

## 1. Bevezetés

A jelenlegi igények az ipar különböző területein, mint például az elektronika, optika, repülőgépipar és biotechnológia, olyan mikro-alakzatok készítését igénylik, amilyenek például egy mikro-elektromechanikus, vagy mikro-fluidikai eszközön találhatók. A jelenlegi mikro-megmunkáló eljárások a nem konvencionális technológiákon alapulnak, mint például a LIGA, lézeres, ultrahangos, mikro-szikraforgácsoló megmunkálások. Ezekkel a nem-hagyományos eljárásokkal nagy pontosságú alakzatokat lehet előállítani, azonban a nagy beruházási költségek, alacsony anyagválasztási sebesség és a megmunkálható anyagok korlátozott köre nem teszi tömeggyártásra alkalmassá. [1]. A mechanikus mikro-megmunkálások, mint például a mikro-esztergálás, mikro-marás, mikro-drilling stb. alternatív megoldások a termelékenység növelésére és a megmunkálható anyagok körének kiterjesztésére [2].

A forgácsoló szerszámok állapot felügyelete a makro mérettartományban a nagyarányban vizsgált területek közé tartozik, ugyanakkor ezek az eredmények nem vagy csak kevésbé alkalmazhatók a mikro méretű megmunkálásokra vonatkoztatva az úgynevezett mérethatás (size effect) jelentkezése miatt. A mechanikai mikro megmunkálási eljárások esetén a szerszámfelügyelet kiemelt fontosságát erősíti, hogy a szerszám méretek (pl. szerszám átmérő) igen kicsik, ugyanakkor a megmunkálási sebesség (fordulatszám) igen magas, tehát extrém igénybevétel mellett történik a megmunkálás. A megnövekedett sebesség ugyanakkor a beavatkozási időtartomány lecsökkenését is eredményezi, így nem kerülhető ki a felügyelet automatizálása. A kutatás fő célkitűzése különböző automatikus felügyeleti stratégiák vizsgálata különböző érzékelők jelének figyelembevételével, és a feldolgozási, döntési módszerekben a mesterséges intelligencia algoritmusok alkalmazásával.

A kutatás kísérleti vizsgálatai elsősorban a mikro fűrási körülmények elemzésére irányultak, mert ennél a forgácsoló megmunkálásnál a forgácsolási körülmények csakúgy, mint a mérési körülmények a többi eljáráshoz viszonyítva számos nehézséget hordoznak. A fűrés során a teljes élszakasz, sőt a szerszám egy jelentős része is az anyagban, zárt térben, szemmel nem láthatóan dolgozik. A megmunkálási körülményeket is befolyásolja ez a zárt elrendezés, a forgács eltávozása, a hőmérséklet stabilizálódása, a súrlódási körülmények kedvezőtlen változása nehezíti a fűrés vizsgálatát, és feltétlenül szükségessé egy hatékony, mért jellemzőkre alapozott automatikus felügyelet kialakítását.

A szerszám mérete miatti jelenségek, a gyakori szerszámtörés, a megmunkálás érzékenysége a forgácsoló erőre és rezgésekre e technológia legfőbb hátrányát jelentik. E hátrányok miatt is fontos a szerszám állapotának felügyelete a gyakori szerszámtörés elkerülésének szempontjából és hogy a szerszámot a legjobban kihasználjuk. A szerszám felügyelete több kihívást tartalmaz a mikro-tartományokban, mint makro-tartományokban, ha figyelembe vesszük a rugalmas deformációs hatásokat, szerszám elhajlást, alacsony jel-zaj arányt stb. A munkadarab visszarugózása kétféleképpen befolyásolja a szerszám kopását. Az egyik a megnövekvő forgácsoló erő miatti, a másik a szerszám és munkadarab kontakt felületének növekedése miatti. A megnövekedett kontakt felület nagyobb hátkopást okoz. A szerszám kihajlása, a forgácsoló erő fluktuációja, rezgése stb. és a szerszám kopása között bonyolult az összefüggés ahhoz, hogy mennyiségileg egyszerűen meghatározható legyen, ezért valósidejű adaptív felügyelet szükséges, hogy következtethessünk a szerszám instabillá válására vagy törésére.

A kopás felügyeleti módszerek közül a legmegbízhatóbbak a direkt kopás mérésen alapuló megoldások. Ilyenkor a forgácsoló élszakasz optikai vagy tapintásos vizsgálatával azt mérjük, amire tényleg kíváncsiak vagyunk. A mérés jellegéből adódóan ilyenkor szükséges a megmunkálás megszakítása, és vagy a vizsgáló érzékelő vagy a vizsgált objektum mozgatása a vizsgálati helyre. A megmunkáló gépeken

megjelentek azok az érzékelők (tapintók, mikroszkópok), amelyek lehetővé teszik ezeket a vizsgálatokat, és a vezérlésbe integrált szoftverek segítségével az automatikus feldolgozás és visszacsatolás is lehetségessé válhat.

Az úgynevezett indirekt kopás felügyeleti eljárások során olyan jellemzők mérésével valósítjuk meg a kopottság becslését, amelyek változása utal a szerszám állapotának változására. Ezeknél a módszereknél a megmunkálás során, a folyamat leállítása nélkül, valós időben tudjuk a kopást kiértékelni. Ugyanakkor a kopottság és a választott jellemző kapcsolata a különböző megmunkálási körülményekre (geometria, megmunkáló gép és szerszám, beállított paraméterek) egyedileg jellemző és meghatározandó. Ez a kapcsolat ráadásul jelentős mérési bizonytalanságokkal is terhelt.

