

Geometriai pontosság előrejelzése esztergálás esetén: ANFIS és lineáris regresszió összehasonlító modellezése

Predicting Geometric Accuracy in Turning: Comparative Modelling Using ANFIS and Linear Regression

Ráczki Viktor Gergely *, Mikó Balázs **, Laufer Edit ***

* Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskola, Budapest, Magyarország, raczi.viktor@bgk.uni-obuda.hu

** Óbudai Egyetem – Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Gépészeti és Technológiai Intézet, Gyártástechnológiai Intézeti Tanszék. Budapest, Magyarország, miko.balazs@bgk.uni-obuda.hu

*** Óbudai Egyetem – Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Mechatronikai és Járműtechnikai Intézet, Budapest, Magyarország, laufer.edit@bgk.uni-obuda.hu

Összefoglalás — A nagy pontosságú megmunkálási folyamatokban a geometriai eltérések megbízható előrejelzése kulcsfontosságú a technológiai paraméterek optimális megválasztásához és a gyártási költségek csökkentéséhez. Jelen kutatás célja a zsákfuratok simító esztergálásakor fellépő geometriai eltérések prediktív modellezésére irányult. A teljes faktoriális kísérletterv adatain alapuló vizsgálatban az adaptív neuro-fuzzy következtető rendszer (ANFIS) és a lineáris regresszió teljesítményét hasonlítottuk össze a forgácsolósebesség, az előtolás és a vizsgálati mélységek függvényében. Az eredmények igazolják az ANFIS fölényét, mivel az átmérőhiba és a köralakhiba esetén is kisebb becslési hibát és magasabb determinációs együtthatót (R^2) produkált. A hibrid modell hatékonyan kezeli a nemlineáris összefüggéseket, támogatva ezzel a gyártásoptimalizálást.

Kulcsszavak: ANFIS, esztergálás, geometriai pontosság, teljes faktoriális kísérletterv, prediktív modellezés

Abstract — Reliable prediction of geometrical deviations in high-precision machining is essential for optimizing technological parameters and reducing manufacturing costs. This study focuses on predictive modeling of deviations occurring during the finish turning of blind holes. Based on data obtained from a full factorial experimental design, the performance of ANFIS and linear regression models was compared as a function of cutting speed, feed rate, and measurement depth. The results confirm the superiority of ANFIS, yielding lower prediction errors and higher coefficients of determination (R^2) for both diameter and roundness errors. The hybrid model effectively captures nonlinear relationships, thereby supporting process optimization.

Keywords: ANFIS, turning, geometrical accuracy, full factorial experimental design, predictive modeling

1 BEVEZETÉS

A gyártástechnológiai folyamatok folyamatos fejlődésével párhuzamosan a megmunkált alkatrészekkel szemben támasztott minőségi és pontossági követelmények folyamatosan szigorodnak. Az ipari gyakorlatban kiemelt jelentőséggel bír a méretpontosság, a geometriai térések betartása, valamint a funkcionális illesztéseket meghatározó geometriai jellemzők reprodukálhatósága. Ezek az elvárások napjainkban szorosan kapcsolódnak az Ipar 4.0 koncepciójához, amelyben a nulla hiba (Zero-Defect Manufacturing – ZDM) elvű gyártás megvalósítása alapvető célkitűzéssé vált. A ZDM egyik kulcseleme a prediktív modellezés, amely lehetővé teszi a gyártási hibák előrejelzését és megelőzését már a megmunkálási folyamat megkezdése előtt, ezáltal hozzájárulva a költséghatékony és fenntartható termeléshez.

A hengeres belső felületek kialakítására alkalmazott esztergálás az egyik legelterjedtebb forgácsolási eljárás, amelynek eredményességét alapvetően a forgácsolósebesség, az előtolás és a fogásmélység határozza meg. E technológiai paraméterek nem megfelelő megválasztása jelentős mértékben rontja a megmunkált felület geometriai pontosságát, ami a mikrométeres tűréstartományban működő ipari alkalmazások esetében kritikus problémát jelenthet. A jelenség különösen hangsúlyos zsákfuratok simító megmunkálásakor, ahol a szerszámelhajlás, a kedvezőtlen forgácseltávolítási viszonyok és a hűtő-kenő közeg korlátozott hozzáférhetősége együttesen befolyásolják a kialakuló geometriai eltéréseket [1][2].

A forgácsolási folyamatok során fellépő fizikai jelenségek összetettsége miatt a bemeneti technológiai paraméterek és a kimeneti minőségi jellemzők közötti kapcsolat jellemzően nemlineáris és többváltozós. Ennek következtében a hagyományos, determinisztikus matematikai modellek sok esetben korlátozott pontossággal képesek leírni a folyamat viselkedését. E kihívás kezelésére az utóbbi években egyre nagyobb figyelem irányul a mesterséges intelligencián alapuló

modellezési megközelítésekre. Ezek közül kiemelkedik az adaptív neuro-fuzzy következtető rendszer (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System, ANFIS), amely a neurális hálózatok tanulási képességét ötvözi a fuzzy logika bizonytalanságkezelési és szabályalapú következtetési mechanizmusával. Az ANFIS előnye, hogy képes komplex, nemlineáris összefüggések feltárására, miközben a modell interpretálhatósága is megmarad [1-4].

A szakirodalomban számos kutatás igazolja az ANFIS és a fuzzy logikára épülő modellek hatékonyságát forgácsolási folyamatok esetén. Tóth-Laufer, E. és Horváth, R. [1][3] munkái rámutattak arra, hogy a fuzzy modellek képesek a forgácsolási paraméterek közötti bizonytalan és nem élesen elkülönülő hatások kezelésére, valamint alkalmasak az optimális paramétertartományok meghatározására korlátozott mennyiségű kísérleti adat alapján. Shivakoti és szerzőtársai [5][6] esztergálási vizsgálatai során kimutatták, hogy az ANFIS modell nagy pontossággal képes előre jelezni a felületi érdességet és az anyagleválasztási sebességet (*MRR*), miközben hatékonyan kezeli a technológiai paraméterek közötti nemlineáris kölcsönhatásokat. Hasonló eredményekre jutottak más kutatók is [7-9], akik különböző acélminőségek megmunkálása során igazolták az ANFIS magas predikciós pontosságát.

Összehasonlító vizsgálatok ugyanakkor arra is rámutattak, hogy az intelligens modellek teljesítménye jelentős mértékben függ a modellstruktúrától és a tanító adatok minőségétől. Sada és Ikpeseni [2] például az ANFIS és a mesterséges neurális hálózatok összevetése során kimutatták, hogy bizonyos esetekben az ANN kisebb hibával képes előre jelezni a megmunkálási jellemzőket. Ez aláhúzza annak fontosságát, hogy a különböző modellezési megközelítések összehasonlító értékelése elengedhetetlen a megfelelő módszer kiválasztásához.

