



---

Az Óbudai Egyetem lektorált folyóirata  
Peer-reviewed journal of the Óbuda University

Bányi Közlemények–Bányi Reports  
Az Óbudai Egyetem lektorált folyóirata

ISSN 2560-2810

<http://bk.bgk.uni-obuda.hu>

A folyóirat célja, hogy tudományos igényességgel közölje a legfrissebb kutatási eredményeket az anyagtudomány, gyártástechnológia, gépészet, mechatronika, informatika, biztonságstudomány, közlekedéstudomány, munkavédelem, ipari automatizálás, robotika, energetika, fenntartható technológiák, illetve a mérnöki tudományok egyéb kapcsolódó területeiről.

Megjelenés félévente, jellemzően magyar és angol, esetenként egyéb idegen nyelven. Konferenciákhoz és témákhoz kapcsolódóan különszámok, tematikus számok alkalmi jelleggel magyar, vagy idegen nyelven.

Szerkeszti a szerkesztőbizottság.

A szerkesztőbizottság elnöke	Rajnai Zoltán
Főszerkesztő	Drégelyi-Kiss Ágota
Vezető szerkesztő	Laufer Edit
Kötet szerkesztő	Czifra György
	Mikó Balázs
Tudományos szerkesztő	Lóránd Áron



## Tartalomjegyzék

Pethő Levente: Hagyományos és Ipar 4.0 alapú gyártócella összehasonlító elemzése hengeres fogaskerék példáján keresztül .....	1
Kardos Krisztián, Pirigyi Levente: Digitális átalakulás a CNC megmunkálásban – esettanulmányok a Siemens Mcenter platformon.....	9
Kalmár Zoltán: Mesterséges intelligencia módszerek a gyártástechnológiában.....	16
Burai István György: Prediktív karbantartás alkalmazása CNC megmunkálóközpontoknál az Ipar 4.0 környezetben .....	26
Hopka Brigitta, Farkas Gabriella: Additív gyártás integrálása az oktatásba az Ipar 4.0 és Minőség 4.0 szemléletében .....	31
Kantó Attila, Marosi Attila Csaba: Big Data feldolgozás teljesítményének vizsgálata hibrid felhőkörnyezetben: fájlformátumok és sávszélesség hatása.....	37
Váradai Zoltán: Kompetencia alapú munkahelyi alkalmasság vizsgálata.....	46
Mészáros Béla, Mikó Balázs, Laufer Edit: Fuzzy-alapú értékelési modell az 1.2379 szerszámacél forgácsolhatóságának vizsgálatára .....	52
Nagy Sándor: Fuzzy logikai alapú kapacitív szintmérő szenzorok széles hőmérséklet és nyomás tartományban működő állati hulladékfeldolgozó rendszerekhez .....	58
Ráczai Viktor Gergely, Mikó Balázs, Laufer Edit: Geometriai pontosság előrejelzése esztergálás esetén: ANFIS és lineáris regresszió összehasonlító modellezése .....	64
Amgad Naji Ali Ahmed, Dheyaalhaq Alkebsi, Radhwan Albouthaigy, György Györök: Optimizing PV System Performance with FLC and P&O MPPT Controllers Using SEPIC and Boost Converters .....	72

# Hagyományos és Ipar 4.0 alapú gyártócella összehasonlító elemzése hengeres fogaskerék példáján keresztül

Pethő Levente

Óbudai Egyetem, Székesfehérvár, Magyarország

[leventepetho3@gmail.com](mailto:leventepetho3@gmail.com)

**Összefoglalás** - A dolgozat célja egy hagyományos gyártósor és egy Ipar 4.0 szemléletű gyártócella összehasonlítása. A vizsgált munkadarab egy hengeres fogaskerék, amely három különböző típusban készül (eltérő átmérők és fogszámok), mindhárom alumínium anyagból. A kutatás a termelékenység, rugalmasság, minőség és költséghatékonyság szempontjait vizsgálja; továbbá bemutatja az Ipar 4.0 elemek (szenzorok, adatelemzés, automatizált folyamatvezérlés) bevezetésének hatását a gyártási folyamatokra.

**Kulcsszavak:** Ipar 4.0, gyártócella, fogaskerék, összehasonlítás, összehasonlító vizsgálat

**Abstract** — The aim of this thesis is to compare a traditional production line with an Industry 4.0-oriented manufacturing cell. The examined workpiece is a cylindrical gear produced in three different variants (with different diameters and tooth counts), all made from aluminium. The research evaluates productivity, flexibility, quality and cost-efficiency, and also examines the impact of introducing Industry 4.0 elements—such as sensors, data analytics and automated process control—on manufacturing operations.

**Keywords:** Industry 4.0, manufacturing cell, gear, comparison, COMPARATIVE ANALYSIS

## 1 BEVEZETÉS

A publikáció elsődleges célja, hogy összehasonlító elemzést adjon a hagyományos és az Ipar 4.0 standardnak megfelelő gyártási rendszerekről. A tanulmány fókuszában a két egymástól eltérő szemléletű gyártórendszerek működési elveinek, eszközeinek és szervezési logikájának összevetése áll. A később taglalt vizsgálatban kitérve különböző alkalmazhatósági környezetekre, előnyökre és kihívásokra egyaránt.

Fontos hangsúlyozni, hogy a dolgozat nem arra törekszik, hogy rangsort teremtsen a két megközelítés között és nevesítse, hogy melyik a jobb vagy rosszabb a másikkal. A kutatás célja sokkal inkább az, hogy azonosítsa azokat a gyártási környezeteket és feltételeket, ahol az egyik vagy másik rendszer nagyobb előnyöket kínál.

Az irat célkitűzése, hogy gyakorlati szempontból mutasson rá, hogy milyen tényezők befolyásolják egy adott rendszer előnyösségét és milyen kompromisszumokkal, kihívásokkal kell számolni egy gyártási stratégia kiválasztásakor. Ezen keresztül feltett célja, hogy

támogatást nyújtson mindazon diákok és tanárok számára, akik a gyártási rendszerek fejlesztésével, tervezésével vagy optimalizálásával foglalkoznak.

Hagyományos gyártási rendszer alatt a továbbiakban azokat a termelési struktúrákat értjük, amelyek nem, vagy csak részben támaszkodnak digitális technológiákra. Ebben az esetben általános elmondható, hogy az automatizálás mértéke alacsonyabb, az emberi munka szerepe meghatározóbb, a döntéshozatal pedig emberek által, tapasztalati úton történik. Példaként említhetőek a klasszikus gépsorok, manuális vagy félautomata munkafolyamatok, valamint a nagyon egyszerű vezérléssel működő gyártócellák.

Ezzel szemben az Ipar 4.0 alapú rendszerek integrált, digitalizált és gyakran önszerveződő gyártási környezetet jelentenek. Ezekről a gyártócellákról, -sorokról elmondható, hogy a különböző eszközök kommunikálnak egymással, adatokat gyűjtenek és dolgoznak fel saját magukról és környezetükről, valamint előre meghatározott algoritmusok alapján képesek döntéseket hozni. A rendszereknek célja, hogy csökkentsék az emberi beavatkozás szükségességét, ezáltal a hibákat minimalizálják és optimalizálják a gyártási hatékonyságot.

A dolgozat részeként konkrét, az általam tervezett példákön keresztül kerül bemutatásra, hogy milyen jellemzőkkel rendelkeznek a különböző rendszerek, valamint hogyan lehet őket optimalizálni. Külön figyelemben részesülnek az ember-gép együttműködés formái és az adatalapú döntéshozatal szerepe.

## 2 IPAR 4.0 FOGALMA ÉS ALAPJAI

Az Ipar 4.0, vagy más néven a negyedik ipari forradalom, az ipari termelés fejlettségének új szintjét jelöli. A fogalom először 2011-ben jelent meg Németországban, a Hannover Messe kiállításon, ahol az ipar jövőjét meghatározó fejlesztési irányként határozták meg. Azóta globálisan elterjedt, és mára az ipari fejlesztések és innovációk egyik központi fogalmává vált.

Az Ipar 4.0 lényege a fizikai és digitális rendszerek összekapcsolása, amely során a gyártósorok, gépek, szenzorok és informatikai rendszerek intelligens, hálózatba kapcsolt egységekké válnak. Ezek a rendszerek nem csupán adatokat gyűjtenek, hanem képesek azok valós idejű elemzésére és a gyártási folyamatok automatikus

optimalizálására is. Az Ipar 4.0 alapvetően támaszkodik olyan technológiákra, mint a dolgok internete (IoT), a mesterséges intelligencia (AI), a gépi tanulás, a felhőalapú rendszerek, a robotika, a kibernetikai rendszerek (CPS), valamint a Big Data analitika.

Egy Ipar 4.0-kompatibilis gyártórendszerben a gépek képesek kommunikálni egymással, döntéseket hoznak és alkalmazkodnak a változó körülményekhez. A rendszerek közötti szoros integráció révén a termelés rugalmasabbá, gyorsabbá és költséghatékonyabbá válik, gyártott termék tulajdonságaitól függően. Ez különösen fontos a mai, gyorsan változó piaci környezetben, ahol a személyre szabott, kis szériás termékek előállítása egyre inkább háttérbe kerül.

Az Ipar 4.0 célja nem pusztán a termelés automatizálása, hanem egy intelligens, adaptív és előrelátó rendszer kialakítása, amely képes önállóan reagálni a váratlan eseményekre, hibákra vagy megrendelés-változásokra. Ez jelentős mértékben csökkenti az emberi beavatkozás szükségességét, miközben növeli a gyártás hatékonyságát és minőségét.

Fontos azonban megjegyezni, hogy az Ipar 4.0 nem csupán technológiai újítás, hanem szemléletváltás is. Egy olyan komplex ökoszisztéma, amelyben a gyártás mellett a logisztika, a karbantartás, a minőségbiztosítás, terméktervezés is digitalizált, adat vezérelt módon történik. Ehhez nem csak új technológiák, hanem új kompetenciák, képzetek és vállalati kultúra is szükséges.

Az Ipar 4.0 bevezetése tehát nem univerzális recept, hanem egy folyamat, amely minden vállalatnál eltérő módon és ütemben történik. A bevezetés sikere nagymértékben függ a meglévő infrastruktúrától, a humán erőforrástól, a pénzügyi lehetőségektől, valamint a menedzsment stratégiai elköteleződésétől. [1] [2]

### 3 GÉP ÉS EMBER KAPCSOLATA A GYÁRTÁSBAN

Az ipari automatizálás célja, hogy a termelési folyamatokat gyorsabbá, kiszámíthatóbbá és költséghatékonyabbá tegye. Automatizálás során olyan emberi feladatokat helyettesítünk gépekkel, amelyek jellemzően ismétlődőek, pontosan meghatározhatók és nem igényelnek kreatív vagy intuitív döntéshozatalt.