## 2. A kísérleti környezet kialakítása

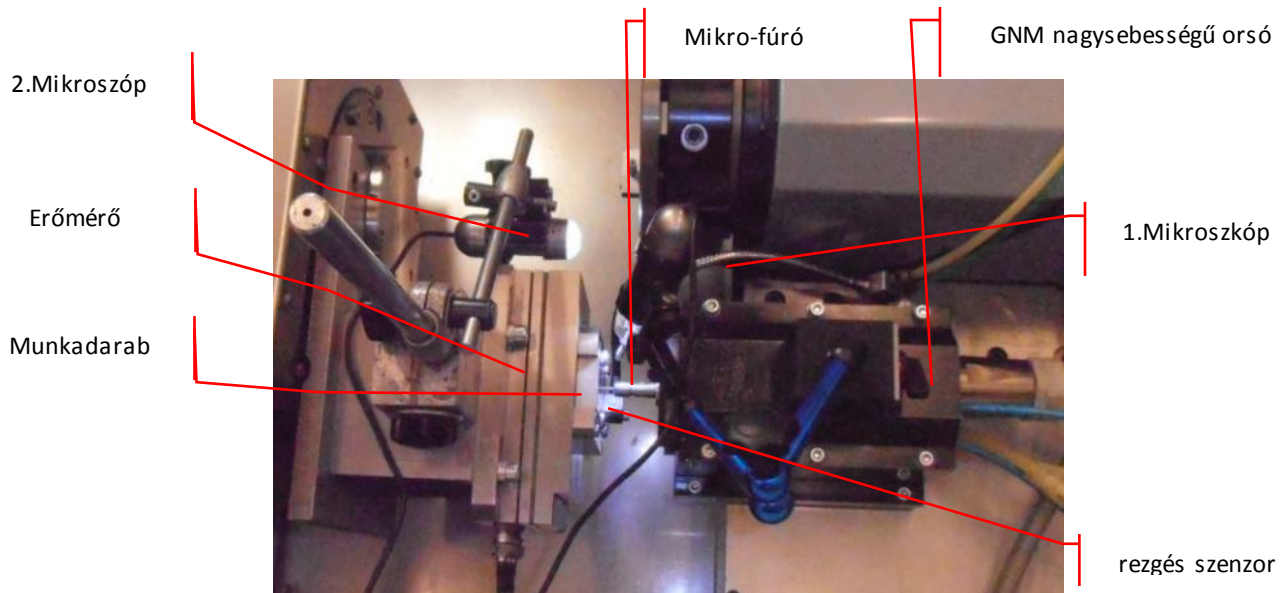
A kutatás első szakaszának legnagyobb kihívását a megfelelő kísérleti környezet kialakítása jelentette. Ebben egyaránt biztosítani kellett a mikro megmunkálási követelményeknek megfelelő, nagy pontosságú és merevségű szerszámgép környezetet és a jellemzők mérését megvalósító elegendően érzékeny mérőeszközök körét. Ezek beállítása, a forgácsoló szerszámok és befogó készülékek megfelelő megtervezése, gyártása és bemérése, a mért jellemzők zajszűrése, a nagy mennyiségű adat folyamatos rögzítése igényes feladat volt. A vizsgálatok során különböző anyagokba, több gyártótól származó különböző szerszámanyagú és geometriájú fűróval, a forgácsolási paraméterek változtatása mellett végeztünk kísérleti fűrésokat.

A kísérleti környezet egy nagy pontosságú és merevségű esztergagépen (Hembrug Slantbed Microturn 50) került kialakításra, amelynek leolvasási pontossága 10 nm, pozicionálási pontossága 0,1  $\mu\text{m}$ , és a gránit ágy miatt a csillapítása valamint a termostabilitása nagyon jónak mondható. A kis átmérő miatt szükséges nagy fordulatszám biztosítása egy GMN HS maximálisan 120000/min fordulatszámú köszörű orsó felszerelésével valósult meg, amelynek maximális teljesítménye 1,2 kW. Az erő és nyomaték komponensek mérésére egy Kistler 9257A típusú 3 komponenses piezoelektromos erőmérőt szereltünk fel, amely Kistler 5019B típusú töltéserősítő közvetítésével csatlakozott az adatgyűjtő rendszerünkhez, amely egy NI USB-4431 típusú, 24 bites kártyából, feldolgozó PC-ből és LabVIEW környezetben kialakított feldolgozó programból állt. A fűrószerszám kopási képének felvételére Dino-Lite AM413T5 Pro típusú mikroszkópot állítottunk be a mérési elrendezésbe, amely 500-szoros nagyításra képes. A rezgésmérés során először egy SKF gyártmányú analizátor segítségével vettük és tároltuk a szenzorok által érzékelt rezgések jeleit, melynek típusa CMVA10, dinamikai tartománya 80 dB, és amelyhez 1 Mbyte memória és 16 bites adatfeldolgozó processzor tartozik. A másik esetben felhasznált gyorsulásérzékelő szenzor típusa Brüel & Kjaer 4518-001, érzékenysége 98,3 mV/g, melyet a megmunkálás irányára merőlegesen helyeztünk el. A kísérleti összeállítást az 1. ábrán mutatjuk be.

