ez a módszer bár könnyen kezelhető, nem tesz különbséget a változók közötti fokozatok finom árnyalatai között, így kevésbé alkalmas a nemlineáris vagy kölcsönösen függő rendszerek értelmezésére. A fuzzy logika ezzel szemben nemcsak kontinuumként értelmezi a bemeneti változókat, hanem szabályrendszerek segítségével képes olyan következtetések levonására, amelyek a valós folyamatokat hűen tükrözik. Ezen eredményekből néhány kiemelt sor a 2. táblázatban látható.

2. táblázat: A *crisp* számítás és a fuzzy által generált ÖHI számok

C(%)	Mn(%)	Cr(%)	C Súly	Mn Súly	Cr Súly	Lineáris index	Fuzzy kimenet (defuzzifikált érték)
0.1	0.1	1	3	3	3	10	8.52
0.1	0.1	2	3	3	2	8.33	7.87
0.1	0.1	4.5	3	3	1	6.67	3.7
0.35	1	2	2	2	2	5	7.34
0.5	2	4.5	1	1	1	0	1.48

Az I. alrendszerben az anyag kémiai összetételét alkotó ötvözők százalékos mennyiségéhez súlyokat rendelünk annak alapján, hogy az adott ötvöző milyen mértékben befolyásolja a forgácsolhatóságot. A módszer logikája szerint alacsony ötvözőtartalom esetén magas (3-as) súlyt kap az adott elem, mivel a kevésbé ötvözött acélok kedvezőbb forgácsolhatóságot mutatnak. Ezzel szemben magas ötvözőtartalom alacsony (1-es) súlyt eredményez, ami a várhatóan kedvezőtlenebb forgácsolási viszonyokat fejezi ki.

Az így kapott súlyozott jellemzőkből egy lineáris index számítható. A lineáris index kiszámítása az alábbi képlettel történik:

$$I_{lin} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot x_i}{\sum_{i=1}^n w_i}$$

ahol:

$x_i$  - az  $i$ -edik ötvöző százalékos értéke (C, Mn, Cr),

$w_i$  - az ötvözőhöz rendelt súly (1–3),

$n$  - az ötvözők száma (itt: 3),

$I_{lin}$  - a súlyozott lineáris ötvöző hatás index. (*crisp*)

A módszer természetéből fakadóan a lineáris index éles határfelületeket hoz létre: egy súlyérték megváltozása ugrásszerű változást eredményez az indexben. Ez jól látható a táblázatban, ahol például a króm tömegszázalékának növekedésével a hozzá rendelt súly 3→2→1 lépésekben csökken, és ezzel a lineáris index értéke is diszkrét, nem folyamatosan módosul.

A fuzzy rendszer ezzel szemben folytonos átmenetet biztosít az ötvözőtartalom és a forgácsolhatóság között. A defuzzifikált értékek nem mutatnak ugrásszerű váltásokat, hanem folytonosan követik a tendencia változását. Ez jól megfigyelhető például a 0,1% C – 0,1% Mn mellett változó krómtartalom esetén is: míg a lineáris index a súlyhatárok miatt 10.00 → 8.33 → 6.67 értékek között ugrik, addig a fuzzy rendszer a forgácsolhatóság romlását finomabb átmenettel adja vissza (8.52 → 7.87 → 3.70). A lineáris index tehát diszkrét lépcsőket hoz létre, míg a fuzzy kimenet folytonosan követi az anyagösszetétel változását.

A vizsgálat alapján megállapítható, hogy:

- A lineáris index előnye, hogy rendkívül egyszerű, könnyen számítható, jól értelmezhető, és alkalmas gyors becslésekhez.
- Hátránya, hogy az éles súlyhatárok miatt nem képes folytonos átmenetet biztosítani, ezért nem tükrözi teljes pontossággal az összetétel és a forgácsolhatóság közötti valós, graduális kapcsolatot.
- A fuzzy modell előnye, hogy a valóságot jobban közelíti: a bemenetek (ötvözőtartalmak) és a kimenet között folytonos, sima átmenetet biztosít, és képes finomhangolt különbségeket is megjeleníteni.
- Hátránya, hogy bonyolultabb modellfelépítést és több paramétert igényel.