Mitől lesz egy feladat automatizálható?

Egy feladat automatizálhatóságát több tényező határozza meg. Alapvető feltétel, hogy a feladat pontosan definiálható legyen: világos lépésekből álljon, mérhető bemenetekkel és elvárható kimenetekkel. Például egy csavar behajtása, egy alkatrész pozicionálása vagy egy egyszerű minőségellenőrzés relatív könnyedséggel automatizálható folyamatok lehetnek. Emellett fontos, hogy a környezet stabil és jól szabályozható legyen – például zárt gyártócellákban kevesebb a külső zavaró tényező, így könnyebb automatizált rendszert tervezni.

*Miben jók az automatizált sorok?*

Az automatizált gyártósorok kiválóan teljesítenek az olyan területeken, ahol nagy mennyiségű, standardizált termék előállítása a cél. Előnyük a nagy sebesség, a kiváló ismétlődőképesség, a kedvező hibaarány és a munkavállalók fizikai terhelésének csökkentése. A modern rendszerek már képesek önálló diagnosztikára, előrejelzésre (pl. karbantartás szükségessége), valamint a gyártási paraméterek dinamikus módosítására is.

*Mit nem lehet helyettesíteni gépekkel?*

A gépek kiválóan működnek szabályalapú feladatok esetén, azonban még mindig kihívást jelent számukra az összetett emberi készségek helyettesítése. Ilyenek például a komplex döntéshozatal, a rugalmasság, az érzelmi intelligencia, vagy a kreativitás. Problémamegoldó képesség, hirtelen fellépő zavarok kezelése vagy egy új folyamat gyors adaptálásának esetén az ember még mindig felülmúlja a gépeket. Emellett a gépek nem képesek erkölcsi, etikai vagy szociális szempontok mérlegelésére, ami bizonyos helyzetekben elengedhetetlen lehet.

*Mi az ember szerepe egy automatizált közegben?*

Egy modern, Ipar 4.0-kompatibilis gyártási környezetben az ember szerepe átalakul, de nem szűnik meg. A fizikai munkavégzés helyett a felügyelet, az irányítás, az adatértelmezés, a döntéshozatal és a fejlesztés kerül előtérbe. Az ember feladata többek között a rendszerek karbantartása, optimalizálása, vagy épp a gyártási rendellenességek okainak feltárása. Az operátorok szerepe így fokozatosan átalakul. Hagyományos gépkezelés helyett vagy mellett már további készségekre is szükségük lesz, ezáltal további oktatásban kell részesülniük. Mindezek mellett általános szemléletváltásra is szükség lesz, hogy befogadóbbak legyenek a munkavégzésükhöz tartozó adatok értelmezéséhez és felhasználáshoz.

Összességében elmondható, hogy a gépek és emberek nem egymás versenytársai, hanem kiegészítói a modern gyártásban. Míg a gépek az ismétlődő, strukturált feladatokat végzik tökéletes pontossággal, addig az emberi szerep az intelligens döntéshozatalban, a rendszer egészének megértésében és az innovációban válik kulcsfontosságúvá. [3] [4]

### 4 MUNKADARAB GYÁRTÁSA

A dolgozat összehasonlító elemzése egy hagyományos és egy Ipar 4.0 követelményeinek megfelelő gyártócella vizsgálatán keresztül valósul meg. A két rendszer működésének bemutatásához olyan munkadarab került kiválasztásra, amely egyaránt gyártható a klasszikus, kevésbé automatizált eszközökkel, valamint az intelligens, adat vezérelt gyártási környezetekben is.

A választott munkadarab egy fogaskerék, amely gyakori gépelem rengeteg szerkezetnek. Jellemző gyártási műveletei közé tartozik az esztergálás, fogazás (például dörzsárazás vagy marás), furatmegmunkálás, valamint a végső minőségellenőrzés. A fogaskerekre pontos

kialakítása kulcsfontosságú a gépelemek zavartalan működése szempontjából, ezért az alkatrész jól szemlélteti azokat a folyamatokat, ahol a gyártási precizitás és a hibamentesség kiemelt követelmény.

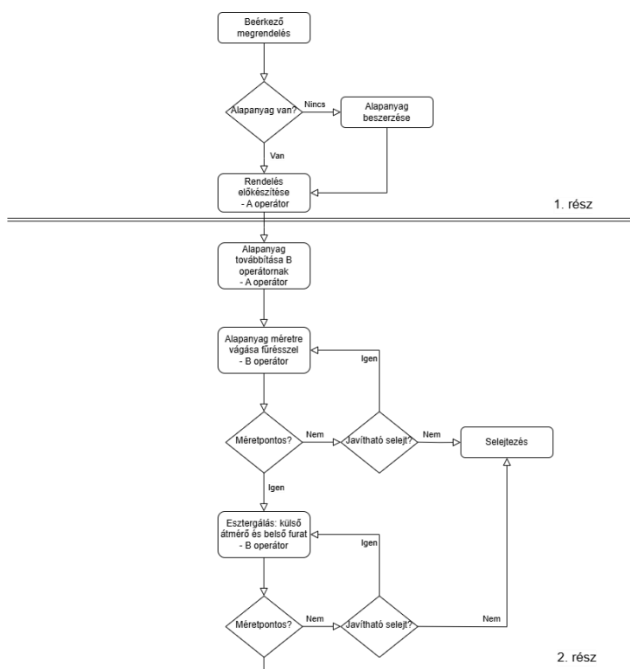
A vizsgálat hat különböző típusú fogaskerék gyártására terjed ki, amelyek az alábbi jellemzőkben térnek el:

- Külső átmérő (Ø40 mm, Ø60 mm, Ø80 mm)
- Fogszám (20, 30, 40 fog)

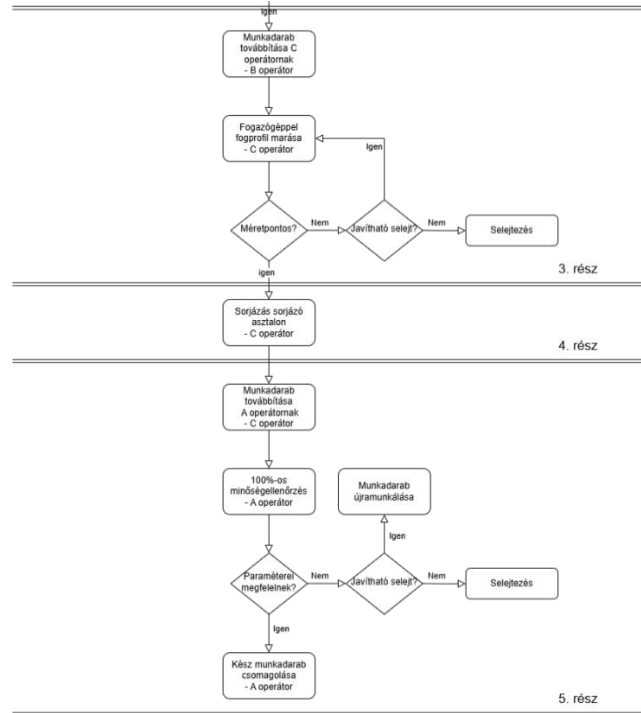
A három típus kezelésének képessége biztosítja, hogy a gyártósorok rugalmassága, átállíthatósága és termelési stratégiája összehasonlítható legyen. Elemezhetővé teszi, hogy milyen lépések szükségesek az egyes típusok gyártásához a két különböző gyártási rendszerben, és hogy miként különböznek ezek hatékonyság, kezelhetőség, adatkezelés és emberi erőforrás-igény szempontjából.

A gyártási rendszer célja nem pusztán az alkatrészek előállítását, hanem az, hogy rávilágítson arra, mikor előnyösebb a hagyományos megközelítés, és mikor érdemes az Ipar 4.0 lehetőségeit kihasználni. A vizsgálat nem egyértelműen egy „jobb” vagy „rosszabb” rendszert kíván megnevezni, hanem azt keresi, melyik megközelítés milyen gyártási helyzetben kínál több előnyt.

## 5 HAGYOMÁNYOS GYÁRTÁS FOLYAMATA



5.1a Ábra: Hagyományos gyártás folyamata



5.1b Ábra: Hagyományos gyártás folyamata

A hagyományos gyártócella lineárisan, egymást követő műveleti lépésekre épül, amelyeket különálló gépeken vagy munkaállomásokon végeznek el. A munkadarabot az operátor mozgatja egyik géptől a másikig, miközben minden műveletet kézi beállítással és felügyelettel indítanak el.

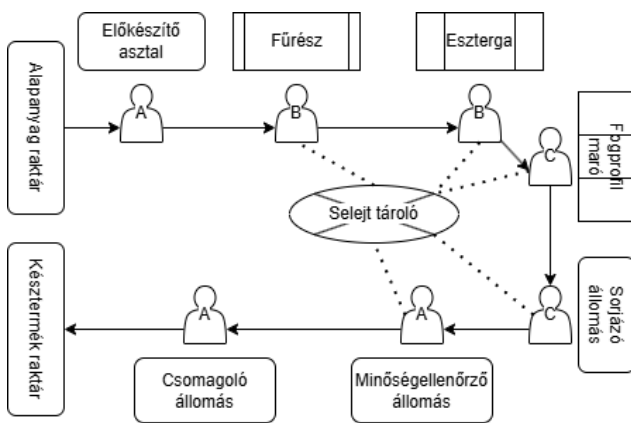
A folyamat során kevés, vagy egyáltalán nincs gépek közötti adatkommunikáció, a termelési állapotok nyomon követése általában egyszerűsítve, táblázatokkal vagy szóbeli jelentéssel történik. Gyártás végeztével jellemzően digitális rendszerben vezetve van a legyártott jó darabszám, keletkezett selejt és újramunkálendő termékek mennyisége.

Ez, az általam készített folyamatábra (6.1 Ábra) csak egy lehetőség a sok közül, mely segítségével megvalósítható a fogaskerekek gyártása.

Folyamat fő lépései:

1. Alapanyag előkészítés: rúdanyag darabolása kézi vagy félautomata fűrészsel.
2. Esztergálása a külső átmérőnek és a belső furat elkészítése.
3. Fogazás elkészítése fogprofil maróval.
4. Keletkezett sorja eltávolítása kézzel.
5. Minőségellenőrzés választott módon: tolómérővel, mikrométerre, idomszerrel.
6. Alkatrész kézi mozgatása a folyamatok között.