Az alkatrész befogását a tokmány melletti területen alakítottuk ki úgy, hogy a jellemzők méréséhez használandó érzékelők elhelyezése számára is helyet biztosítsunk. Az alkatrész befogása egy, az erőmérést végző érzékelő egységre szerelt készülékben valósult meg. Az érzékelő test felfogásához egy pontosan legyártott és felszerelt közdarabra volt szükség. Az alkatrészen, az érzékelő acéltestén és a közdarabon is elegendő helyet terveztünk a további érzékelők elhelyezéséhez. Párhuzamosan mértünk rezgés jelet is. Az

érzékelőkből kapott jeleket National Instruments adatgyűjtő kártyák és LabVIEW környezetben megírt adatgyűjtő rendszer segítségével rögzítettük a további feldolgozás érdekében.

Az elhasználódás folyamatos mérése jelenti a legnagyobb kihívást. A mikrofúrás nagy I/D arányú kinyúlással, nagyon kis átmérővel (0,5 mm) történő végrehajtása során a beállítás, és a visszaállítás pontossági kihívása helyett a megmunkálási helyzetben, egy digitális mikroszkóp alkalmazásával próbáltuk az elhasználódást értékelni. Egy-egy fúróciklus között nyílt lehetőség a szerszámmikroszkópon történő beállított mérésre.

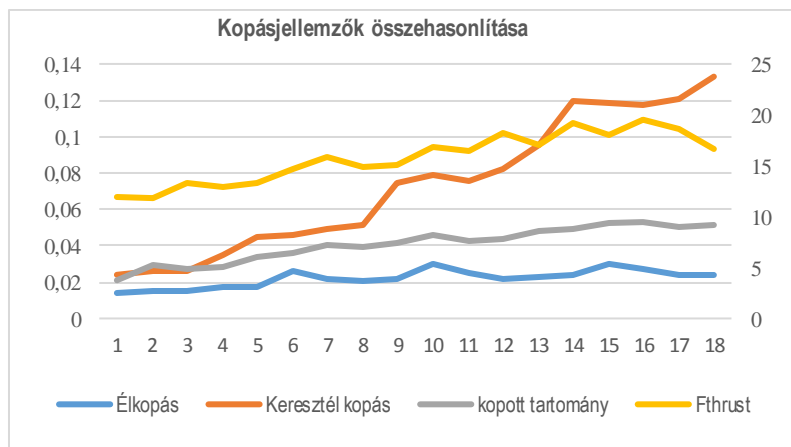


1. ábra Kísérleti környezet

### 3. Direkt kopás mérés felügyeleti alkalmazása

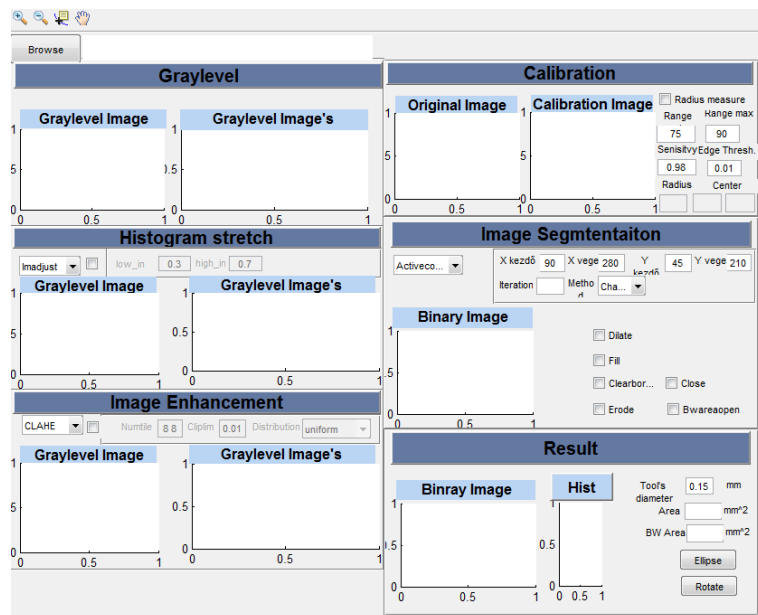
A fúrás és a mikro fúrás esetén a kopás illetve elhasználódás közvetlen mérésének lehetőségét korlátozza, hogy a furatba hatoló szerszám működő részéhez nem tudunk hozzáférni. Ugyanakkor a kopási folyamat lassú előrehaladása lehetővé teszi, hogy a szerszám kiemelési során, a befogások megőrzése mellett egy megfelelő mérőmikroszkóp munkatérbe helyezésével mégis folyamatosan nyomon követhessük a szerszám állapotát. Annak érdekében, hogy módszerünk hatékony és minimális termelési kiesést okozó megoldássá válhasson, egy gyors, automatikus kiértékelési módszert dolgoztunk ki. A vizsgálat során azt is ellenőriztük, hogy az alkalmazott fúrószerszámokon megjelenő kopásformák közül melyik mutatja legjellemzőbben az elhasználódást [3, 4].

Bár a leginkább jellemző a keresztél kopása volt, ez befolyásolja jelentős mértékben az előtolás irányú erőt is, de a mérési nehézségek miatt ezt nem javasoljuk. A teljes kopási tartomány a fúró megmunkálási irányából vizsgált nézetén szintén igen jellegzetesen és egyértelműen jellemzi a kopottságot. Ezt a jellemzőt a különböző körülmények közötti ismételt mérések során is megfelelően találtuk, ezt a jellemzőt javasoljuk, a kidolgozott, automatizált kopásmérési eljárásunkban is ezt a jellemzőt dolgozzuk fel. Példaként a 2. ábrán foglaltuk össze a kopásjellemzők összehasonlítását. A különböző anyagok, szerszámok esetén ezek a változások hasonló jellegzetességet mutattak [5, 6].