Az ANFIS alkalmazhatósága nem korlátozódik a hagyományos forgácsolási eljárásokra. Számos tanulmány igazolja, hogy a módszer sikeresen alkalmazható nem hagyományos megmunkálási technológiák, például abrázív vízsugaras megmunkálás esetén is [10], ahol szintén komplex, nemlineáris összefüggések jellemzik a folyamatot. Emellett az ANFIS különböző optimalizációs algoritmusokkal kombinálva – például genetikus algoritmusokkal vagy részecskekeraj-optimalizációval – tovább növelheti a predikciós pontosságot és a modell robusztusságát [4].

Mindazonáltal a meglévő kutatások döntő többsége elsősorban a felületi érdesség, az anyagleválasztási sebesség vagy a szerszámkopás vizsgálatára fókuszál. Ezzel szemben a geometriai pontossági jellemzők, különösen az átméreltérés (*AD*) és a körköröségi hiba (*RONt*) prediktív modellezése lényegesen kisebb figyelmet kapott. Rácz V. és Mikó, B. [11] vizsgálatai rámutattak arra, hogy a furatmegmunkálás során a geometriai eltérések a vizsgálati mélység mentén nem konstans módon változnak, ami a folyamat komplexitását tovább növeli, és indokolttá teszi a mélységfüggő modellezési megközelítések alkalmazását. Ennek ellenére az ilyen jellegű modellek kidolgozása a szakirodalomban még korlátozott.

A fentiek alapján megállapítható, hogy szükség van olyan prediktív modellek fejlesztésére, amelyek képesek a forgácsolási paraméterek és a geometriai pontossági jellemzők közötti komplex, nemlineáris összefüggések

megbízható leírására, különös tekintettel a megmunkálási mélység hatására.

Jelen kutatás célja a zsákfuratok simító esztergálása során kialakuló geometriai pontossági jellemzők (az elméleti átméreltől való eltérés (*AD*) és a körköröségi hiba (*RONt*)) prediktív modellezése. A vizsgálat a teljes faktoriális kísérlettervből származó mérési adatok felhasználásával két különböző megközelítést alkalmaz és hasonlít össze, egy lineáris regressziós (MLR) modellt és egy Adaptív Neuro-Fuzzy Következtető Rendszert (ANFIS) modellt. A kutatás célja annak meghatározása, hogy a vizsgált módszerek közül melyik képes nagyobb pontossággal leírni a technológiai paraméterek és a geometriai pontosság közötti nemlineáris kapcsolatokat, ezáltal hozzájárulva a nagy pontosságú forgácsolási folyamatok hatékonyabb tervezéséhez.

2 KÍSÉRLETI KÖRÜLMÉNYEK ÉS KIÉRTÉKELÉSI MÓDSZEREK

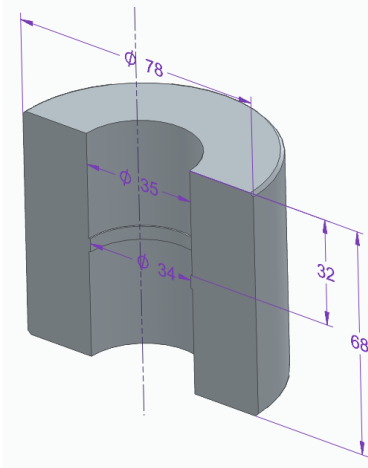
A forgácsolási kísérletek során a zsákfuratok simító megmunkálását esztergálási eljárás alkalmazásával készítettük el. A megmunkáláshoz egy A20S-SDQCL11 típusú fűrőrúdat, valamint egy DCMT11T304-MP4-WPP20G jelű esztergalapkát alkalmaztunk. A vizsgálatokat egy Mazak SQT 10 MS típusú CNC megmunkálóközponton hajtottuk végre, biztosítva a stabil és reprodukálható megmunkálási körülményeket. A forgácsolási kísérletek során árasztásos hűtés mellett, MOL Emolin 420 típusú, 6%-os koncentrációjú emulzió alkalmaztunk.

A forgácsolási kísérleteket EN 1.0503 (C45) jelű nemesíthető szénacélban végeztük el. Az anyag kémiai összetételét és főbb tulajdonságát az 1. táblázat foglalja össze. A C45 acélt kedvező mechanikai tulajdonságai, valamint jó forgácsolhatósága miatt széles körben alkalmazott alapanyag gépészeti és szerkezeti alkatrészek gyártásában, emellett gyakran szolgál referenciaanyagként forgácsolási vizsgálatok során.

1. táblázat: 1.0503 anyag kémiai összetétele és főbb mechanikai tulajdonságai

EN	1.0503
DIN	C45
C	0.43 – 0.50
Si	≤ 0,4
Mn	0,5 – 0,8
P	≤ 0,045
S	≤ 0,045
Cr	≤ 0,4
Mo	≤ 0,1
Ni	≤ 0,4
Mechanikai tulajdonságok	
Rm (MPa)	≥ 560
HB keménység (Lágyított)	207
HB keménység (Mért)	185±7,2
HRA keménység (Mért)	56.3±0,85

A kísérletek során $\varnothing 80 \times 68$ mm méretű munkadarabokat alkalmaztunk, amelyek előfűrt, $\varnothing 34$ mm átmérőjű furatát $\varnothing 35$ mm átmérőjű zsákfurattá munkáltunk meg 32 mm megmunkálási mélységig (1. ábra). A vizsgálatok során a fogásmélységet (a) állandó, 0,5 mm értéken tartottuk.



1. ábra. Kísérletnél alkalmazott munkadarab

A forgácsolási kísérleteket teljes faktoriális kísérletterv alkalmazásával terveztük meg. A teljes faktoriális kísérletterv lehetővé teszi a vizsgált tényezők és azok kölcsönhatásainak átfogó elemzését, mivel a paraméterek minden lehetséges kombinációját figyelembe veszi, ezáltal részletes képet ad a folyamat viselkedéséről [12]. Ugyanakkor a módszer alkalmazása a tényezők és szintek számának növekedésével a kísérletek számának jelentős növekedésével jár, ami indokoltá teszi a vizsgálati tartomány tudatos megválasztását. A vizsgálat során három szinten változtattuk a forgácsolósebesség (v_c) és az előtolás (f) értékét. Az alkalmazott technológiai paraméterek értékeit a 2. táblázat tartalmazza.

2. táblázat: A kísérleteknél alkalmazott technológiai paraméterek

No.	Forgácsolósebesség (v_c) [m/min]	Előtolás (f) [mm]
1	180	0,1
2	180	0,05
3	180	0,15
4	220	0,05
5	220	0,1
6	220	0,15
7	200	0,15
8	200	0,1
9	200	0,05

2.1 Koordinátamérési vizsgálatok

A forgácsolási kísérleteket követően a zsákfuratok kör alakhibáit ($RONt$), valamint az elméleti geometriától való méreteltérést (ΔD) Mahr MMQ-500 formamérőgép segítségével határoztuk meg. A mérőgép pontosságát alátámasztják a gyártói specifikációi, amelyek szerint a kör alakeltérés meghatározásának pontossága $0,01 + 0,00025 \mu\text{m}/\text{mm}$ nagyságrendű. A nagy felbontású szöghelyzet-meghatározás (32 768 000 lépés/fordulat) lehetővé teszi a geometriai eltérések részletes és megbízható kiértékelését, ami különösen fontos a mikrométeres nagyságrendű alakhibák vizsgálata során.