## 6 HAGYOMÁNYOS GYÁRTÁS BLOKKSÉMÁJA



6.1 Ábra: Hagyományos gyártás blokk-sémája

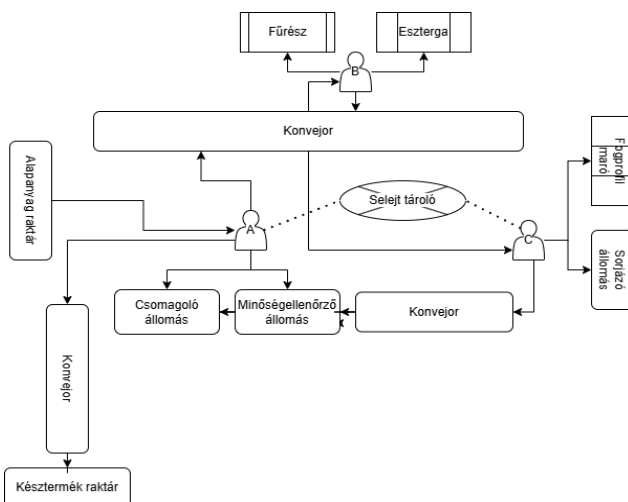
A hagyományos gyártócella blokk-sémája egy egyszerű, lineárisan felépített elrendezést követ, amelyben az egyes munkaállomások sorban követik egymást (például: 6.1 Ábra). A kialakítás fő célja a műveleti sorrend követése, az operátorok mozgásának egyszerűsége és a gyártás átláthatósága. Az anyagáramlás balról jobbra történik. A cella tervezéséből adódóan 2-3 operátor van jelen, beosztásuk a gyakorlatuk alapján szabadon változtatható.

Az operátorok feladatkörei ebben a struktúrában:

1. Munkadarab előkészítés.
2. Megmunkáló gépek kézi vezérlése, felülvizsgálata.
3. Minőségellenőrzés.
4. Karbantartási tevékenységek.
5. Dokumentáció vezetése a gyártásról, manuálisan.
6. Kommunikáció a többi operátorral.

## 7 HAGYOMÁNYOS GYÁRTÁS BLOKKSÉMA ALTERNATÍVÁK

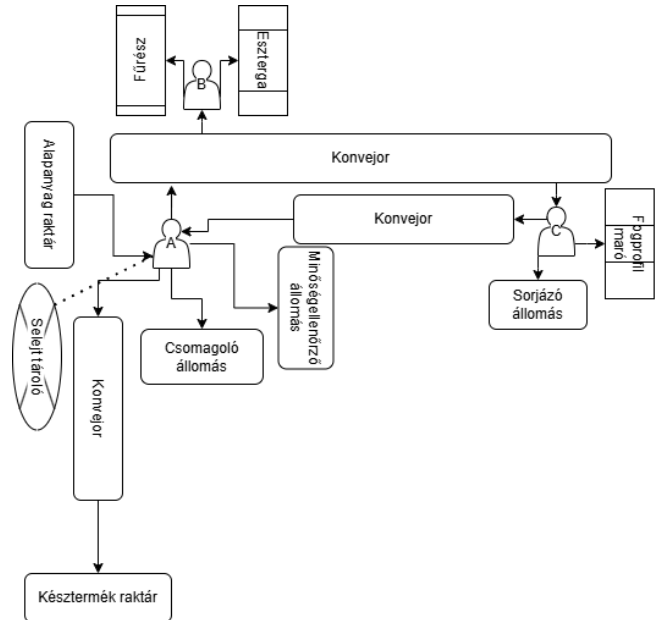
A dolgozat egy hagyományos gyártócella konstrukcióját részletesen ismerteti az előző fejezetben (6 fejezet, 6.1 ábra). Fontos azonban kiemelni, hogy egy ilyen gyártási struktúrát számtalan módon meg lehet alkotni.



7.1 Ábra: Hagyományos gyártás példája 1



7.2 Ábra: Hagyományos gyártási példája 2



7.3 Ábra: Hagyományos gyártási példája 3

Ezek a blokk-sémák ezt hivatottak jelképezni (8.1, 8.2, 8.3 ábrák) a hagyományos gyártás nem egy kötött, sablonos struktúra, hanem rugalmasan igazítható megannyi féle gyártási környezethez. Az elrendezés módja azonban közvetlen hatással van a hatékonyságra, ciklus időre és a munkaszervezésre is, így a megfelelő konfiguráció tervezése kulcsfontosságú lépés a gyártás szervezése során.

## 8 IPAR 4.0 GYÁRTÁS FOLYAMATA

Az Ipar 4.0-nak megfelelő gyártócella tervezése közben a legmodernebb technológiákból indultam ki, a hatékony, rugalmas és teljesen automatizált termelés elérése érdekében. A cella jellemzőit és a cella fő részeit is hét részre bontottam szét.

A gyártási folyamat fő jellemzői:

1. Digitális gyártási igény fogadása (pl. MES vagy ERP rendszerből) A gyártócella egy magasabb szintű vállalati rendszerből kapja a gyártási parancsot, amely tartalmazza a munkadarab típusát, darabszámot, prioritást és határidőt.
2. Munkadarab azonosítása és előkészítése (RFID). A beérkező alumínium fogaskerék nyersdarab RFID címkével van ellátva. A cella bejáratánál található szenzorok és olvasók segítségével automatikusan beazonosításra kerül a munkadarab típusa.

3. Automatizált **megfogás és adagolás** (robotkar). Egy ipari robotkar megfogja a nyersanyagot vagy munkadarabot és a megfelelő megmunkáló állomásra helyezi azt. Annak érdekében, hogy a robot minden munkaállomást ki tudjon szolgálni egy 7. tengelyen csúszik.
4. **Megmunkálási folyamat** (CNC, automatizált maró/eszterga gép). A munkadarabot a gép automatikusan beállítja a programozott paraméterek alapján. A gyártás során valós idejű szenzoradatok segítik az optimális működést.
5. **Minőségellenőrzés** (kamera alapú automatikus ellenőrzés). A munkadarab gyártását követően egy automatikus ellenőrző állomás méret-, súly- és felületellenőrzést végez. A rendszer azonnal képes felismerni és kiszűrni a hibás darabokat. Minden adatot egy „etalon” darabhoz hasonlítva értékeli és a folyamat végén „OK” vagy „NOK” jelzést ad. A kamera megfelelő működéséhez elengedhetetlen, hogy a munkadarab jól legyen pozicionálva.
6. **Adatgyűjtés és visszacsatolás** (IoT + felhő alapú adatkezelés). A gyártási és ellenőrzési adatokat szenzorok gyűjtik össze, és egy felhőalapú rendszer tárolja azt. Ezek az adatok lehetővé teszik a prediktív karbantartást, a hatékonyság elemzését, valamint a gyártási paraméterek finomhangolását.
7. Késztermék **tárolása és visszajelzés** a rendszernek. A hibátlan munkadarabok automatikusan egy tárolórendszerbe kerülnek, miközben a gyártócella visszajelzést küld a központi rendszer felé a folyamat lezárásáról és a termék állapotáról. Hasonló alapon jár el a selejtezéssel is. Fontos adat, hogy melyik munkafolyamat után mikor, mennyi selejt keletkezett. Ezekből az adatokból egyszerűen vizsgálható a termelési egység gazdaságossága és esetleges beavatkozás szükségessége is könnyen megállapítható.

A gyártási folyamat fő részei:

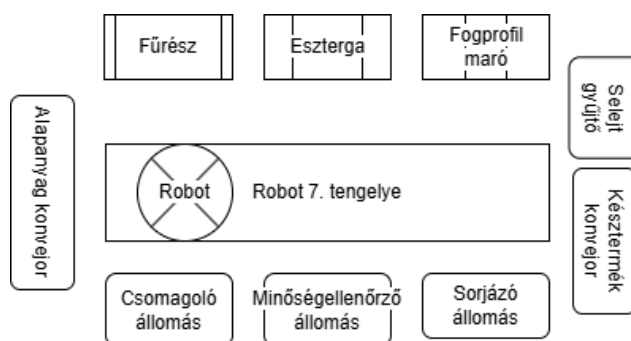
1. Rendelésfeldolgozás.
2. Fűrészelés folyamata.
3. Esztergálás folyamata.
4. Marás folyamata.
5. Sorjázás folyamata.
6. Minőségellenőrzés folyamata.
7. Csomagolás folyamata.

További folyamatként említhető, de nem külön tagolt a robot alapanyag, munkadarab, valamint késztermék szállítási folyamata.

Ezen munkafolyamatokhoz tartozó ciklusdiagrammok a csatlományok között találhatóak, terjedelmük miatt. (9.1, 9.2, 9.3, 9.4, 9.5, 9.6, 9.7 Ábra)

## 9 IPAR 4.0 GYÁRTÁS BLOKKSÉMÁJA

Az Ipar 4.0 alapelveinek megfelelő gyártócella elrendezése nem csak a termelékenység maximalizálását célozza, hanem az intelligens, valós idejű adatkapcsolatok biztosítását is. A felülnézeti rajz (10.1 Ábra) tervezésénél figyelembe vettem, hogy minden a folyamatábrán megfogalmazott paraméternek meg tudjon felelni a cella.



9.1 Ábra: Ipar 4.0 gyártócella blokk-sémája

A rendszer egyik legnagyobb előnye a modularitás és az intelligens irányítás: a cella képes alkalmazkodni a gyártási igények változásaihoz anélkül, hogy hosszabb leállásra vagy manuális beavatkozásra lenne szükség. Emellett a folyamatos adatgyűjtés lehetővé teszi a prediktív karbantartást és a gyártás optimalizálást, amely jelentős versenyelőnyt biztosít.

A gyártócella fő elemei:

1. Alapanyag konveor. A cella alapanyag ellátásáért felelős része.
2. Fűrész. Automatán működő fűrész, amely az alumínium rudakat képes pontosan méretre vágni.
3. Eszterga. A külső átmérőt és a belső furatot képes automatán kialakítani.
4. Fogprofil maró. A fogprofil automatán történő kialakítására alkalmas berendezés.
5. Sorjázó állomás. A megmunkálást követően ott maradt sorját képes teljesen automata módon eltávolítani a felületről.
6. Minőségellenőrző állomás. Egy kamera segítségével képes méret és alak hibákat detektálni, automata módon.
7. Csomagoló állomás. A már vevő számára jó termék lecsomagolásáért felelős állomás.
8. Késztermék konveor. A késztermék ezen a konveor szakaszon távozik a raktár felé.
9. Selejt gyűjtő. Egy konténer vagy doboz, melybe a selejteket szórja a rendszer.
10. Ipari robot kar, mely a rendszer lelkét adja.
11. Robot 7. tengelye. A robot mozgását biztosítja, hogy mindegyik munkaállomást el tudja érni.