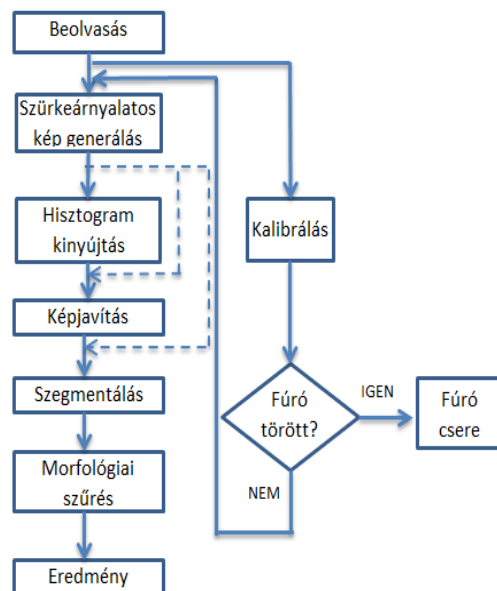


2. ábra Kopásjellemzők összehasonlítása

Az automatikus kopás felismerésre alkalmas program a MATLAB R2013a szoftver GUI (Graphical User Interface) moduljának felhasználásával készült, hogy felhasználóbarát kezelőfelületen történhessen az adatok kiértékelése. A MATLAB R2013a szoftver Image Processing Toolbox eszköztárában megtalálhatóak a különböző beépített szűrő, simító és szegmentáló eljárások. A kísérletek alatt készült fényképeken található kopás területét manuálisan, a program saját szoftverével lehetett megmérni. A Threshold küszöbérték meghatározó, Canny élfelismerő, Texture felület felismerő, és az Activecontour metódusokat használtuk fel és vetettük össze a feldolgozás során. A fényképek feldolgozásának menetéről a 3. ábra ad tájékoztatást, a kopások feldolgozás utáni automatikusan számított értékeit az 1. táblázat foglalja össze. A négyzetes eltérések összegzése alapján a vizsgálatainkban a texture módszer volt a legmegbízhatóbb, és a referencia kísérleteink is ezt igazolták, így ezzel a módszerrel alakítottuk ki a direkt kopásfelügyeleti eljárásunkat [6, 7].



a)



b)

3. ábra A saját fejlesztésű MATLAB program a) kezelőfelülete és b) folyamatábrája

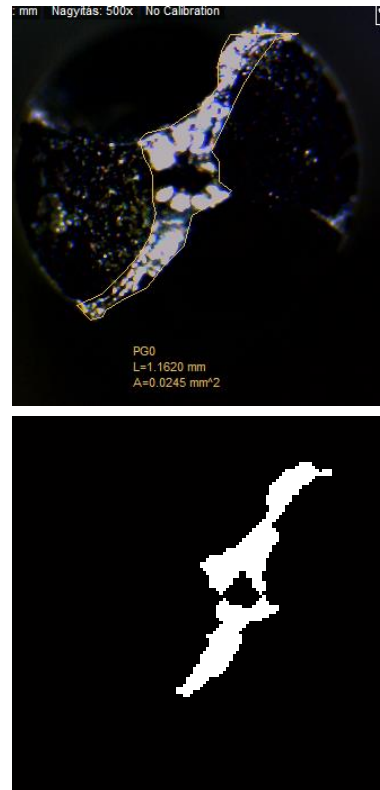
Referencia kísérletekkel igazoltuk a módszer alkalmasságát és működőképességét. A fűrési megmunkálások során három forgácsolási sebesség érték (16; 23; 30 [m/perc]), valamint három előtolás érték (0,01; 0,02; 0,03 [mm/ford]) segítségével teljes faktoriális kísérleti tervet valósítottunk meg. Miután a különböző kopottsági állapotú mikro fűrőkről a fényképek elkészültek, megkezdtük az általunk felparaméterezett és beállított optikai kiértékelő egység segítségével a kopások kiértékelését. Példaként

egy elkészült fénykép a kopott szerszámról és a legjobbnak bizonyult „Texture” metódussal kapott szegmentált kép a 4. ábrán látható.

1. táblázat

A meghatározott kopási területek

Darabszám	Kopási terület [mm <sup>2</sup> ]				
	manuális	Threshold	Canny	Texture	Activecontour
30	0,0186	0,0186	0,0207	0,0155	0,0186
60	0,0171	0,0162	0,0182	0,0176	0,0171
90	0,0179	0,0169	0,0182	0,0179	0,0173
120	0,0166	0,0159	0,0177	0,0178	0,0164
150	0,0184	0,0172	0,0196	0,0191	0,0176
180	0,0213	0,0210	0,0230	0,0211	0,0216
210	0,0183	0,0175	0,0199	0,0183	0,0180
240	0,0249	0,0217	0,0219	0,0234	0,0223
270	0,0190	0,0211	0,0220	0,0234	0,0211
300	0,0234	0,0222	0,0241	0,0226	0,0221
330	0,0241	0,0222	0,0260	0,0229	0,0202
360	0,0216	0,0183	0,0202	0,0206	0,0199
390	0,0232	0,0189	0,0223	0,0215	0,0203
420	0,0224	0,0210	0,0218	0,0213	0,0224
450	0,0208	0,0204	0,0224	0,0225	0,0212
480	0,0220	0,0239	0,0249	0,0271	0,0242
510	0,0217	0,0196	0,0207	0,0207	0,0202
540	0,0252	0,0210	0,0231	0,0239	0,0266
570	0,0244	0,0244	0,0257	0,0255	0,0248
600	0,0241	0,0242	0,0253	0,0265	0,0253
630	0,0241	0,0211	0,0232	0,0231	0,0218
660	0,0258	0,0241	0,0252	0,0235	0,0241
690	0,0245	0,0200	0,0232	0,0224	0,0215
720	0,0264	0,0237	0,0252	0,0259	0,0244
750	0,0252	0,0235	0,0253	0,0254	0,0247