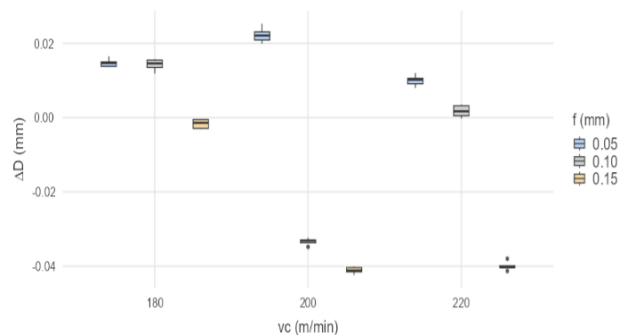
A vizsgált geometriai eltéréseket öt különböző mélységben (h : 4,5; 9,5; 14,5; 19,5; 24,5 mm) értékeltük ki, szintenként 3604 mérési pontból, összesen 18020 pont felhasználásával.

Az esztergálás során kapott mérési adatokat (ΔD , $RONt$) a formamérőgép saját szoftverén túlmenően Jamovi 2.3.28 statisztikai szoftver, valamint ANFIS segítségével dolgoztuk fel. A geometriai jellemzők meghatározásához a legkisebb négyzetek módszerén alapuló körillesztést (Least Squares Circle Fit, Gaussian Best-Fit) alkalmaztuk, amely a mért pontok és az illesztett kör középpontjához tartozó sugarak eltéréseinek négyzetösszegét minimalizálja.

3 A MÉRT ÉRTÉKEK BEMUTATÁSA ÉS ELEMZÉSE

Jelen tanulmány célja a modellezési eljárások megbízhatóságának vizsgálata volt, amelynek érdekében összehasonlítottuk a hagyományos lineáris regressziós modellt (Multiple Linear Regression, MLR) és az ANFIS-t. A mért eredmények alapján, Jamovival első lépésként a mérési eredmények statisztikai jellemzőit elemeztük. A mért ΔD értékek eloszlását és szórását a 2. ábra szemlélteti, ahol megfigyelhető, hogy a geometriai eltérés nagysága és iránya jelentős mértékben függ mind a forgácsolósebességtől (v_c), mind az előtolástól (f). Alacsonyabb előtolási értékek ($f = 0,05$ mm) esetén a ΔD jellemzően pozitív tartományban helyezkedik el, ami az elméleti átmérőnél kisebb furat kialakulására utal, míg az előtolás növelésével az eltérés fokozatosan negatív irányba tolódik el. Különösen $v_c = 200\text{--}220$ m/min tartományban figyelhető meg markáns negatív eltérés ($f = 0,15$ mm esetén), amely a tényleges átmérő növelését jelzi, feltehetően a megnövekedett forgácsolóerők és szerszámelhajlás következtében. A szórás mértéke viszonylag alacsony, ami a mérési eredmények jó reprodukálhatóságára utal, ugyanakkor az egyes paraméterkombinációk között jelentős eltolódás figyelhető meg. Az eredmények egyértelműen rámutatnak a forgácsolási paraméterek közötti kölcsönhatások jelentőségére, ami indokolja nemlineáris modellezési megközelítések, például az ANFIS alkalmazását.

Második lépésben meghatároztuk a bemeneti tényezők és a geometriai jellemzők közötti kapcsolatot leíró lineáris regressziós modelleket, amelyet az (1)-es képlet szemléltet.



2. ábra. ΔD értékek eloszlása a forgácsolósebesség és az előtolás függvényében

$$\Delta D [\text{mm}] = 1,676987 - 0,016887 * v_c + 1,245667 * f + 0,00004316 * v_c^2 - 0,00839 * v_c * f. \quad (1)$$

Ezt követően, ANFIS rendszer alkalmazásával meghatároztuk a vizsgálat során beállított bemeneti

paraméterek és a kapott kimenetek közötti kapcsolatot. Az ANFIS egy olyan hibrid modellezési megközelítés, amely a fuzzy következtetési rendszert neurális hálózattal kombinálja, ezáltal egy hibrid matematikai eszközt hoz létre. A neurális hálózat a rendszer rugalmasságát növeli, míg a fuzzy logika a bizonytalanságok kezelését teszi lehetővé [5]. A hibrid rendszert alkalmazva a megadott bemeneti adatokból fuzzy szabályokat generáltunk, és modellt fejlesztettünk a kimeneti (ΔD , RON_t) értékek előrejelzésére.

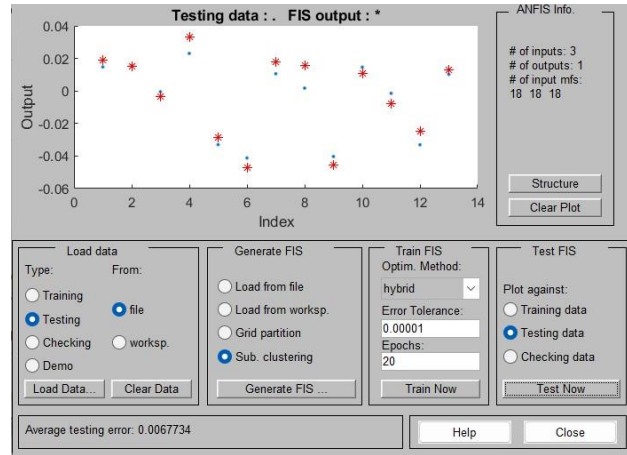
A fuzzy következtetési rendszer (FIS) felépítéséhez a rendelkezésre álló kísérleti adatok 70%-át használtuk fel tanító halmazként, míg a fennmaradó 30% a modell validálását (tesztelésére) szolgálta. A tanulási folyamat során az ANFIS modell 20 közelítésen (epochon) keresztül hibrid optimalizálási eljárást alkalmazva hangolta a fuzzy tagsági függvényeket, 0,00001 hibatolerancia mellett. A ΔD modell esetében összesen 18 fuzzy szabály került kialakításra, és a tanulási folyamat a 2. közelítésben fejeződött be, $3,325 \cdot 10^{-8}$ –os tanulási hibával. A tanulás befejezése után tesztelést végeztünk (3. ábra), ahol az átlagos tesztelési hiba 0,0067734 volt.

A modellalkotás során elsőrendű Sugeno-típusú fuzzy rendszert alkalmaztunk, amelyben a bemeneti változókat Gauss-alakú tagsági függvényekkel írtunk le, míg a szabálykimenetek lineáris függvényeként álltak elő.