Ezekkel az elemekkel az alumíniumból készült hengeres fogaskerék gyártására lehetőség nyílik, egy modern és megbízható módon.

Az operátor szerepe ilyen környezetben majdnem teljesen átalakul a hagyományos gyártáshoz képest. A cella

effektív támogatásához szemlélet váltásra és más típusú tudásra van szükség.

Az operátorok feladatkörei ebben a gyártási környezetben:

1. Rendszerfelügyelet.
2. Adatkezelés és értelmezés.
3. Gyártási programok kezelése.
4. Beavatkozás rendellenesség esetén.
5. Karbantartási feladatok ellátása, visszajelzés alapján.

#### 10 IPAR 4.0 GYÁRTÓCELLA KOMMUNIKÁCIÓS ARCHITEKTÚRÁJA

Az Ipar 4.0 szemléletű gyártócella egyik legfontosabb jellemzője a gépek, rendszerek és emberek közötti valós idejű adatkommunikáció. Ebben a fejezetben bemutatásra kerülnek a cella fő technológiai szereplői és a kapcsolási pontok.

Ahhoz, hogy a folyamat minden lépése pontosan nyomon követhető legyen, mindegyik elemének kommunikálnia kell egymással és egy központi rendszerrel. Ezt a fajta adatmegosztást többféle szenzor, eszköz támogatja és rengeteg kifinomult rendszer létezik az adatok feldolgozására.

A gyártósori példában a kommunikáció középpontjában a robot áll, hiszen minden állomás visszajelzéssel van állapotáról a robot felé. A rendszer ezeket a kommunikációkat rögzíti, hogy amennyiben valamelyik adat fals és a struktúra szerkesztésének igénye felmerül, könnyen lehessen javítani.

Kommunikációs felek:

1. Adatbázis
  - a. Az adatbázisban rögzítésre kerülnek a meghibásodások. Amennyiben az egyik állomáson zavar lép fel, a többi felé ezt kommunikálni kell, annak érdekében, hogy a gyártást fel lehessen függeszteni.
  - b. Amennyiben a rendszer túrésen túli értékeket produkál erről visszajelzést kell küldenie az operátornak.
  - c. Minden legyártott termék RFID-ját és a hozzá tartozó adatokat könyvelnie kell. Legyen az adott végtermék vevőnek megfelelő, újra munkálandó vagy selejt.
2. Alapanyag konvektor
  - a. Adatbázis. – Kinyert adatból indítja el az alapanyag szállítását és állítja meg a folyamatot, amennyiben az alapanyag a végállás szenzort eléri.
  - b. Robot. – A robotnak szükséges tudnia, hogy az alapanyag az előre meghatározott pozícióba ért.
3. Megmunkáló állomások
  - a. Adatbázis. – Az adatbázisban szerepelnie kell a szerszám állapotának, legalább megközelítő jelleggel. Könyvelve kell

lennie, hogy mikor, milyen típusú anyag került és hagyta el a munkaállomást, hogy annak a státusza visszakövethető, szükség esetén módosítható legyen.

- b. Robot. – A robotnak tudnia kell, hogy a munkaállomás mikor, milyen munka stádiumban van, lehetséges vagy sem a megközelítése és terhelése.
4. Minőségellenőrző állomás
    - a. Adatbázis. – Az állomásnak a kamerával készült képeket továbbítani kell az adatbázis felé. Eltérés esetén ez különösen fontos szerepet játszhat.
    - b. Robot. – A robotnak tudnia kell, hogy a munkaállomás mikor, milyen munka stádiumban van, lehetséges vagy sem a megközelítése és terhelése.
  5. Csomagoló állomás
    - a. Adatbázis. – A pontos lecsomagolt jó termékről információt kell nyújtania az állomásnak az adatbázis felé.
    - b. Robot. – A robotnak tudnia kell, hogy a munkaállomás mikor, milyen munka stádiumban van, lehetséges vagy sem a megközelítése és terhelése.
  6. Selejt gyűjtő
    - a. Robot. – Adatbázis kommunikáció. Abból kiindulva, hogy a robot hányszor mozdult el a selejt gyűjtőhöz megállapítható, hogy mennyi selejt termék képződött. Ennek következtében a selejt gyűjtőt nem kell további szenzorral felruházni.
  7. Robot 7. tengelye
    - a. Robot. – Folyamatos kommunikációnak kell lennie a robot és a tengely között, hogy a munkafolyamatok elvégezhetőek legyenek.

A szükséges adatáramlásnak nagyobb része PLC segítségével könnyedén megvalósítható. Fontos, hogy a kommunikáció valós idejű legyen. Az operátor szerepe a klasszikus irányításhoz képest jelentősen megváltozott: nem kizárólag a fizikai beavatkozást végez, hanem adatellenőrzést, hibakeresést, rendszerfelügyeletet is végrehajt.

Ez a hálózat lehetővé teszi az adat alapú döntéshozatalt, azonnali hibadetektálást, valamint a gyártási folyamat valós idejű optimalizálását, amely a hagyományos gyártósorok esetén nehezen vagy egyáltalán nem volt megvalósítható.

#### 11 FOLYAMATOK ÖSSZEHASONLÍTÁSA

A fejezet célja egy kibővített összehasonlító értékelést nyújtani a hagyományos gyártási folyamatmodell és az Ipar 4.0 alapú rendszerek között.

A hagyományos modell lényege, hogy a folyamat lineáris és szakaszos lépésekben halad, ahol a döntéshozatal és minőségellenőrzés elsődlegesen emberi operátorok kezében van. Ebben az esetben a munkafolyamatok során

az egyes szakaszokban köztes ellenőrzésre kerül sor: például a vágás, esztergálás vagy fogazás után manuális vagy épp az ellenőrzési pontokon vizsgálják a termékek paramétereit, és döntéseket hoznak arról, hogy szükséges-e újra munkálni vagy selejtezni. Az emberi tapasztalatra épülő modell előnye, hogy egy-egy különösen összetett helyzetben a szakképzett operátor gyors, helyzetfüggő beavatkozásokat képes végrehajtani. Ugyanakkor ez a megközelítés több hibalehetőséget is hordoz magában, mivel a manuális ellenőrzések gyakran késedelmesek, eltérő minőségi szintet eredményezhetnek, és a munkafolyamatok közötti koordináció nehézkessé válhat a folyamatos visszacsatolás hiánya miatt.

Az Ipar 4.0 alapú struktúra ugyanakkor olyan digitális és automatizált megoldásokkal ellátott rendszer, amelyek révén a gyártási folyamat nem csupán előre meghatározott lépésekben, hanem dinamikus, valós idejű adatáramlás és adatfeldolgozás alapján zajlik. A legmodernebb technológiák alkalmazása azt eredményezi, hogy az alapanyag- és készletgazdálkodás, valamint a gépi munkafolyamatok során bekövetkező eltérések már a termelés korai szakaszában azonosíthatóak, így a prediktív karbantartás és az intelligens döntéshozatal miatt a rendszer képes beavatkozni. A valós idejű minőségellenőrzés és az algoritmusok által folyamatosan nyomon követett adatok alapján a gyártás hatékonysága és a hibák korrigálásának ideje jelentősen csökken, ugyanakkor a rendszer magas szintű technológiai beruházást, valamint egy más típusú operátori szaktudást igényel.

A felvezetett szempontokból az összehasonlítás alapvetően két filozófia ütközését tükrözi: míg a hagyományos modell az emberi tényezőre, valamint a tapasztalati alapú, szakaszos visszacsatolásra épít, addig az Ipar 4.0 megközelítés a folyamatos adatáramlás, a prediktív analitika és az automatizált beavatkozások segítségével szeretné megszüntetni az emberi természetből adódó késedelmeket és hibalehetőségeket. Ez alapvetően a termelékenység, a minőségbiztosítás és a ciklus idő csökkentése mellett jelentős költségcsökkentést is eredményezhet hosszú távon. A hagyományos rendszer alkalmazása viszont rugalmasabb lehet olyan esetekben, amikor a környezet vagy a termék egyedi jellemzői miatt a standard automatizálási algoritmusok nem képesek optimális döntést hozni, így az emberi beavatkozás elengedhetetlennek bizonyul.

Továbbá, az Ipar 4.0 modell egyúttal lehetőséget teremt az integrált folyamatmenedzsment megvalósítására, ahol a gyártási ciklus minden szakasza – az alapanyag beérkezésétől a késztermék csomagolásáig – egy központi, összekapcsolt rendszer keretében működik. Erre példa az a folyamatrendszer is, amit a dolgozat részeként az előző fejezetekben kifejtésre került. Ez a rendszerszintű integráció nem csupán a termelési sebességet és a minőséget javítja, hanem hozzásegít a karbantartási és optimalizálási döntések korai előrejelzéséhez is, ami a későbbiekben a selejtes munkadarabok arányának csökkenéséhez vezethet. Ezzel szemben a hagyományos modell decentralizált, részrendszerek között kevésbé

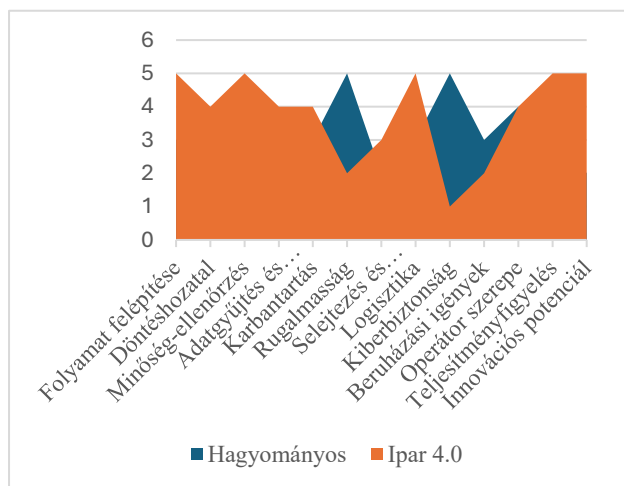
átlátható az adatáramlás, ami a hibák gyors felismerését és korrigálását nehezíti.