4. ábra

Fénykép a kopott szerszámról

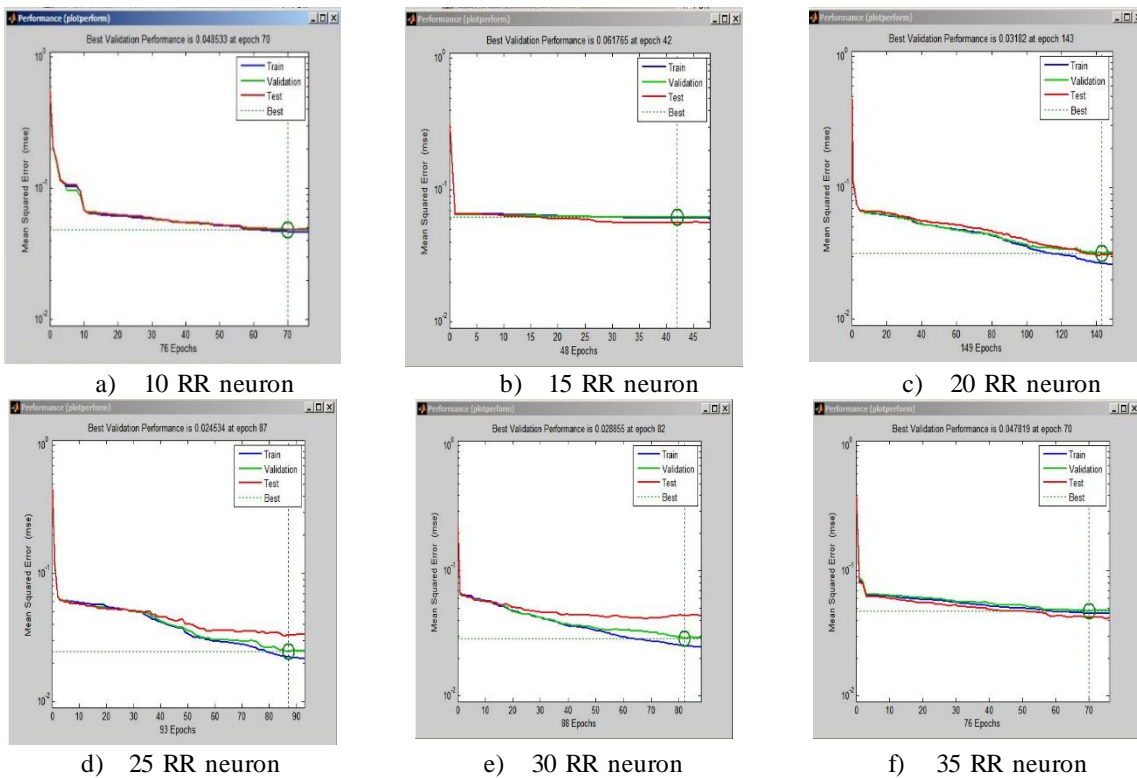
A továbbiakban az indirekt kopásfelügyeleti módszerek értékelésekor is ezt a kopásmérési módszert vettük alapul [8].

#### 4. Közvetett mérési módszereken alapuló szerszámállapot felügyelet

A kopásfelügyelet hatékonysága nagyban függ a megfigyelt folyamatjellemzők típusától. A forgácsoló szerszámok állapotfelügyeletében elterjedten alkalmazott indirekt folyamatjellemzők a forgácsolási erőkomponensek, a különböző frekvencia tartományban mérhető rezgés jelek valamint a további áttételek közbeiktatásával mért teljesítmény illetve áram felvétel a megmunkálás során. Ez utóbbi kettőt a vizsgálatok kezdetén elvetettük, mert a mikro megmunkálások során megjelenő folyamat hatások nagyságrendje a megmunkáló gépből eredő zavarásokhoz képest elhanyagolható, így ezekből nem számítottunk hatékonyan alkalmazható eredményre. A kísérletek során ennek megfelelően az erőkomponenseket, és a rezgésjeleket mérve kerestük azokat a feldolgozó módszereket, amelyek megbízhatóan szűrték ki a szerszám elhasználódására jellemző mennyiségeket. A módszer megbízhatóságát itt is úgy igazoltuk, hogy különböző anyag-szerszám párosítások mellett, különböző forgácsolási paraméterek alkalmazásával végeztük el a kísérleteket [9].