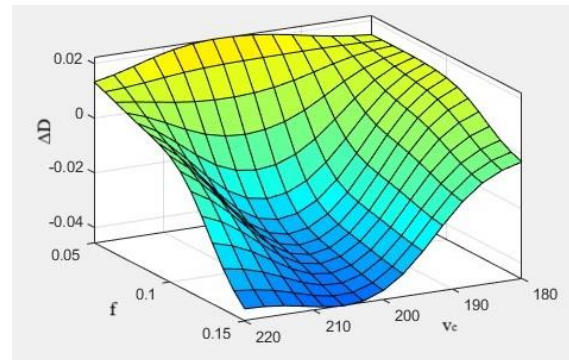
Az ANFIS modell viselkedésének és a bemeneti paraméterek hatásának szemléltetésére háromdimenziós válaszfelületi diagramokat alkalmaztunk [8], amiket a 4. ábra, 5. ábra és a 6. ábra szemléltet. A generált válaszfelületek nem csupán a modellek illeszkedését szemléltetik, hanem lehetőséget biztosítanak a forgácsolási paraméterek közötti kölcsönhatások és a folyamat nemlineáris jellegének részletes vizsgálatára is.

A 4. ábra a forgácsolósebesség (v_c) és az előtolás (f) együttes hatását szemlélteti az átmérőeltérés (ΔD) alakulására. Az ábra alapján alacsony előtolási értékek mellett a ΔD jellemzően pozitív tartományban helyezkedik el, ami az elméleti átmérőnél kisebb furat kialakulását jelenti. Az előtolás növelésével az eltérés fokozatosan negatív irányba tolódik el, ami a tényleges átmérő növekedését jelzi az elméleti értékhez képest. Különösen nagy előtolás ($f \approx 0,15$ mm) és magas forgácsolósebesség ($v_c \approx 200$ – 220 m/min) esetén jelentős negatív eltérés jelentkezik, amely a furat túlmunkálására vezethető vissza. A felület alakja egyértelműen nemlineáris kapcsolatot jelez, különösen a magasabb forgácsolási paraméterek tartományában.

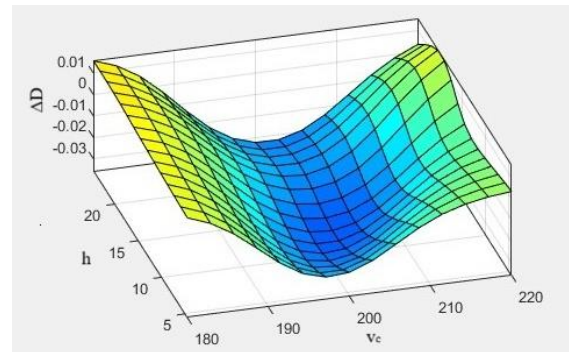
Az 5. és 6. ábrák a furatmélység (h) és a forgácsolósebesség (v_c), illetve az előtolás (f) együttes hatását szemléltetik a ΔD alakulására. A vizsgálati mélység hatása nemlineáris jellegű: közepes mélységtartományban ($h \approx 10$ – 15 mm) kismértékű negatív eltérés tapasztalható, míg kisebb és nagyobb mélységek esetén az eltérés mérséklődik. Az előtolás növekedése egyértelműen a ΔD negatív irányú eltolódását eredményezi, ami a furat átmérőjének növekedését jelzi, míg a forgácsolósebesség ezt a hatást tovább erősíti 200 m/min érték esetén. A jelenség a szerszám–munkadarab rendszer változó merevségével és a forgácsolási körülmények mélységfüggő alakulásával magyarázható.



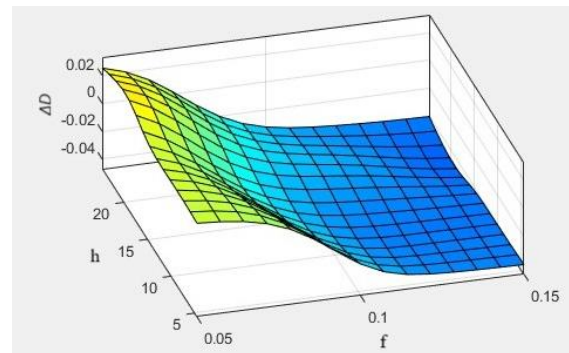
3. ábra. Az ANFIS modell predikciós pontosságának vizsgálata tesztadatokon



4. ábra. ΔD változása v_c és f esetén, ANFIS modell alkalmazásával



5. ábra. ΔD változása v_c és h esetén, ANFIS modell alkalmazásával



6. ábra. ΔD változása f és h esetén, ANFIS modell alkalmazásával

A bemutatott válaszfelületek együttesen azt mutatják, hogy az átmérőeltérés alakulása komplex, nemlineáris

módon függ a vizsgált technológiai paramétereiktől és azok kölcsönhatásaitól. A kapott tendenciák összhangban vannak a mért adatok statisztikai elemzésével (2. ábra), ahol hasonló módon kimutatható volt az előtolás növekedésével járó negatív irányú eltolódás a ΔD értékekben. Ez az egyezés megerősíti, hogy az ANFIS modell képes a forgácsolási paraméterek és a geometriai eltérések közötti valós fizikai összefüggések megbízható leképezésére, és alkalmas a folyamat nemlineáris viselkedésének leírására.

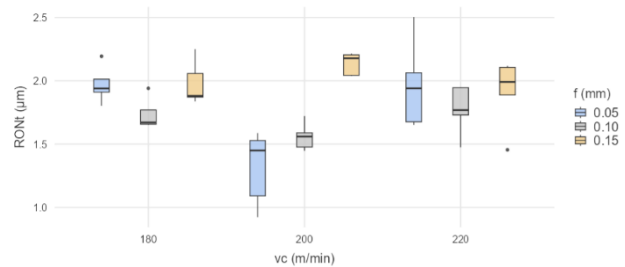
A 3. táblázat alapján megállapítható, hogy a lineáris regresszióval szemben az ANFIS-modell kisebb becslési hibát és magasabb determinációs együtthatót eredményezett. Az RMSE (Root Mean Square Error, gyökös átlagos négyzetes hiba) érték az ANFIS esetében 64%-kal alacsonyabb volt, ami azt jelzi, hogy a hibrid modell pontosabban követte a mért adatok nemlineáris változásait. A determinációs együttható (R^2) növekedése és a becslési hiba csökkenése tovább erősíti, hogy az ANFIS rendszer alkalmasabb a vizsgált forgácsolási folyamat prediktív modellezésére, mint a hagyományos lineáris megközelítés.

3. táblázat: Az átmérő eltérés (ΔD) előre jelzett MLR és ANFIS értékei.