Végül soron az összehasonlító értékelés rámutat arra, hogy a digitális integráció révén működő Ipar 4.0 rendszerek hosszú távon versenyképesebbek, rugalmasabbak, és jelentős mértékben képesek csökkenteni az előre nem látható fennakadásokat. Ugyanakkor nem szabad figyelmen kívül hagyniuk az ebből fakadó magas beruházási költségeket és az átfogó kihívásokat. A hagyományos modell tapasztalat-alapú rugalmassága és az emberi döntéshozatal adaptivitása olyan helyzetekben használható, ahol az egyedi termelési igények megkövetelik a személyes beavatkozást. A jövő ipari rendszereiben valószínű, hogy a két megközelítés egymás mellett lesz alkalmazva: az automatizált, valós idejű adat vezérelt döntéstámogatás mellett megtartják a tapasztalt operátorok szerepét, akik a rendszer által generált riasztások és javaslatok felülvizsgálatával biztosítják a végtermék folyamatos megfelelését.

## 12 ÖSSZEHASONLÍTÁSI TÁBLÁZAT

Az összehasonlítási szempontok:

1. Folyamat felépítése
2. Döntéshozatal
3. Minőségellenőrzés
4. Adatgyűjtés és feldolgozás
5. Karbantartás
6. Rugalmasság
7. Selejtezés és hibakezelés
8. Logisztika
9. Kiberbiztonság
10. Beruházási igények
11. Operátor szerepe
12. Teljesítményfigyelés
13. Innovációs potenciál



12.1 Ábra: Összehasonlítási diagramm

A két modell összehasonlító vizsgálatának eredménye (12.1 Ábra) arra enged következtetni, hogy a jövő gyártási folyamatai egy integrált, hibrid megközelítést alkalmazzanak, amelyben a digitális technológiák és az emberi döntéshozatal kéz a kézben működnek. Ez a kombináció nemcsak a termelés hatékonyságát növeli, hanem hosszútávon a vállalatok innovációs és versenyképességi potenciálját is alapjaiban alakítja át.

### 13 ÖSSZEZEGÉS

A kutatás célja az volt, hogy egy konkrét munkadarabon keresztül összehasonlítsa a hagyományos és az Ipar 4.0 szemléletű gyártócellák működését, felépítését, valamint azok előnyeit és korlátait. A vizsgálat során világossá vált, hogy mindkét gyártási módszer rendelkezik olyan erősségekkel, amelyek bizonyos helyzetekben előnyösebbé tehetik az egyiket a másikkal szemben.

A hagyományos rendszerek egyszerűségük és jól bevált működésük révén még mindig megállják a helyüket alacsonyabb komplexitású, kis- vagy közepes szériaszámú gyártás esetén. Ezzel szemben az Ipar 4.0 technológiák – beleértve az automatizálást, a szenzorhálózatokat, a robotikát és az adatvezérelt döntéshozatalt – különösen előnyösek nagy szériaszámú, magas minőségi elvárásokat támasztó vagy gyakori átállításokat igénylő gyártási környezetben.

Fontos megállapítás, hogy az Ipar 4.0 nem kizárólag a technológiáról szól, hanem egyúttal szemléletváltást is jelent. Az emberi munka nem tűnik el, hanem átalakul: a fizikai tevékenység helyett egyre inkább a felügyeleti, rendszerszintű és döntéshozói szerepkörök kerülnek előtérbe. Ez új készségek és gondolkodásmód fejlesztését követeli meg az ipari munkavállalóktól.

A jövő gyártása tehát várhatóan a két megközelítés integrációjában rejlik – ahol a hagyományos rendszerek stabilitása és az Ipar 4.0 rugalmassága kiegészíthetik egymást. A folyamatos fejlődés és kutatás pedig elengedhetetlen annak érdekében, hogy az ipari szereplők valóban ki tudják aknázni a digitalizáció kínálati lehetőségeket.

A kutatómunka eredményei alapján lenne lehetőség egy olyan szoftver fejlesztésére, ami képes előre megadott paraméterek szerint eldönteni, kiértékelni, hogy az adott folyamat automatizálására műszaki és gazdasági lehetőség van-e. A rendszer figyelembe vehetné például a termelési volumeneket, a gyártott termékek varianciáját, az automatizáláshoz szükséges beruházási költségeket, a meglévő géppark állapotát, valamint az emberi erőforrás igényét is.

Egy ilyen döntéstámogató eszköz különösen hasznos lehetne azok számára, akik gyártási beruházások előtt állnak, és szeretnék megérteni, hogy a jelenlegi rendszer mely pontokon fejleszthető automatizálás útján, illetve milyen költség- és megtérülési mutatókkal lehet számolni. A szoftver alapját egy olyan értékelési modell képezhetné, amely súlyozva veszi figyelembe az egyes paramétereket (pl. darabszám, gépóráköltség, munkaerőköltség, átállítási idő, hibaarány), és ezek alapján javaslatot ad az automatizálás műszaki indoklásáról és gazdasági racionalitásáról.

A modell a gyakorlati alkalmazhatóság érdekében különböző gyártási környezeteket is figyelembe vehetne: például külön modul tartalmazhatna sorozatgyártásra és egyedi gyártásra optimalizált rendszerekre, eltérő szintű technológiai fejlettségi szinttel. Egy gyártócella szimulációján keresztül a felhasználó összehasonlíthatná a hagyományos és az Ipar 4.0 megközelítéssel működő alternatívákat, a becslött ciklusidők, munkaerőigények, selejtráták és megtérülési időszak alapján.

A dolgozatban vizsgált példák (pl. alumíniumból készült hengeres fogaskerek gyártása) is azt mutatják, hogy még egy látszólag egyszerű termék előállítására is többféle technológiai és szervezési megközelítést igényelhet. A választás gyakran nem egyértelmű, és számos kompromisszumot kíván: például lehet, hogy egy automatizált rendszer gyorsabb és pontosabb, de a beruházási költsége magas, és csak nagyobb szériaszám esetén térül meg. Egy ilyen szoftver pontosan ezekre a kérdésekre adhat választ, objektív és számításalapú döntéstámogatással.

A koncepció hosszú távon kiegészíthető lenne mesterséges intelligencia alapú tanulómóduddal is, amely korábbi gyártási adatok alapján finomítja az előrejelzéseket. Ezáltal a rendszer nemcsak az egyedi adatok kiértékelésére lenne képes, hanem tapasztalati úton, gépi tanulással javíthatná a javaslatait.

Összességében elmondható, hogy a jövő gyártási döntései nem kizárólag technológiai megérzéseken vagy tapasztalaton kell, hogy alapuljanak, hanem egyre inkább adatvezérelt, modellalapú értékelési rendszerekre támaszkodnak. Egy ilyen döntéstámogató szoftver hozzájárulhatna a hazai kis- és középvállalkozások versenyképességéhez is, hiszen strukturáltan segítené a gyártásfejlesztési lehetőségek felismerését és optimalizálását.

### 14 IRODALOMJEGYZÉK

- [1.] Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0. Final report of the Industrie 4.0 Working Group.
- [2.] Xu, X., Xu, X., Zheng, Y., & Liu, C. (2018). A survey of industrial Internet: A cyber-physical systems perspective. *IEEE Access*, 6, 78238–78259. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2884906>
- [3.] Rauch, E., Linder, C., & Dallasega, P. (2020). Anthropocentric perspective of production before and within Industry 4.0. *Computers & Industrial Engineering*, 139, 105644. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.01.018>
- [4.] Groover, M. P. (2015). *Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing* (4th ed.). Pearson.
- [5.] Brettel, M., Friederichsen, N., Keller, M., & Rosenberg, M. (2014). How virtualization, decentralization and network building change the manufacturing landscape: An Industry 4.0 Perspective. *International Journal of Information and Communication Engineering*, 8(1), 37–44.
- [6.] Lucke, D., Constantinescu, C., & Westkämper, E. (2008). Smart Factory – A Step towards the Next Generation of Manufacturing. *Manufacturing Systems and Technologies for the New Frontier*, Springer, 115–118.
- [7.] Mourtzis, D., Vlachou, E., & Milas, N. (2016). Industrial Big Data as a Result of IoT Adoption in Manufacturing. *Procedia CIRP*, 55, 290–295.
- [8.] Zuehlke, D. (2010). SmartFactory—Towards a factory-of-things. *Annual Reviews in Control*, 34(1), 129–138.

# Digitális átalakulás a CNC megmunkálásban – esettanulmányok a Siemens Mcenter platformon

Kardos Krisztián, Pirigyi Levente

evosoft Hungary Kft., Budapest, Magyarország

[krisztian.kardos@evosoft.com](mailto:krisztian.kardos@evosoft.com), [levente.pirigyi@evosoft.com](mailto:levente.pirigyi@evosoft.com)

**Összefoglalás** — Jelen publikáció célja, hogy valós ipari példákon keresztül bemutassa, mit jelentenek számunkra a gyakorlatban azok a gyakran emlegetett, sokszor divatszóként használt fogalmak, mint a digitalizáció, az Ipar 4.0 vagy az adatvezérelt gyártás. A Siemens Mcenter platformra épülő esettanulmányok révén feltárjuk, hogyan valósul meg a digitális transzformáció a CNC megmunkálás különböző szintjein, különös tekintettel a szerszámgépek életciklusának nyomon követésére, az NC programok kezelésére, valamint a termelékenységi mutatók valós idejű monitorozására. Arra is igyekszünk választ adni, hogy ezek az új technológiák és megközelítések milyen konkrét előnyöket kínálnak a gyártási folyamatok optimalizálásában. Szemléltetjük, hogyan segíti a digitalizáció a gépkezelők munkájának egyszerűsítését, a hibalehetőségek csökkentését, valamint az adatok gyors és megbízható elérhetőségét. Ezen túlmenően vizsgáljuk azt is, hogy a rendszeres adatgyűjtés és -elemzés hogyan járul hozzá a gépek kihasználtságának növeléséhez, illetve a döntéstámogatási folyamatok fejlesztéséhez. Az esettanulmányok révén rávilágítunk arra, hogy a digitalizáció nem csupán technológiai újítás, hanem szemléletváltás is, amely már rövid távon is versenyelőnyt biztosíthat a gyártóvállalatok számára.

**Kulcsszavak:** digitalizáció, Siemens Mcenter, adatvezérelt gyártás, CNC szerszámkezelés, NC programok követése

**Abstract** — The aim of this publication is to show, through real industrial examples, what commonly used terms such as digitalisation, Industry 4.0 and data-driven manufacturing mean in practice. Using case studies based on the Siemens Mcenter platform, we demonstrate how digital transformation is implemented at different levels of CNC machining, with a focus on tool-lifecycle tracking, NC program management and real-time productivity monitoring. We highlight the practical benefits these technologies offer for process optimisation, including simplified operator workflows, reduced error rates and fast, reliable data access. We also examine how continuous data collection and analysis improve machine utilisation and support better decision-making. The case studies show that digitalisation is not only a technological innovation but also a shift in mindset that can provide manufacturers with a competitive advantage even in the short term.