Az egyes alrendszert leíró modellekről elmondható, hogy míg a lineáris index alkalmas gyors, egyszerű kvalifikációra, addig a fuzzy rendszer pontosabb, finomabb és realisztikusabb viselkedést ad az ötvözőtartalom forgácsolhatóságra gyakorolt hatásának becslésében.

A II. alrendszer részletes elemzésére a kutatás következő fázisában kerül majd sor, ebben a tanulmányban annak felépítését mutattuk be. Ez az alrendszer három bemeneti paraméterből épül fel: az ötvözők hatása indexből, ami az I. alrendszer kimenetét képezte, a szakítószilárdságból ( $R_m$ ), valamint az átlagos felületi érdességéből ( $R_a$ ). Ezen paraméterek integrált értékelése a fuzzy Mamdani-logika alkalmazásával eredményezi a forgácsolhatósági indexet. A FOI egy kvantitatív mérőszám, amely lehetővé teszi a forgácsolási folyamatok objektív kiértékelését: alacsony érték gyenge, míg magas érték kedvezőbb forgácsolhatóságot jelez. Bár a jelenlegi modell elsődlegesen az utólagos értékelést szolgálja, a FOI koncepciója előrejelzési célokra is alkalmas lehet, ami a későbbi kutatások egyik tervezett iránya.

## 5 KÖVETKEZTETÉSEK

A kutatás célja egy olyan fuzzy alapú értékelőrendszer kidolgozása volt, amely képes a forgácsolhatóságot az anyagösszetétel, a szakítószilárdság és a felületi érdesség integrált vizsgálatán keresztül jellemezni. Az I.2379 szerszámacél palástmarási kísérletei alapján fejlesztett Mamdani-típusú modell mindkét alrendszerben sikeresen alkalmazta a fuzzy következtetés előnyeit: a bemeneti paraméterek finom átmenetekkel történő értelmezését, a szakértői szabálybázis használatát, valamint a bizonytalanságot és nemlinearitást kezelő döntési logikát.

Az eredmények alapján megállapítható, hogy a hagyományos lineáris index számítás a vizsgált problémára csak korlátozottan alkalmazható, mivel éles határfelületeket hoz létre és nem képes folyamatos átmenetekkel követni a bemeneti paraméterek változását. Ezzel szemben a fuzzy rendszer kimenete jól tükrözi az ötvözőtartalom hatását: a forgácsolhatóság romlása vagy javulása nem ugrásszerű, hanem finoman változó tendenciaként jelenik meg. A második alrendszer eredményei rámutattak, hogy az Ötvöző Hatás Index (ÖHI), a felületi érdesség ( $Ra$ ) és a katalógusalapú szakítószilárdság ( $Rm$ ) érték együttes kezelése pontosabb és árnyaltabb forgácsolhatósági értékelést tesz lehetővé.

A javasolt modell eredményeként kapott Forgácsolhatósági Index (FOI) alkalmas a forgácsolási folyamatok utólagos kvalifikációjára, ugyanakkor a modell felépítése lehetőséget biztosít előrejelző funkciók kialakítására is. A rendszer jól skálázható, bővíthető további ötvözőelemekkel, megmunkálási paraméterekkel (például  $v_c$ ,  $a_p$ ,  $a_e$ ), illetve további érzékenységi vagy optimalizációs vizsgálatokkal. A tanulmány eredményei hozzájárulhatnak a forgácsolási paraméterek hatékonyabb megválasztásához, a gyártási folyamatok stabilizálásához és a döntéstámogató rendszerek fejlesztéséhez a modern, adatvezérelt megmunkálási környezetben.