No.	v_c m/min	f mm	h mm	Mért ΔD mm	MLR ΔD mm	Anfis ΔD mm
1	180	0,1	4,5	0,0146	0,0093	0,0107
1	180	0,1	9,5	0,0119	0,0093	0,0119
1	180	0,1	14,5	0,0135	0,0093	0,0135
1	180	0,1	19,5	0,0155	0,0093	0,0153
1	180	0,1	24,5	0,0157	0,0093	0,0157
2	180	0,05	4,5	0,0138	0,0225	0,0138
2	180	0,05	9,5	0,0137	0,0225	0,0137
2	180	0,05	14,5	0,015	0,0225	0,0150
2	180	0,05	19,5	0,0147	0,0225	0,0188
2	180	0,05	24,5	0,0165	0,0225	0,0165
3	180	0,15	4,5	-0,0014	-0,0040	-0,0080
3	180	0,15	9,5	-0,0029	-0,0040	-0,0029
3	180	0,15	14,5	-0,003	-0,0040	-0,0030
3	180	0,15	19,5	-0,0005	-0,0040	-0,0035
3	180	0,15	24,5	-0,0004	-0,0040	-0,0004
4	220	0,05	4,5	0,008	0,0208	0,0080
4	220	0,05	9,5	0,0091	0,0208	0,0091
4	220	0,05	14,5	0,0102	0,0208	0,0132
4	220	0,05	19,5	0,0106	0,0208	0,0177
4	220	0,05	24,5	0,012	0,0208	0,0120
5	220	0,1	4,5	0,0032	-0,0092	0,0032
5	220	0,1	9,5	-0,0002	-0,0092	-0,0002
5	220	0,1	14,5	0,0005	-0,0092	0,0005
5	220	0,1	19,5	0,0017	-0,0092	0,0159
5	220	0,1	24,5	0,0035	-0,0092	0,0035
6	220	0,15	4,5	-0,0403	-0,0392	-0,0403
6	220	0,15	9,5	-0,0399	-0,0392	-0,0399
6	220	0,15	14,5	-0,0413	-0,0392	-0,0413
6	220	0,15	19,5	-0,0403	-0,0392	-0,0455
6	220	0,15	24,5	-0,038	-0,0392	-0,0380
7	200	0,15	4,5	-0,0404	-0,0389	-0,0404
7	200	0,15	9,5	-0,0415	-0,0389	-0,0415
7	200	0,15	14,5	-0,0424	-0,0389	-0,0424
7	200	0,15	19,5	-0,0412	-0,0389	-0,0473
7	200	0,15	24,5	-0,0401	-0,0389	-0,0401
8	200	0,1	4,5	-0,0331	-0,0172	-0,0246
8	200	0,1	9,5	-0,0348	-0,0172	-0,0348
8	200	0,1	14,5	-0,0337	-0,0172	-0,0337
8	200	0,1	19,5	-0,033	-0,0172	-0,0285
8	200	0,1	24,5	-0,0323	-0,0172	-0,0323
9	200	0,05	4,5	0,0199	0,0044	0,0199
9	200	0,05	9,5	0,0209	0,0044	0,0209
9	200	0,05	14,5	0,0221	0,0044	0,0221
9	200	0,05	19,5	0,0231	0,0044	0,0329
9	200	0,05	24,5	0,0253	0,0044	0,0253
Becslési hiba (%)					-42,1133	-2,2891
Determinációs együttható (R^2)					0,8190	0,9791

A matematikai modellek összehasonlítását az ISO 1101:2017 szabvány által meghatározott, $RONt$ (kör alakúság) geometriai eltérések eredményeire is elvégeztük.

Első lépésben a mért eredmények alapján, Jamovi segítségével a mérési eredmények statisztikai jellemzőit elemeztük. A mért $RONt$ értékek eloszlását és szórását a 7. ábra szemlélteti, amely alapján megállapítható, hogy a körkörösségi hiba alakulása szintén jelentős mértékben függ a forgácsolósebesség (v_c) és az előtolás (f) együttes hatásától, azonban a ΔD -hez képest kevésbé egyértelmű, nemlineáris jellegű összefüggések figyelhetők meg. Alacsonyabb előtolás ($f = 0,05$ mm) esetén a $RONt$ értékek nagyobb szórást mutatnak, különösen $v_c = 200-220$ m/min környezetben, ami a folyamat instabilabb viselkedésére utal. Az előtolás növelésével ($f = 0,10-0,15$ mm) a körkörösségi hiba általában magasabb értékek felé tolódik, ugyanakkor az eloszlás kompaktabbá válik, ami stabilabb megmunkálási feltételekre utal. A legkedvezőbb, alacsonyabb $RONt$ értékek közepes forgácsolósebesség és kisebb előtolás mellett jelentkeznek. Az eredmények rámutatnak arra, hogy a körkörösségi hiba kialakulása komplexebb mechanizmus eredménye, amelyben a technológiai paraméterek kölcsönhatása meghatározó szerepet játszik.



7. ábra. $RONt$ értékek eloszlása a forgácsolósebesség és az előtolás függvényében

A modellezési folyamat első lépéseként többváltozós lineáris regresszió alkalmazásával határoztuk meg a bemeneti technológiai paraméterek és a körkörösségi hiba közötti összefüggést, amelyet a (2) egyenlet ír le:

$$RONt [\mu m] = 24,13 - 0,2205 \cdot v_c - 12,6353 \cdot h + 0,0005505 \cdot v_c^2 + 76,04 \cdot f^2. \quad (2)$$

A körkörösségi hiba ($RONt$) előrejelzésére ANFIS-t alkalmaztunk. Hasonlóan a ΔD paraméter vizsgálatához, itt is a modell felépítése során a rendelkezésre álló mérési adatok 70%-át tanítási, míg 30%-át tesztelési célokra használtuk fel. A fuzzy következtetési rendszer kialakításakor három bemeneti változót (v_c , f , h) vettünk figyelembe, amelyekhez elsőrendű Sugeno-modell alkalmazása mellett, Gauss típusú tagsági függvényeket rendeltünk. A modell tanítása hibrid optimalizációs eljárással történt, 20 tanulási ciklus (epoch) 0,00001 hibatalerancia alkalmazásával. A tanulás a 2. közelítésben (epoch) fejeződött be, $2,9187 \cdot 10^{-6}$ -os tanulási hibával. A tanítási folyamatot követően a modell teljesítményét a tesztelési adathalmaz segítségével értékeltük. A 8. ábra, a mért és az ANFIS által becsült $RONt$ értékek összehasonlítását mutatja a tesztelési adatok esetében. Az átlagos tesztelési hiba 0,45507 volt. A kialakított rendszer

összesen 20 fuzzy szabály alapján írta le a bemeneti és kimeneti változók közötti kapcsolatot.