**Keywords:** digitalisation, Siemens Mcenter, data-driven manufacturing, CNC tool management, NC program tracking

## I BEVEZETÉS

A gyártóiparban zajló digitális átalakulás egyik kulcsterülete a CNC megmunkálás, ahol a hatékonyság, rugalmasság és adatvezérelt döntéshozatal egyre nagyobb szerepet kap. A hagyományos, papíralapú folyamatok és szigetzerű rendszerek már nem képesek kielégíteni a modern termelési környezet igényeit. Ebben a kontextusban jelent meg a *Siemens Mcenter*, amely egy olyan szoftverplatform, amit kifejezetten a CNC megmunkálás digitalizációjára terveztek.

Az Mcenter célja, hogy biztonságos, kétirányú kommunikációt biztosítson a gépvezérlők és az IT-rendszerek között, valamint integrálja a különböző gyártóeszközökből származó adatokat. A platform nem csupán Siemens vezérlőkkel kompatibilis, hanem nyitott interfészek révén más gyártók gépeit is képes bekapcsolni a digitális ökoszisztémába. Ez különösen fontos a vegyes gépparkkal rendelkező üzemek számára.

Az Mcenter egyik legnagyobb előnye a moduláris alkalmazáskínálat, amely lefedi a kulcsfontosságú gyártási folyamatokat. A *Manage MyResources /Tools (MMR /T)* modul például a teljes szerszám-életciklus kezelését támogatja, biztosítva az átláthatóságot és a megfelelő szerszám rendelkezésre állását. A *Manage MyResources /Programs (MMR /P)* lehetővé teszi az NC programok verziókövetett kezelését, míg az *Analyze MyPerformance /OEE (AMP /OEE)* a termelési gépadatok elemzését segíti elő. Ezek az alkalmazások hozzájárulnak a termelékenység növeléséhez, a hibák csökkentéséhez és a karbantartási folyamatok optimalizálásához.

Az Mcenter nem csupán adatgyűjtő, hanem valós idejű betekintést nyújt a gépek állapotába és a termelési hatékonyságba, ezzel alapot teremtve az adatvezérelt döntéshozatalhoz és a prediktív karbantartáshoz.

Az ipari gyártás az elmúlt évtizedben olyan mértékű változáson ment keresztül, amelyet sokan a negyedik ipari forradalomként, vagyis az Ipar 4.0 korszakaként emlegetnek. A digitalizáció, az adatközpontú gyártás és a hálózatba kapcsolt rendszerek ma már nem csupán elméleti fogalmak, hanem a mindennapi termelés meghatározó elemei. Ugyanakkor a gyakorlatban gyakran felmerül a kérdés: mit jelentenek ezek a kifejezések a CNC megmunkálás világában, és milyen konkrét előnyöket kínálnak a gyártóvállalatok számára?

A válasz nem egyszerű, hiszen a digitalizáció nem egyetlen technológia bevezetését jelenti, hanem egy átfogó szemléletváltást, amely a teljes gyártási folyamatot érinti. A cél nem csupán az adatok gyűjtése, hanem azok értelmezése és felhasználása a hatékonyság növelése, a hibák csökkentése és a döntéshozatal támogatása érdekében. Ebben a kontextusban különösen fontos

szerepet kapnak azok a platformok és megoldások, amelyek képesek integrálni a különböző gyártási szinteket, és valós idejű információt biztosítani a felhasználók számára.

## 2 ESETTANULMÁNYOK

Minden gyár más és más: eltérő géppark, termelési volumen, szervezeti struktúra és infrastrukturális háttér határozza meg a lehetőségeket és a kihívásokat. Éppen ezért nem létezik univerzális recept sem a magas fokú digitalizáltság elérésére. Az egyes üzemekben megfogalmazott igények mindig a termelés helyi sajátosságaihoz igazodnak, így a megoldások is eltérőek – gyakran még egyazon vállalat különböző telephelyei között is.

A továbbiakban olyan konkrét, valós projekt megbízásokat mutatunk be, ahol ügyfeink problémáira az Mcenter egyes funkcióinak bevezetése adott választ. Látni fogjuk, hogy ezek nem valami absztrakt elmélet homályos konstrukciói, hanem nagyon is konkrét, kézzelfogható kihívásokra adott válaszok. A legtöbb esetben olyan jól körülírható problémákról van szó, amelyek visszatérő mintázatokat követnek a különböző üzemekben, így azok egyediségének ellenére is lehetséges standard alapokra épülő megoldások szállítása.

A következő fejezetekben saját, gyakorlati tapasztalatainkat osztjuk meg: egyéni nézőpontunkon keresztül bemutatjuk, hogyan talákoztunk ezekkel a problémákkal, milyen döntési folyamatok vezettek a választott megoldásokhoz, és milyen kézzelfogható eredményeket értünk el az Mcenter funkcióinak bevezetésével.

### 2.1 Esettanulmány: Papírmentes szerszámadat-kezelés

A CNC megmunkálás területén a szerszámadatok pontos és megbízható kezelése alapvető fontosságú a termelékenység, a minőség és a gépbiztonság szempontjából. Hagyományos környezetben a szerszámgometriai adatok papíralapú etikett címkéken jutnak el a szerszámgépekhez, ahol a gépkezelő manuálisan viszi be az értékeket a vezérlőbe. Ez a módszer nemcsak időigényes, hanem jelentős hibakockázatot is hordoz: egyetlen elütött számjegy szerszámtörést vagy géptükrözést okozhat, ami komoly károkat és termelésekiesést eredményezhet. Az ipari digitalizáció lehetőséget teremt arra, hogy ezt a folyamatot teljesen automatizáljuk, kizárva az emberi tényezőt az adatáramlásból.

Az egyik nagy ügyfelünknel a digitalizált szerszámkezelés bevezetésének részeként kaptuk azt a konkrét részfeladatot is, hogy a folyamatból eltüntessük az etikett címkéket, ezáltal mintegy kikényszerítve az adattovábbítás teljesen digitális módját.

A Siemens Mcenter platform és az MMR /T alkalmazás bevezetése révén a szerszámok teljes életciklusa digitálisan nyomon követhetővé válik. A megoldás alapja, hogy minden egyes összeszerelt szerszámot egyértelműen azonosítani lehessen az adott üzemben. Ez biztosítja, hogy minden szerszámpéldányhoz hozzárendelhetőek a releváns adatok, és ezek az információk minden állomáson elérhetőek legyenek. Az azonosítót hordozó fizikai

megvalósításra sokféle megoldás létezik – a szükséges beruházás mértékének, illetve a funkciók és az infrastruktúra komplexitásának széles spektrumát lefedve. Néhány példa a teljesség igénye nélkül: az alaptartóba gravírozott karakterlánc, kétdimenziós kód, vagy RFID chip. Az MMR /T szempontjából bármelyik megfelel a célnak, feltéve, hogy minden érintett állomáson rendelkezésre áll a megfelelő olvasó eszköz.



1. ábra: Etikett címkék a szerszámokon

A folyamat az igény beérkezésével kezdődik. A szerszámot összeszerelik, majd a tartó azonosítóját beolvassák, és hozzárendelik a szerszámtípust, így létrejön a fizikai szerszám digitális megfelelője az Mcenter rendszerben.

A következő lépésben a szerszám a bemérő gépbe kerül, ahol a mérési feladat az Mcenter integrációval keresztül indítható. A mért geometriai adatok automatikusan, emberi közbeavatkozás nélkül kerülnek be a rendszerbe, így a papíralapú címkézés feleslegessé válik. Ezzel a megoldással a szerszám összes releváns adata digitálisan elérhető, és a CNC gépre történő adatbetöltés is automatizált. A szerszám összeszerelésekor kiválasztható, hogy melyik géptől érkezett az igény, és a hozzárendelés eredményeként a gépen megjelenik a betöltendő szerszám digitális megfelelője. Amikor az fizikailag is megérkezik a géphez, a gépkezelő beolvassa az azonosítóját, és az összes aktuális adat a szerverről betöltődik a vezérlőbe. Az adatok konzisztenciájának fenntartása már nem a gépkezelő feladata, hanem a rendszer automatikusan gondoskodik róla.

A megmunkálási művelet végeztével, vagy amikor a szerszám elkopott, visszakerül az előkészítő műhelybe, ahol azonosítás után dönteni lehet a további sorsáról. Ha még használható, ismételt bemérés után visszakerül a polcra, ellenkező esetben szétszerelik, és a szerszám digitális megfelelője is megszűnik a rendszerben. Így a szerszámok életútja teljes egészében visszakövethető, az adatok pedig minden lépésnél automatikusan frissülnek.

Jogosan merülhet fel a kérdés, hogy mennyire stabil ez a folyamat, és milyen gyakran fordulhat elő olyan váratlan helyzet, amikor egy hiányzó címke akadályozza a termelést. Kivételek természetesen mindig vannak, felelősen nem lehet teljes garanciát vállalni, hogy soha nem akad majd egyetlen kallódó szerszám sem, amit kézbe véve – ember által olvasható jelölés hiányában – nem lehet majd azonnal beazonosítani. Az ilyen esetek azonban jelentősen csökkenthetők a folyamat körültekintő megtervezésével,

valamint az érintett operátorok megfelelő bevonásával és képzésével.

Jövőbeli fejlesztési irányként felmerült még egy okostelefonos alkalmazás bevezetésének lehetősége is, ami az ilyen helyzetek áthidalására is szolgálhat. Bár ez a megoldás egyelőre még nem valósult meg, technikai akadály nincs annak, hogy a gyártási adatáramlásba olyan eszközöket is bevonjunk, amelyek már most is ott lapulnak minden gépkezelő zsebében.

A papírintes, automatizált adatkezelés bevezetése nem csupán technológiai újítás, hanem szemléletváltás is a gyártási folyamatokban. Az emberi adatbevitel kizárásával jelentősen csökken a hibakockázat, javul az adatintegritás és a nyomon követhetőség, valamint időt takarítunk meg a gépkezelők számára. A címkézés és a kézi bevitel megszűnésével kevésbé függ a termelés a gépkezelők egyéni precizitásától, miközben a döntéshozók is kézzelfogható bizonyítékot kapnak a digitalizáció előnyéről. A rendszer bevezetése ugyanakkor szervezeti és folyamatátalakítást is igényel, hiszen az adatáramlás új irányainak kijelölése, az eszközök integrációja és az azonosítási szabványok kialakítása elengedhetetlen a sikeres működéshez. Vitathatatlan, hogy ennek költségét a megtérülés függvényében mérlegelni kell, hiszen a bevezetés kezdeti beruházása, az eszközök integrációja és az alkalmazottak átképzése rövid távon jelentős terhet jelent, de a megnövekedett termelékenység már középtávon is ellensúlyozni tudja ezeket a kiadásokat.