A jövőbeni kutatások iránya a modell kiterjesztése szerszámkopásra, rezgésdiagnosztikára vagy gépi tanulással támogatott hibrid rendszerekre, amelyek tovább javíthatják a forgácsolhatóság előrejelzésének pontosságát és ipari alkalmazhatóságát. A szerszámkopás bevonása különösen indokolt, mert a szerszám éltompulása közvetlen hatással van a felületi érdességre, a forgácsolóerőkre és a folyamat stabilitására, így a fuzzy modell új dimenziót kaphatna az időfüggő változások kezelésében. A rezgésdiagnosztika integrálása lehetővé teszi a folyamat dinamikus állapotának valós idejű kiértékelését, így a modell a *chatter* (önrezgés) kialakulását is előre jelezheti. A gépi tanulási technikákkal (pl. neurális hálók, döntési fák, *random forest* vagy adaptív neuro-fuzzy rendszerek – ANFIS) kombinált hibrid megközelítések tovább növelik a predikció pontosságát, mivel képesek automatikusan felismerni a bemeneti paraméterek közötti rejtett mintázatokat és nemlineáris kapcsolatokat. Emellett a modell valós idejű adatgyűjtéssel és IoT (Internet of Things, dolgok internete)-alapú kommunikációval összekapcsolva akár online döntéstámogató eszközként is működhet, amely automatikusan javaslatot tesz az optimális forgácsolási paraméterekre vagy figyelmeztet a nemkívánatos folyamatállapotokra.

Anyagtudományi szempontból a modell bővítése további potenciállal bír. A jelen tanulmány csak az I.2379 szerszámacélt vizsgálta, azonban a fuzzy modell alkalmas a magasan ötvözött szuperötvözetek, nikkal alapú (pl.

Inconel), titánötvözetek, martenzites és ausztenites rozsdamentes acélok vagy porkohászati (PM) szerszámacélok forgácsolhatóságának értékelésére is. Ezek az anyagok különösen nehezen forgácsolhatók, nagy hőfejlődés és jelentős szerszámkopás jellemzi őket, ezért az ötvözők hatása, a hőmérsékletfüggő anyagtulajdonságok és a dinamikus instabilitások bevonása további elemzési lehetőségeket ad.

## IRODALOMJEGYZÉK

- [1] M. Chandrasekaran, D. Devarasiddappa (2012). Development of Predictive Model for Surface. World Academy of Science, Engineering and Technology 68.
- [2] Md. Rezaul Karim et. al. (2019) Predictive Modeling of Surface Roughness in MQL assisted Turning of SiC-Al Alloy Composites using Artificial Neural Network and Adaptive Neuro Fuzzy Inference System. Journal of Advanced Research in Manufacturing, Material Science & Metallurgical Engineering Volume 5, Issue 3 - 2018, pp. 12-28.
- [3] Mohsen Marani Barzani et. al. (2015) Fuzzy logic based model for predicting surface roughness of machined Al-Si-Cu-Fe die casting alloy using different additives-turning. Measurement 61 (2015) 150-161. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2014.10.003>
- [4] Böehler elektronikus katalógus: [https://www.boehler.hu/app/uploads/sites/248/productdb/api/k110\\_hu\\_hu.pdf](https://www.boehler.hu/app/uploads/sites/248/productdb/api/k110_hu_hu.pdf) (Letöltve: 2025.07.21.)
- [5] G. Rajkumar et.al. (2023) Parametric Optimization of Powder-Mixed EDM of AA2014/Si3N4/Mg/Cenosphere Hybrid Composites Using Fuzzy Logic: Analysis of Mechanical, Machining, Microstructural, and Morphological Characterizations. Journal of Composites Science. DOI: <https://doi.org/10.3390/jcs7090380>
- [6] W. Sitek et.al. (2023) Hardenability modelling and the performance of computational intelligence tools in research on structural alloy steels. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. DOI: 10.5604/01.3001.0054.3226.
- [7] M. Stefanoni, M. Takács, Á. Odry, P. Sarcevic (2025) A Comparison of Neural Networks and Fuzzy Inference Systems for the Identification of Magnetic Disturbances in Mobile Robot Localization, Acta Polytechnica Hungarica, vol: 22, no: 1, DOI: 10.12700/APH.22.1.2025.1.13