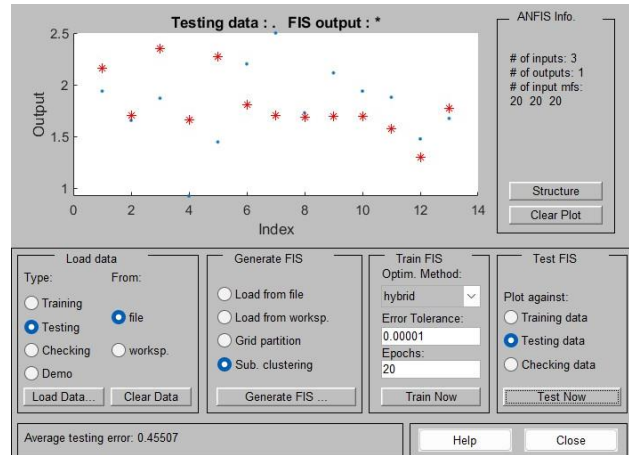
A 8. ábrán megfigyelhető, hogy a modell által előrejelzett értékek jól követik a mért adatokat, és a pontok eloszlása alapján az eltérés nem mutat szisztematikus trendet. Ez arra utal, hogy az ANFIS modell megfelelő pontossággal képes leírni a körköröségi hiba alakulását a vizsgált paramétertartományban.

A ΔD vizsgálatánál bemutatott elemzési módszerekhez hasonlóan itt is az ANFIS modell létrehozását követően, megvizsgáltuk a modell szerkezetét (felületi diagrammok), amiket az 9. ábra, 10. ábra és a 11. ábra szemléltet.

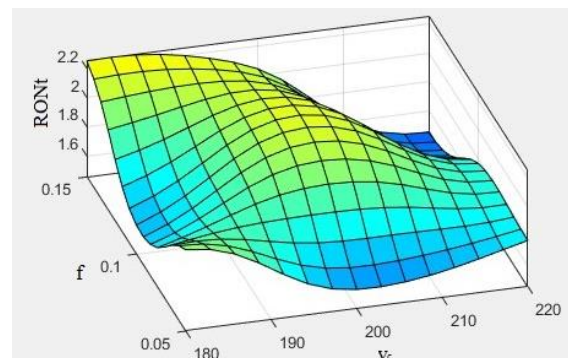
A köralakúság vizsgálata során az ANFIS modell rávilágított, hogy $RONt$ alakulása erősen nemlineáris jellegű (9. ábra). Alacsony előtolási értékek mellett ($f \approx 0,05$ mm) a $RONt$ értéke mérsékeltebb, azonban az előtolás növelésével a körköröségi hiba fokozatosan emelkedik, különösen alacsonyabb forgácsolósebességek tartományában. A maximális $RONt$ értékek alacsony v_c és nagyobb f kombinációjánál figyelhetők meg, míg a forgácsolósebesség növelésével ez a kedvezőtlen hatás részben mérséklődik. A felület görbülete arra utal, hogy a két paraméter között kölcsönhatás áll fenn, és a forgácsolósebesség növelése bizonyos mértékig kompenzálni képes az előtolás növekedéséből adódó pontosságmérleletet.

A v_c - h (10. ábra) és f - h (11. ábra) paraméterpárok hatását bemutató válaszfelületek alapján a megmunkálási mélység (h) szintén meghatározó szerepet játszik a körköröségi hiba alakulásában, azonban hatása nemlineáris módon jelentkezik. Mindkét esetben megfigyelhető, hogy közepes mélységtartományban ($h \approx 15$ – 20 mm) a $RONt$ értéke növekszik, míg kisebb és nagyobb mélységek esetén kedvezőbb értékek adódnak. A forgácsolósebesség növelése általában csökkenti a körköröségi hibát, különösen alacsonyabb megmunkálási mélységek mellett, míg az előtolás növekedése egyértelműen a $RONt$ növekedéséhez vezet. A felületek alakulása arra utal, hogy a körköröségi hiba kialakulása a szerszám–munkadarab rendszer dinamikai viselkedésével és a megmunkálási feltételek mélységfüggő változásával magyarázható, amely komplex kölcsönhatásokat eredményez a vizsgált paraméterek között.

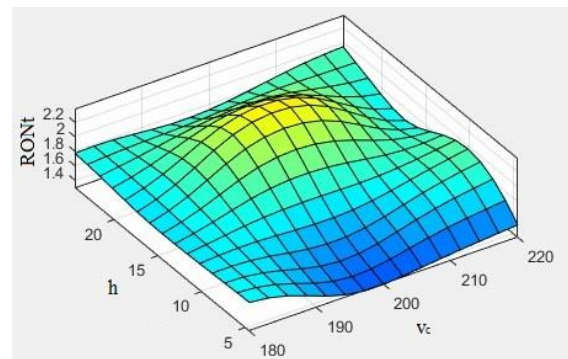
A bemutatott ANFIS alapú válaszfelületek jól reprodukálják a mért adatok statisztikai elemzése során feltárt tendenciákat, különösen az előtolás növekedésével járó körköröségi hiba-növekedést, valamint a forgácsolósebesség részben kompenzáló hatását. A boxplot diagramok (7. ábra) által jelzett eloszlási jellemzők és az ANFIS modellek által generált felületek között jó egyezés figyelhető meg, ami alátámasztja a modell megbízhatóságát. A válaszfelületek továbbá rámutatnak olyan nemlineáris kölcsönhatásokra is, amelyek a pusztán statisztikai megközelítéssel nehezebben azonosíthatók. Ez különösen a megmunkálási mélység esetében jelentkezik, ahol a közepes tartományban fellépő kedvezőtlenebb geometriai eltérések a folyamat komplex dinamikai viselkedésére utalnak. Az eredmények összességében igazolják, hogy az ANFIS modell alkalmas a körköröségi hiba nagy pontosságú előrejelzésére, valamint a forgácsolási paraméterek közötti nemlineáris összefüggések feltárására.



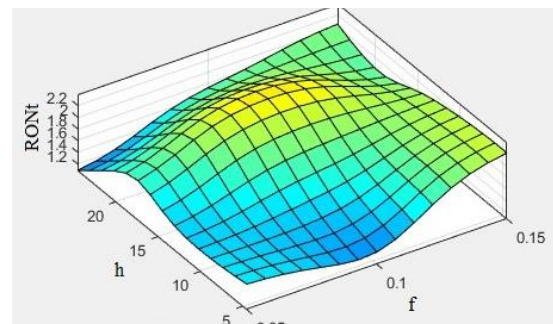
8. ábra. Az ANFIS modell predikciós pontosságának vizsgálata teszttadatokon



9. ábra. $RONt$ változása v_c és f esetén, ANFIS modell alkalmazásával



10. ábra. $RONt$ változása v_c és h esetén, ANFIS modell alkalmazásával



11. ábra. $RONt$ változása f és h esetén, ANFIS modell alkalmazásával

A 4. táblázat eredményei alapján megállapítható, hogy az ANFIS-modell szignifikánsan pontosabb előrejelzést

biztosított a lineáris regresszióhoz képest. Az RMSE érték 8,4%-os csökkenése, valamint a becslési hiba 44,26%-os mérséklődése egyértelműen jelzi a hibrid modell kedvezőbb teljesítményét. Az ANFIS magasabb determinációs együtthatója (R^2) arra utal, hogy a modell nagyobb arányban képes megmagyarázni a körköröségi hiba változását, és hatékonyabban kezeli a forgácsolási folyamatban jelenlévő nemlineáris kölcsönhatásokat. Ezzel szemben a lineáris regresszió korlátozottan írja le a bemeneti paraméterek és a geometriai eltérések közötti komplex kapcsolatokat.