## 2.2 Esettanulmány: A szerszámok azonosítása

Az előzőekben már említettük a szerszámok egyértelmű beazonosíthatóságának fontosságát. Ebben a részben konkrét üzemi tapasztalatainkra támaszkodva vizsgáljuk meg részletesebben a témát.

Az azonosítás az egész rendszer legalapvetőbb funkciója, amely mégis meglepően sok többletértéket jelent az ügyfelek számára. Jegyezzük meg referenciaként, hogy a legtöbb üzemben az az általános helyzet, hogy amint egy szerszám elhagyja a szerszámelőkészítő műhelyt, onnantól kezdve gyakorlatilag semmilyen állapotinformációt nem kapunk már róla. A sorsát nagyrészt a gépkezelők egyéni döntései és a kialakult szokások határozzák meg, ami végső soron a szerszámkészlet kihasználtságát befolyásolja.

Egy szemléletes példa erre az a reakció, amelyet egyik partnerünk operatív vezetője adott, amikor először szembesült a kimutatással az üzemben található gépekben lévő összes szerszámról. Már az alapfunkció által nyújtott átláthatóság is mély benyomást tett rá. Izgalmas volt látni azt a felfokozott kíváncsiságot, amellyel szűrőpróbaszerűen keresett rá egy-egy különlegesebb szerszámra, majd a találat után azonnal kérdőre vonta telefonon a gépért felelős operátort: Miért tárazott be feleslegesen több példányt is ugyanabból a típusból, vagy éppen miért nem vitte vissza azt a szerszámot, amit hónapokkal korábban már kivontak a termelésből? És mindez csupán a tesztüzem első néhány percében történt.

Könnyen belátható, hogy már pusztán ez a transzparencia mennyit segíthet az ún. *black stock*, vagyis a feleslegesen tárolt készletek megszüntetésében, illetve egy-egy speciális szerszámpéldány gyors felkutatásában. Ehhez mindössze annyi szükséges, hogy a rendszerbe bekötött gépek vezérlőiből lekérjük a szerszámadatokat,

majd azokat aggregálva, áttekinthető formában megjelenítsük.

Ehhez azonban – ahogyan korábban már említettük – szükség van valamilyen egyedi azonosítóra, amivel minden egyes szerszámot ellátunk, illetve egy alkalmas eszközre a beolvasáshoz. A példánkban DataMatrix kóddal látjuk el a szerszámot, és kétdimenziós kódolvasókat használunk.

Az összeszerelt szerszámok ID-ja az alábbi két részből áll:

- a szerszámtípus azonosítója – például: D20R1\_5, amely egy sarokrádiuszos marót jelöl, 20 mm átmérővel és 1,5 mm sarokrádiusszal
- a tartó 8 számjegyű azonosítója – például: 12345678

A két elem kötőjellel kapcsolódik össze, így egy szerszám neve a példánkban így néz ki:

D20R1\_5-12345678.

Ez a kombináció kettős célt szolgál: a tartó azonosítójának használata biztosítja, hogy minden szerszámnév mindig egyedi legyen a rendszerben, a típus feltüntetése pedig beszédessé teszi azt a felhasználó számára. Az Mcenter támogatja a kódolvasókból érkező adatbevitelt, és a szerszámkezelő alkalmazások képesek különböző szűrésekre ezek alapján az azonosítók alapján.

A gyakorlatban úgy egyszerűsíthetjük a szerszámkiadó operátorok adminisztrációs feladatait, hogy a tartót egyszerűen csak be kell szkennelniük a kódolvasóval, a rendszer pedig az Mcenter-ből származó információk alapján intuitívan csak a releváns műveleteket kínálja fel.

Új szerszámpéldányok esetén (amelyek még nem szerepelnek a rendszerben) egy regisztrációs folyamat indul el. A már meglévő szerszámoknál a rendszer négy lehetséges műveletet tesz elérhetővé:

1. Mérés: a kiválasztott szerszám bemérési folyamatának indítása.
2. Tárolás: a szerszám tárolási helyének rögzítése.
3. Géphez küldés: a szerszám CNC gépre történő kiadásának naplózása.
4. Szétszerelés: a szerszám szétszerelésének dokumentálása.

Géphez küldés után, a szerszám felhasználásának helyén az operátornak sincs egyéb dolga a betárazáskor, mint beolvasni az azonosítót, amire a rendszer automatikusan megkeresi a fizikai szerszám digitális megfelelőjét, és betölti a hozzá tartozó adatokat a vezérlőbe. Ennek a funkciónak a hiányában gyakori hiba, hogy az operátor a hasonló elnevezésű szerszámok hosszú listájából tévedésből nem a megfelelőt választja ki. Azonos típusú szerszámok esetében bevett gyakorlat ugyanis, hogy a nevek csak az utolsó néhány karakterben különböznek (duplo nr.). Mindez azt eredményezi, hogy a vezérlő nem annak a konkrét szerszámpéldánynak a bemért geometriai adataival számítja ki a megmunkáló él pályáját, amivel a forgácsolás valójában történik. Azonos típusú szerszámokról lévén szó, a méretkülönbség minimális, a megmunkálás probléma nélkül lezajlik, a hibára csak a minőségellenőrzés során derül fény, de addigra már selejtek sokaságát gyártották le a tévesen betöltött szerszámmal. Alkalmunk volt részt venni az egyik nagy autóiipari vállalat üzemében egy ilyen probléma gyökérokának feltárásában.

Az eddigiekből következik az a fontos technikai részlet, hogy az Mcenter rendszerben mindig csak az ID-t rögzítjük

a szerszámon, azt az adatok továbbítására chip-es azonosítás esetén sem használjuk. A gyártási folyamat során az Mcenter rendszer minden szükséges információt – például geometriai adatokat, korrekciós értékeket, életciklus-információkat – a központi adatbázisból hív le. Ez a megoldás egyszerűen skálázható, könnyen integrálható meglévő rendszerekbe, és nem igényel drága hardverkomponenseket. A karbantartás is lényegesen egyszerűbb, hiszen az adatfrissítés egyetlen helyen történik, így elkerülhetők a szinkronizációs problémák. Természetesen, ennek előfeltétele a hálózati kapcsolat megléte az üzemben belül a termelőegységek és a központi szerver között.

Ettől eltérő megközelítés a chip-alapú adatátvitel, ahol a szerszámba épített RFID chip-be írják az összes releváns adatot, így azok közvetlenül a szerszámról olvashatók ki. Ez a megoldás nem feltételez informatikai hálózatot a szerszámadatok továbbításához, hiszen itt maga a szerszám egyben az adathordozó is. Ugyanakkor magasabb beruházási költséggel jár, rugalmatlan a folyamatváltozásokkal szemben, a chip tárhelykapacitása korlátozott, és fennáll az adatszinkronizáció problémája: ha a chipen lévő információ elavul, és nem történik frissítés, hibás adatok kerülhetnek a folyamatba.

Ebben a fejezetben konkrét eseteken keresztül szemléltettük, hogy a szerszámok egyedi azonosítása hogyan csökkenti az adminisztrációs időt, minimalizálja a hibalehetőségeket, és biztosítja a szerszámok nyomom követhetőségét a teljes életciklus során. A következőkben NC programok kezelésével kapcsolatos eseteket fogunk bemutatni.

### 2.3 *Esettanulmány: Az NC programok digitális kezelése és visszakövethetősége az MMR /Programs rendszerben*

Az utóbbi években több alkalommal is szembesültünk azzal, hogy vannak gyártóüzemek, ahol a digitalizáció még rengeteg fejlesztési lehetőséget rejt magában. Bevett gyakorlat, hogy egy tapasztalt munkatárs minden hónapban végigjárja a CNC gépeket, hogy manuálisan letöltse az éppen a gyártásban használt NC programokat – mintha egy digitális nyomozó lenne, aki minden szerszámgép NC programját összegyűjti. Ezután visszatér az irodába, ahol feltölti egy számítógépre, és órakon át, soronként hasonlítja össze ezeket az aktuális programokat az eredeti, jóváhagyott verziókkal. Bár ez a módszer hosszú évek óta működik, rendkívül időigényes, és a kézi összehasonlítás során a hibázás esélye is magas. Ráadásul nincs lehetőség valós idejű visszajelzésre, ha egy gépen eltérő vagy módosított program kerül futtatásra. A központi, digitális nyilvántartás hiánya tovább nehezíti a gyártási folyamatok átláthatóságát és az auditálhatóságát. Mindez összességében csökkenti a gyártás biztonságát, és gátolja a hatékony működést egy olyan világban, ahol a digitalizáció már nem előny, hanem alapelvárás.

Az ilyen gyártóüzemknél az MMR /Programs modul lehet egy megoldás, ami folyamatosan közvetlen kapcsolatban van a CNC gépekkel ethernet hálózaton keresztül. Ennek a modulnak az irányító alapelve, hogy a megfelelő NC program a kívánt szerszámgépre kerüljön. A gépeken futó NC programokat meghatározott időnként akár automatikusan feltölti az MMR /Programs szerver

adatbázisába, ahol egy ellenőrző folyamat részeként összehasonlításra kerülhet egy korábban felhasznált program az aktuálisan termelésben futó példánnyal.

A folyamat több szinten kezdődhet, de jelen példánkban az MMR /Programs szerveren összeállított NC csomag létrehozásán keresztül mutatjuk be a teljes munkafolyamatot. Első lépésben az NC programozó vagy gyártásvezető feladata, hogy a post-processzált NC programokat feltöltse az MMR /Programs felületére, egy úgynevezett NC csomagba. Ez az NC csomag egy digitális adattárolóként működik, amely minden, a munkadarab legyártásához szükséges adatot magában foglal: egy vagy több NC program mellett további digitális segédanyagokat is tartalmaz, mint például a munkadarab kinézete, munkadarab befogása, amelyek a gyártás előkészítését támogatják.