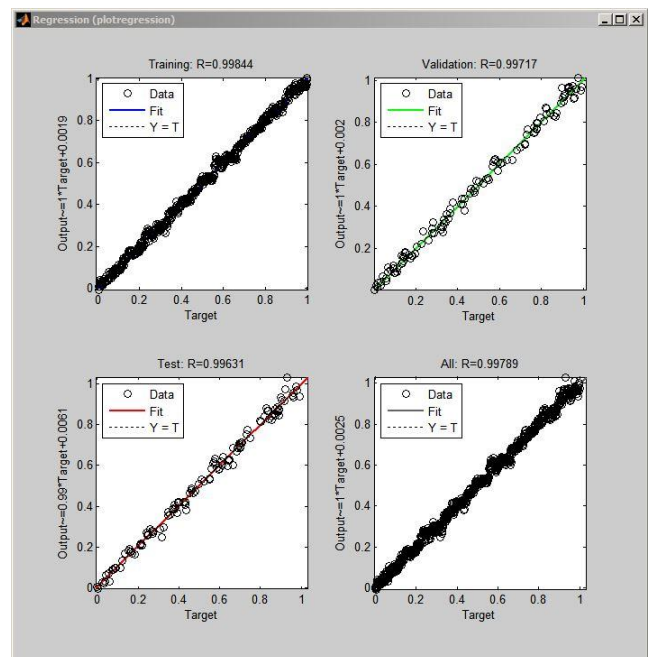
#### 4.1. Szerszámállapot előjelezése az erőkomponensek mérésével ANN modell segítségével

A mesterséges neurális háló felépítésére a MathWorks MATLAB® szoftverének Neurális Hálózat Toolboxát alkalmaztuk. A szoftvercsomag rugalmas konfigurálási lehetőségeket, különböző tanulási algoritmusokat, és a MATLAB beépített függvényeinek integrált használatát teszi lehetővé, így az egyedi alkalmazások fejlesztését maximálisan támogatja, és azok létrehozásához számos segítő alkalmazást is nyújt.



5. ábra A betanulási hiba a különböző neuron számot tartalmazó rejtett rétegek (RR) esetén

A mérési eredményekből 8 bemeneti változót generáltunk, a forgácsolási sebesség, az előtolás, a 3 fűrési lépésenként meghatározott átlag és maximális erők megadásával. A kimeneti értékekre 15 célértéket választottunk a kopottsági szinteknek megfelelően. A lehető legjobb struktúra kiválasztásához a rejtett réteg neuronjainak a számát 6 különböző értéken (10 és 35 között 5 neurononkénti lépéssel) változtattuk. A mért kopási és erő értékeket normalizálva tanítottuk be a hálózatokat. A mérési adatainkból 70% a hálózat betanítására szolgált, 30% a tesztelésre és értékelésre lett elkülönítve. Az 5. ábrán a különböző rejtett rétegek esetén jelentkező betanulási hibát szemléltetjük, felismerhető, hogy a minimális hiba a 25 neuront tartalmazó rejtett réteg alkalmazásakor jelentkezett [10].

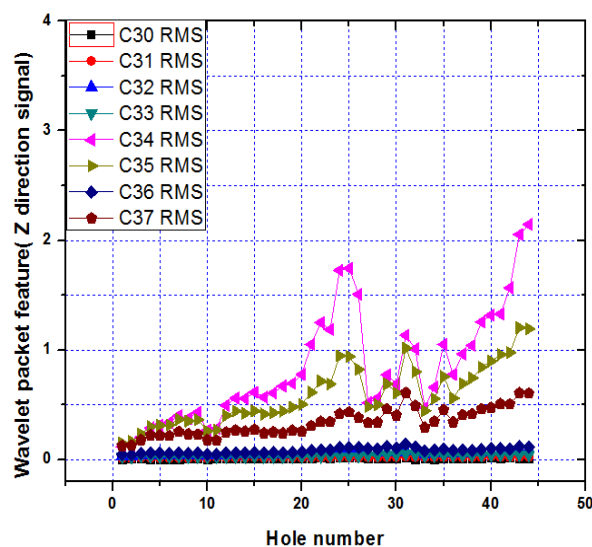


6. ábra A kopásbecslő alkalmazás regressziós diagramja

A betanítás eredményeként a mért kopási értékeket jól követő hálózati becslést kaptunk, a 6. ábra a betanítás, a kiértékelés, a teszt és a 3 regressziós diagram együttes ábrázolásával mutatja az eredmények és a célértékek megfelelő fedését.

#### 4.2. Rezgésjelekre épülő felügyeleti stratégiák

A rezgésvizsgálatok során mért jeleket egy másik esetben szintén a MathWorks MATLAB® szoftverének Neurális Hálózat Toolboxát alkalmaztuk, de a bemeneti adatok generálásához előzetesen az idő tartományban kapott jeleket egy Wavelet transzformáció segítségével alakítottuk át. Ehhez egy másik Toolbox, a Wavelet Packet Transform került alkalmazásra. A wavelet közelítéshez használt együtthatókat a daubechies 8 függvénnyel határoztuk meg. A megmunkált furatok számát tekintve az együtthatók közül legérzékenyebbnek a C34, C35 és C37 bizonyult (7. ábra), ezeket választottuk a további, neurális hálózatos feldolgozáshoz.



7. ábra A wavelet együtthatók változása a furatok számának függvényében

A neurális háló bemeneti értékeit a jellemző együtthatók, mellett a forgácsolási sebesség és az előtolás értékek adták. Kimeneti változóként a furatok számát vettük figyelembe. A rejtett réteg neuronjainak számát változtattuk, hogy a legjobb közelítést érnük el a tanulás során (2. táblázat), a kiválasztott hálózatban 15 a rejtett neuronok száma.