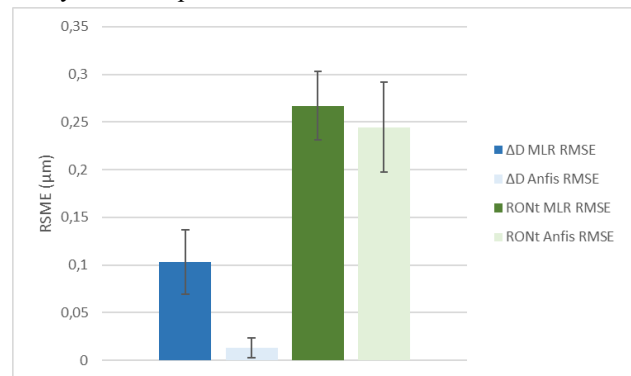
4. táblázat: A köralakúság (RONt) előre jelzett MLR és ANFIS értékei.

No.	v_c m/min	f mm	h mm	mért RONt μm	MLR RONt μm	Anfis RONt μm
1	180	0,1	4,5	1,941	1,773	1,699
1	180	0,1	9,5	1,671	1,773	1,671
1	180	0,1	14,5	1,654	1,773	1,654
1	180	0,1	19,5	1,657	1,773	1,702
1	180	0,1	24,5	1,77	1,773	1,770
2	180	0,05	4,5	1,803	1,835	1,803
2	180	0,05	9,5	1,911	1,835	1,911
2	180	0,05	14,5	2,013	1,835	2,013
2	180	0,05	19,5	1,94	1,835	2,163
2	180	0,05	24,5	2,194	1,835	2,194
3	180	0,15	4,5	1,881	2,092	1,576
3	180	0,15	9,5	1,838	2,092	1,838
3	180	0,15	14,5	2,25	2,092	2,250
3	180	0,15	19,5	1,871	2,092	2,353
3	180	0,15	24,5	2,058	2,092	2,058
4	220	0,05	4,5	2,064	1,823	2,064
4	220	0,05	9,5	1,941	1,823	1,941
4	220	0,05	14,5	1,676	1,823	1,770
4	220	0,05	19,5	2,504	1,823	1,707
4	220	0,05	24,5	1,652	1,823	1,652
5	220	0,1	4,5	1,475	1,761	1,475
5	220	0,1	9,5	1,946	1,761	1,946
5	220	0,1	14,5	1,769	1,761	1,769
5	220	0,1	19,5	1,73	1,761	1,689
5	220	0,1	24,5	1,947	1,761	1,947
6	220	0,15	4,5	1,991	2,080	1,991
6	220	0,15	9,5	1,888	2,080	1,888
6	220	0,15	14,5	1,455	2,080	1,455
6	220	0,15	19,5	2,118	2,080	1,696
6	220	0,15	24,5	2,106	2,080	2,106
7	200	0,15	4,5	2,216	1,866	2,216
7	200	0,15	9,5	2,178	1,866	2,178
7	200	0,15	14,5	2,043	1,866	2,043
7	200	0,15	19,5	2,205	1,866	1,805
7	200	0,15	24,5	2,038	1,866	2,038
8	200	0,1	4,5	1,477	1,547	1,302
8	200	0,1	9,5	1,589	1,547	1,589
8	200	0,1	14,5	2,171	1,547	2,171
8	200	0,1	19,5	1,447	1,547	2,279
8	200	0,1	24,5	1,722	1,547	1,722
9	200	0,05	4,5	1,528	1,608	1,528
9	200	0,05	9,5	1,45	1,608	1,450
9	200	0,05	14,5	1,587	1,608	1,587
9	200	0,05	19,5	0,923	1,608	1,664
9	200	0,05	24,5	1,091	1,608	1,091
Becslési hiba (%)				11,8118	6,5829	
Determinációs együttható (R^2)				0,2446	0,4224	

A modellek predikciós teljesítményének összehasonlítását a 12. ábra szemlélteti, amely egyértelműen mutatja az ANFIS modell előnyét az RMSE tekintetében mind az átmérőeltérés (ΔD), mind a körköröségi hiba (RONt) esetén. Az ANFIS minden vizsgált esetben alacsonyabb hibát eredményezett, ami a modell nagyobb predikciós pontosságát igazolja. Az ábrán feltüntetett hibásávok a 95%-os konfidencia-intervallumot szemléltetik, amely a becslések megbízhatóságáról ad

információt. Megfigyelhető, hogy az ANFIS modell nemcsak alacsonyabb átlagos hibát mutat, hanem a bizonytalansági tartománya is kedvezőbb, ami a modell stabilabb működésére utal.

Az eredmények kvantitatív összehasonlítása alapján az RMSE érték az átmérőhiba esetén 64%-kal, míg a körköröségi hiba esetén 8,4%-kal csökkent a lineáris regresszióhoz képest, ami a hibrid modell lényegesen pontosabb becslési képességét igazolja. Ez a különbség arra vezethető vissza, hogy az esztergálási folyamat során fellépő zavaró tényezők (például a szerszámkopás kezdeti szakasza, a hűtő-kenő folyadék egyenetlen eloszlása, valamint a gép-szerszám-munkadarab rendszer dinamikus rugalmassága) nemlineáris és bizonytalan hatásokat eredményeznek, amelyek leírására a fix együtthatós lineáris modell korlátozottan alkalmas. Ezzel szemben a Sugeno-típusú ANFIS rendszer a 18 (ΔD) és 20 (RONt) fuzzy szabály alkalmazásával lokálisan képes volt követni a válaszfelület változásait, ezáltal pontosabban reprezentálva a folyamat komplex viselkedését.



12. ábra. Az MLR és az ANFIS modellek RMSE értékeinek összehasonlítása a ΔD és RONt esetén

4 KÖVETKEZTETÉSEK

A kutatás célja a zsákfuratok simító esztergálása során kialakuló geometriai pontossági jellemzők prediktív modellezése, valamint a lineáris regressziós (MLR) és az adaptív neuro-fuzzy következtető rendszeren (ANFIS) alapuló megközelítések összehasonlító értékelése volt. A vizsgálatok során a forgácsolósebesség, az előtolás és a megmunkálási mélység hatását elemeztük az átmérőeltérés (ΔD) és a körköröségi hiba (RONt) alakulására, teljes faktoriális kísérlettervből származó mérési adatok felhasználásával.