2. táblázat A rejtett réteg optimalása

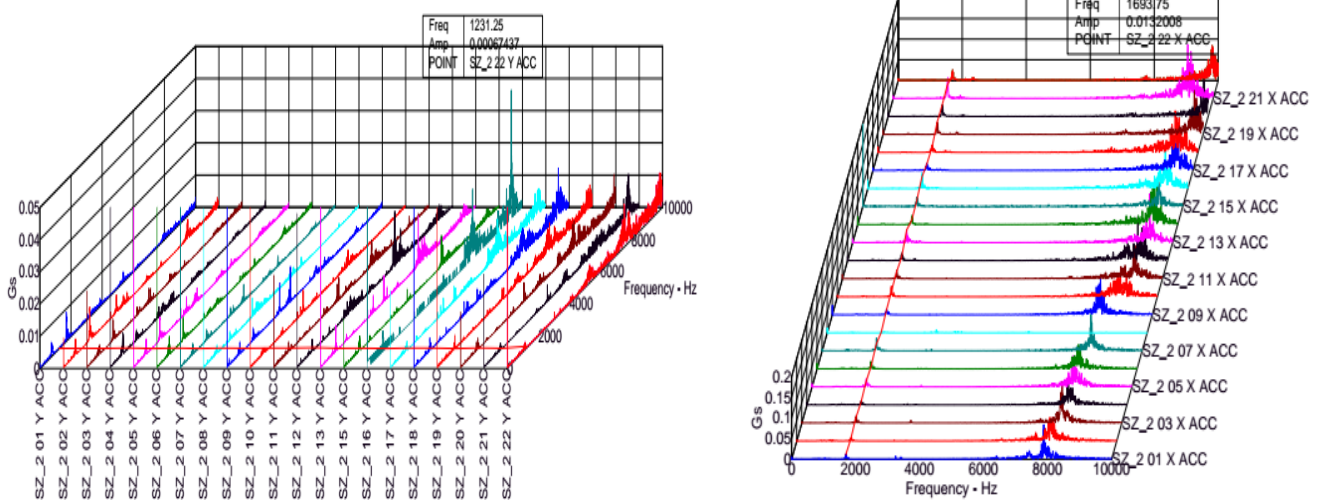
rejtett réteg neuronjainak száma	a wavelet együtthatók MSE értéke	az idő függvény MSE értéke
5	0.002129	0.002809
10	0.003816	0.013158
15	0.000778	0.006077
20	0.002756	0.003780
25	0.002828	0.004567

A rejtett réteg neuronjainak számát mindkét esetben próbálkozás segítségével optimaltuk, a betanítás utáni becslések jóságát az MSE értékek összehasonlításával értékeltük. A kidolgozott stratégiák alapján megállapíthatjuk [11]:

- Megfigyeltük, hogy a tolóerő értéke növekszik a furatok számával. Ezt a paramétert használhatjuk arra, hogy felügyeljük a mikro-fúró kopásának előrehaladását. Azonban a frekvencia spektrumelemzése azt igazolja, hogy a tolóerő jelek frekvencia-összetevői érzékenyebbek a szerszám törését megelőző fázisban illetve a szerszám törésekor. Tehát az előtoló erő FFT spektrumát alkalmazhatjuk a mikro-fúró törésének érzékelésére.
- Az előrejelzés eredményei arra utalnak, hogy a mesterséges neurális hálózat egyike az olyan módszereknek, amelyekkel mechanikus mikro-mélyfúró ciklusban pontosan és célszerűen lehet előrejelezni a fúrható furatok számát az előtoló erő közép- és maximális értékéből, valamint a forgácsolási feltételekből.
- A projekt megvalósítása során több, a rezgésjelekre épülő fúróállapot-előrejelző stratégiát írtunk le és hasonlítottuk össze az ANN modellel. Bebizonyosodott, hogy a „hullámocska” csomag jellemzőire épülő stratégiák jobb teljesítményt nyújtanak, mint a rezgésjelek időtartomány jellemzőire alapuló a stratégiák.
- Elvégeztük a többirányú rezgésjelek fúzióját. Ebben a rezgésalapú felügyeleti rendszerben a legjobb javasolt stratégia – a Z irányú „hullámocska” csomag jellemzőire alapuló módszer.

#### 4.3. A rezgésjelek grafikus elemzése alapján végzett intuitív felügyeleti módszer

A vizsgált rezgésmérési mérési sorozatok FFT spektrumait Palogram és Waterfall diagramokban is megjelenítettük. A 8. ábrán azt láthatjuk, hogy az idő előrehaladtával erősödnek a rezgésjelek, amely jelenség egyértelműen a szerszám kopottságára vezethető vissza. Ennek a jelenségnek a figyelése szintén megbízható felügyeleti lehetőséget kínál, hatékonyan alkalmazható a mikro fúrók elhasználódásának nyomonkövetésére. A kopottság meghatározására a korábban már bemutatott automatikus direkt módszert alkalmaztuk. A vizsgálatok során az érzékelési irányok, az érzékelő és feldolgozó környezet, illetve a szerszám változtatásának hatását is ellenőriztük [12, 13]. A jelek erősödése mindkét összefoglaló diagram típus esetén, mindkét érzékelési irány (a megmunkálás irányába eső illetve arra merőleges irányú) mérései esetén tapasztalható volt, bár a megmunkálási iránynak megfelelő beállítás esetén erősebben.



a) b)  
8. ábra – A rezgésmérés eredménye a) Palogram és b) Waterfall típusú diagramban



## 5. A kutatási eredmények alkalmazása, hasznosítása

Bár a szerszám állapot felügyelet fejlesztése és integrálása a megmunkáló berendezésekbe napjaink jellemzően jelen levő igénye mind a szerszámgép és vezérlés gyártók, mind a felhasználók részéről, az eredmények üzleti hasznosítását még nem sikerült megvalósítani. Ugyanakkor a kutatási eredményeink közvetlenül alkalmazásra kerültek két nemzetközi együttműködéssel megvalósított kutatásunk során:

1. Multiszenzor alapú intelligens szerszámállapot felügyeleti rendszer kidolgozása mechanikus mikroforgácsolási folyamathoz (TÉT\_10-1-2011-0233)
2. Mikromarás technológiájának, szerszám pályáinak kísérleti és elméleti optimalizálása és vezérlése (TÉT\_12\_MX-1-2013-0015).

Emellett az ipari fejlesztést támogató VKSZ\_12-1-2013-0038 projekt alvállalkozójaként a „Rézötövet mikrofúrasi technológiájának vizsgálata, forgácsolhatósági tulajdonságainak feltárása” részfeladat teljesítése során szintén építettünk ezekre az eredményekre.

## 6. Irodalomjegyzék

1. Vilmos Csala, Sándor Markos, Tibor Szalay: COMPARATIVE ANALYSIS OF THREE MICRO-HOLE MACHINING TECHNOLOGY, In: Zlatan Car, Jan Kudlacek, Tomaz Pepljenjak (szerk.) Proceedings of International Conference on Innovative Technologies. Rijeka, Horvátország, 2012.09.26-2012.09.28. pp. 429-433.(ISBN: 978-953-6326-77-8)
2. Vilmos Csala, Tibor Szalay, Balázs Farkas, Sándor Markos: Application Benchmark of Three Micro Hole Machining Processes for Manufacturing the Nozzle of a Medical Water Jet Machine, ACTA POLYTECHNICA HUNGARICA 12:(2) pp. 53-69. (2015)
3. Tibor Szalay, Karali Patra EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF MICRO DRILLING FOR DEVELOPING TOOL CONDITION MONITORING (TCM). In: János Kundrák, Géza Haidegger, István Gyurika (szerk.) Manufacturing'2012. Budapest, Magyarország, 2012.11.14-2012.11.16. pp. 1-4. Paper S6\_05. (ISBN: 978-963-9058-35-4)
4. Tibor Szalay, Karali Patra, Balázs Zsolt Farkas: Experimental Investigation of Tool Breakage in Micro Drilling of EN AW-5083 aluminium, KEY ENGINEERING MATERIALS 581: pp. 119-124. (2014)
5. T Szalay, B Zs Farkas, V Csala, K Patra: INVESTIGATION ON MICRO DRILLING OF THE STAINLESS STEEL MATERIAL IN THE ASPECTS OF ENERGETICS AND TOOL WEAR, International Conference on Innovative Technologies: IN-TECH 2013. Budapest, Magyarország, 2013.09.10-2013.09.12. pp. 289-292.
6. Szalay Tibor, Czampa Miklós, Csala Vilmos, Farkas Balázs: Mikrofúró kopásának vizsgálatára és kiértékelésére kifejlesztett módszer, OGÉT 2014: XXII. Nemzetközi Gépészeti Találkozó Nagyszeben, Románia, 2014.04.24-2014.04.27. pp. 360-363.
7. Csala Vilmos: Mikro-fúrás szerszám állapot felügyeleti rendszerének tervezése, BME 2014. Diplomaterv
8. Tibor Szalay, Karali Patra: INVESTIGATION OF MICRO DRILLING FOR DEVELOPMENT OF TOOL CONDITION MONITORING SYSTEM, IN-TECH 2014: Proceedings of International Conference on Innovative Technologies. Portugália, 2014.09.10-2014.09.12. pp. 247-250.
9. István Bíró, Balázs Zsolt Farkas, Tibor Szalay: COMPARATIVE EVALUATION OF MACHINABILITY OF IRON-BASED MATERIALS AND TOOL WEAR IN MICRODRILLING, IN-TECH 2014: Proceedings of International Conference on Innovative Technologies. , Portugália, 2014.09.10-2014.09.12. pp. 139-142.
10. Szalay Tibor, Bíró István, Amit Kumar Jha, Karali Patra: Szerszámkopás becslése mikrofúrás esetén mesterséges neurális háló alkalmazásával, OGÉT 2014: XXII. Nemzetközi Gépészeti Találkozó. Konferencia helye, ideje: Nagyszeben, Románia, 2014.04.24-2014.04.27. pp. 355-359.

11. Patra K, Jha AK, Szalay T, Ranjan J, Monostori L: Artificial neural network based tool condition monitoring in micro mechanical peck drilling using thrust force signals, PRECISION ENGINEERING On-line First: pp. 1-16. (2017)
12. Újvári Zoltán: A MIKROFÚRÓ SZERSZÁMOK ÁLLAPOTFELÜGYELETE, BME 2014. TDK dolgozat
13. Dömötör Ferenc, Farkas Balázs Zsolt, Szalay Tibor, Újvári Zoltán: A mikrofűrő szerszámok állapotfelügyelete, The Publications of the MultiScience - XXIX. microCAD International Multidisciplinary Scientific Conference. Miskolc, Magyarország, 2015.04.09-2015.04.10. Paper D1-4. 8 p. (ISBN:978-963-358-061-5)