Az eredmények rámutattak, hogy a vizsgált geometriai jellemzők alakulása erősen nemlineáris, és jelentős mértékben függ a technológiai paraméterek kölcsönhatásától. Az átmérőeltérés esetében a forgácsolósebesség és az előtolás domináns hatása volt kimutatható, míg a körköröségi hiba esetén a megmunkálási mélység szerepe is meghatározóvá vált. A válaszfelületek elemzése egyértelműen igazolta, hogy a paraméterek közötti kölcsönhatások nem írhatók le kielégítő pontossággal lineáris modellekkel.

A modellek összehasonlítása során az ANFIS szignifikánsan jobb predikciós teljesítményt mutatott a lineáris regresszióhoz képest. Az RMSE érték az átmérőeltérés esetén 64%-kal, míg a körköröségi hiba esetén 8,4%-kal csökkent, ami a hibrid modell lényegesen pontosabb becslési képességét igazolja. A magasabb determinációs együttható (R^2) és a válaszfelületek

részletesebb leképezése alapján megállapítható, hogy az ANFIS hatékonyan képes kezelni a forgácsolási folyamat során fellépő nemlineáris és bizonytalan jelenségeket. A Sugeno-típusú fuzzy következtetési rendszer a kialakított szabálybázis révén lokálisan is képes követni a geometriai eltérések változását, így pontosabban reprezentálta a valós fizikai folyamatokat.

A geometriai pontossági jellemzők (különösen az átmérőeltérés és a körköröségi hiba) prediktív modellezését vizsgálta, amely a szakirodalomban kevésbé feltárt területnek tekinthető. Emellett a megmunkálási mélység figyelembevételével végzett elemzés rávilágított a geometriai eltérések mélységfüggő jellegére, ami új szempontokat ad a forgácsolási folyamatok értelmezéséhez. Az eredmények megerősítik, hogy az ANFIS alkalmas eszköz a komplex gyártási folyamatok modellezésére, különösen olyan esetekben, ahol a fizikai összefüggések nehezen írhatók le analitikus módon.

Gyakorlati szempontból a kidolgozott modellek lehetőséget biztosítanak a vizsgált paramétertartományon belüli közbenső beállításokhoz tartozó geometriai jellemzők előrejelzésére, ezáltal támogatva a technológiai paraméterek finomhangolását és optimalizálását. A modellalapú megközelítés hozzájárul a forgácsolási folyamat mélyebb megértéséhez, valamint elősegíti a nagy pontosságú megmunkálás stabil és reprodukálható megvalósítását. Ennek révén a módszer hatékony eszközt kínál a korszerű, nulla hiba elvű gyártási stratégiák támogatására.

A kutatás korlátját a viszonylag alacsony elemszámú kísérleti adatbázis jelenti, amely befolyásolhatja a modellek általánosíthatóságát. A jövőbeni kutatások során célszerű nagyobb adathalmazokra épülő modellek fejlesztése, valamint az ANFIS teljesítményének összehasonlítása más korszerű gépi tanulási módszerekkel, például genetikus algoritmusokkal vagy részecskekeraj-optimalizációval kombinált modellekkel.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A szerzők ezúton fejezik ki köszönetüket a Walter Hungária Kft.-nek a forgácsolószerszámok biztosításáért. Külön köszönet illeti az Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar Gyártástechnológiai Tanszékét a kísérletek elvégzéséhez biztosított infrastruktúráért és szakmai támogatásért. A koordinátamérési vizsgálatok elvégzéséért a szerzők köszönetüket fejezik ki a Mahr Magyarország Kft.-nek, amely lehetővé tette a nagy pontosságú mérőberendezések használatát.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] E. Tóth-Laufer, R. Horváth (2017). Fuzzy Model Based Surface Roughness Prediction of Fine Turning. *FME Transactions*, 45, 181-188. <https://doi.org/10.5937/fmet1701181T>
- [2] S.O. Sada, S.C. Ikpeseni (2021). Evaluation of ANN and ANFIS modeling ability in the prediction of AISI 1050 steel machining performance. *Heliyon*, 7 (2). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06136>
- [3] R. Horváth, E. Tóth-Laufer (2014). Fuzzy Model-Based Cutting Parameter Combination. *IEEE 18th International Conference on Intelligent Engineering Systems (INES 2014)*, 151-155. <https://doi.org/10.1109/INES.2014.6909359>
- [4] Imhade Princess Okokpujie, Jude Ebieladoh Sinebe (2023). An Overview of the Study of ANN-GA, ANN-PSO, ANFIS-GA, ANFIS-PSO and ANFISFCM Predictions Analysis on Tool Wear

- During Machining Process. *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, 56 (2) 269-280. <https://doi.org/10.18280/jesa.560212>
- [5] Shivakoti, I., Kibria, G., Pradhan, P. M., Pradhan, B. B., & Sharma, A. (2019). ANFIS based prediction and parametric analysis during turning operation of stainless steel 202. *Materials and Manufacturing Processes*, 34(1), 112-121. <https://doi.org/10.1080/10426914.2018.1512134>
- [6] Shivakoti, I., Lewlyn L. R. Rodrigues, R. Cep, P. M. Pradhan, A. Sharma & A. K. Bhoi (2020). Experimental Investigation and ANFIS-Based Modelling During Machining of EN31 Alloy Steel. *Materials*, 13 (14), 3137, <https://doi.org/10.3390/ma13143137>
- [7] Arif Gok (2015). A new approach to minimization of the surface roughness and cutting force via fuzzy TOPSIS, multi-objective grey design and RSA. *Measurement*, 70, 100-109. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.03.037>
- [8] Kriti B., Deepika M. & Ravi S. P. (2022). Optimization of Surface Roughness: Effect of Machining Parameters on EN23, *Advanced Production and Industrial Engineering*, 666-671, <https://doi.org/10.3233/ATDE220811>
- [9] Dilek D., East S. A. & İlknur K. (2024). Optimization of adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) parameters via Box-Behnken experimental design approach: The prediction of chromium adsorption, *Heliyon*, 10(3), <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25813>
- [10] N. Rajesh, R. Lokanadham (2024). Optimization of machining parameters & studies on characteristics of Monel k400 alloy using abrasive water jet Machining using ANFIS. *Materials Today*, 98, 40-46. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.08.376>
- [11] Rácz V, G., & Mikó, B. (2025). Accuracy Examination of Hole Machining Methods. *Acta Materialia Transylvanica* 8 (2), 88-95. <https://doi.org/10.33924/amt-2025-02-08>
- [12] Drégelyi-Kiss, Á. (2024). Application of Experimental Design-Based Predictive Models and Optimization in Additive Manufacturing – a Review. *Hungarian Journal of Industry and Chemistry*, 52(1), 55-70. <https://doi.org/10.33927/hjic-2024-08>