Az egyik legkritikusabb lépés, hogy az NC programozó meghatározza, mely szerszámgépek férhetnek hozzá az adott NC programokhoz. Ezzel biztosítható, hogy csak a kiválasztott gépekre jutnak el a szükséges programok. Amennyiben a programozó meggyőződött arról, hogy minden adat és információ helyes, a csomagot digitálisan, egy állapotjelző segítségével „kiadja” a gyártás számára. Ekkor egy biztonságos hálózati kapcsolaton keresztül letöltődik az MMR /Programs szerver moduljáról a CNC gépen futó kliens alkalmazásba a gyártáshoz szükséges NC csomag, amit a gépkezelő aztán betölt az NC memóriájába. Ezzel biztosítható, hogy a gépkezelők már csak a hivatalosan kiadott, saját gépekre érvényes NC programokat kapják meg, ezzel jelentősen csökkentve a hibalehetőségek számát.

Előfordulhat azonban, hogy a gépkezelőknek be kell avatkozniuk az NC programokba – például egy szerszámtörés vagy selejtes munkadarab elkerülése érdekében. Ilyenkor a módosításokat a szerszámgépen végzik el, de ha a változtatásokat a jövőben is relevánsnak ítélik, azokat rögtön vissza tudják küldeni az MMR /Programs központi adatbázisába. Ezáltal a tapasztalatok és optimalizációk is regisztrálva lesznek a rendszerben.

A programok összehasonlítása szintén az MMR /Programs felületén történik: a felhasználó a megfelelő NC csomagot kiválasztva egyetlen gombnyomással elindíthatja az összehasonlítás funkciót, amely azonnal megjeleníti az eltéréseket a különböző NC programverziók között. Ez a zárt folyamat biztosítja az átláthatóságot, a gyors visszakövethetőséget és a hibák azonnali feltárását, hozzájárulva a gyártás magas szintű biztonságához és hatékonyságához.

### 2.4 *Esettanulmány: NC Programok gyártásba küldése*

Egy globális energiaipari vállalat azzal a problémával keresett meg bennünket, hogy az NC programokat jelenleg csak egy külső adathordozó (USB drive) segítségével tudják eljuttatni a szerszámgépeikre. A programokat egy, az üzemben elhelyezett számítógépről másolják át egy hordozható eszközre, majd azzal felkeresik az adott szerszámgépet, és feltöltik rá a programot. Szeretnék ezt a jelentős munka- és erőforrásigényes folyamatot odáig fejleszteni, hogy az NC programok továbbításához végül senkinek ne kelljen majd belépni a gyártási területre. A jelenlegi megoldás számos hibalehetőséget rejt magában. Például, ha a számítógép, amelyen az NC programokat

tárolják, meghibásodik, akár az összes eddig létrehozott program elveszhet. További kockázatot jelent, ha egy új fájl véletlenül felülírja a meglévőt azonos névvel, vagy ha valaki tévesen választja ki a programot – ilyenkor vissza kell menni a számítógéphez, újra rámásolni a megfelelő fájlt, majd visszatérni a gyártósorra. Érezzük, hogy ez ma már korszerűtlen, ha szeretnénk a gyártás hatékonyságát és pontosságát növelni.

Megoldást jelenthet az MMR /Programs és az Mcenter Platform által biztosított hálózati kapcsolat. A kommunikáció az MMR Programs szerver és a megmunkáló gépeken futó kliensalkalmazások között titkosított csatornán keresztül történik, biztosítva az adatok biztonságos küldését és fogadását.

Az NC programozó az MMR /Programs felületén elkészíti az NC csomagot, amely tartalmazza a szükséges NC programokat és a gyártáshoz kapcsolódó releváns adatokat. Ezt követően a csomagot elérhetővé teszi a megfelelő szerszámgép vagy szerszámgép-csoport számára. A gépkezelő az MMR /Programs kliensalkalmazás segítségével közvetlenül a CNC gép NC memóriájába tölti be az NC csomagot, anélkül, hogy az állományok fizikai adathordozón keresztül utaznának. Ezáltal biztosítható az adatok folyamatos digitális nyomon követhetősége a gyáron belül. A gépkezelő így gyorsan és biztonságosan hozzájut a munkadarab gyártásához szükséges NC csomaghoz, ami jelentősen növeli a gyártás hatékonyságát és csökkenti a hibalehetőségeket.

## 2.5 Esettanulmány: Gépkihasználtság átláthatósága a gyártásban

A modern gyártásban nem elég, ha a gépek működnek – tudnunk kell, mennyire jól működnek. A Siemens Mcenter AMP /OEE modul pontosan ezt a célt szolgálja: valós idejű adatgyűjtéssel és elemzéssel segít feltárni a gyártási veszteségeket, és kiszámítja a legfontosabb teljesítménymutatókat, mint az OEE (Overall Equipment Effectiveness), a rendelkezésre állás, a teljesítmény és a minőség. A rendszer olyan, mint egy digitális rendszerfelügyelő, aki nemcsak ellenőrzi a gyártásban levő gépeket, hanem minden egyes gépállapotot, operátori beavatkozást és programváltozást is pontosan dokumentál és értelmez. Ezeket az adatokat az AMP Performance Monitor moduljában lehet minden egyes gépre vonatkozóan megtekinteni.

Egy ügyfél azzal a problémával fordult hozzánk, hogy a nagy alapterületű üzembem nem látja át a gépek működését és kihasználtságát. Szeretné az irodájából valós időben nyomon követni, hogy a gépek éppen termelnek-e, és ha nem, akkor mi ennek az oka.

Ahhoz, hogy a gépek kihasználtságát hatékonyan monitorozni lehessen, alapvető feltétel, hogy a szerszámgépek hálózatba legyenek kötve, és folyamatosan adatot szolgáltatassanak az Mcenter szerver felé az aktuális gépállapotokról. Ez az információáramlás teremti meg az alapját a valós idejű gyártási adatelemzésnek, amely nélkülözhetetlen a hatékonyság objektív értékeléséhez.

Az AMP rendszer használatához először is egy termelési tervet kell létrehozni. Ez azt jelenti, hogy minden egyes szerszámgépre, illetve a teljes gépflojtára előre meg kell határozni, mikor és milyen feladatokat kell végrehajtani. A munkaterv származhat egy nagyvállalati MES

(Manufacturing Execution System) vagy ERP (Enterprise Resource Planning) rendszerből, de kisebb cégeknél akár egy egyszerű táblázatban is rögzíthetik. A lényeg, hogy a kész munkatervet fel kell tölteni az AMP rendszerbe, amely így az elvárt ideális állapotot fogja jelenteni. Ez a referencia, amivel a rendszer a valós, gépektől érkező állapotokat automatikusan összeveti.

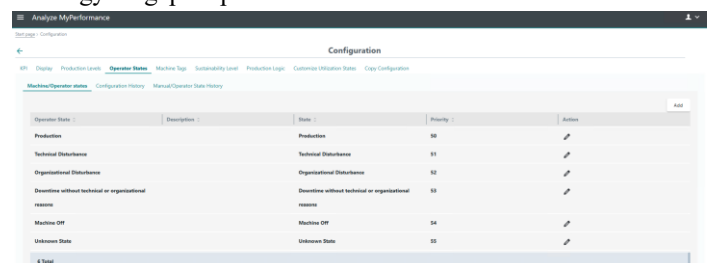
Az AMP rendszer lehetővé teszi, hogy a gyártásvezetés pontosan lássa, hol voltak eltérések a tervezett és a tényleges gyártás között. Mivel a rendszer valós idejű adatokat gyűjt a szerszámgépekről, így mindig nyomon követhető, hogy egy adott gép gyártásban van-e, hiba miatt áll, vagy éppen nem tervezett leállás történt. Az operátoroknak nem szükséges manuálisan állapotjelentéseket készíteniük. Amennyiben nem tervezett megállás történik, a gépkezelő egyetlen gombnyomással tudja manuálisan megadni a gépi állás okát, például, ha túl sok a forgács a munkaterületen és tisztításra van szükség. Ezáltal a vezetés számára egyértelműen látható, hogy adott pillanatban miért állt le a gép, és ez a későbbi elemzések alapjául is szolgál.

Az AMP rendszer lehetőséget nyújt arra is, hogy egy adott gép teljesítményét összehasonlíthassuk a gyártósor többi gépével. Ez a funkció segíthet további optimalizálási lehetőségek feltárásában: például, ha az egyik gépet sokkal gyakrabban kell takarítani, könnyen kiderülhet, hogy nem megfelelően helyezik be a munkadarabot, vagy más szervezési problémák állnak fenn. Így a rendszer hozzájárul a hatékonyság növeléséhez és a veszteségek csökkentéséhez, hiszen a valós idejű adatok alapján gyorsabb és megalapozottabb döntések szülehetnek.

Az AMP alapesetben az alábbi előre definiált gépállapotokat különbözteti meg:

1. Termelés
2. Műszaki zavar
3. Szervezeti zavar
4. Leállás műszaki vagy szervezeti ok nélkül
5. Gép kikapcsolva
6. Ismeretlen állapot

Az AMP konfigurációs modulja lehetővé teszi ezeken felül egyedi gépállapotok létrehozását is.



2. ábra: Gépállapot konfigurálása

A gépkihasználtság mérése egyfajta digitális rendszerfigyelésként értelmezhető, amely információt nyújt arról, hogy a szerszámok milyen arányban vannak tényleges használatban, illetve tétlenül a műhelyben. Például, ha egy gép napi egy órát üzemel, miközben nyolc órás kapacitással rendelkezik, a rendszer képes jelezni, hogy működési anomália áll fenn – legyen szó munkaerőhiányról vagy túlzott állásidőről. Az AMP ebben a naplózásban segít: pontosan rögzíti, mikor, mennyit és hogyan dolgozik a gép. Az OEE mutató pedig olyan, mint a digitális elemző összesített értékelése: mennyire volt hatékony az adott nap. Ha a gép sokat állt, hibázott, vagy

lassan termelt, az rögtön látszik a kimutatásokban. Így az üzemvezető nemcsak visszanezhet, hanem előre is tervezhet – mikor kell karbantartani, mikor érdemes új munkát szervezni. A cél mindig az, hogy a szerszám ne csak ott legyen, hanem dolgozzon is – hatékonyan, megbízhatóan.

Az automatikus gépállapot-feltöltés olyan, mintha a gépkezelők folyamatosan jelentenék a rájuk bízott gépekről, hogy mikor termelnek, mikor hibásodtak meg, vagy mikor álltak kihasználatlanul. Nem kell többé jegyzetelnie vagy találgatnia – minden adat valós időben, pontosan és megbízhatóan kerül a naplójába. Ez a rendszer kiküszöböli az emberi mulasztásokat, hiszen nem az operátoroknak kell manuálisan rögzíteniük az állapotokat. Az automatikus adatküldés révén a vezető azonnal látja, ha valami nem működik optimálisan, így gyorsabban tud reagálni. A valós idejű monitoring lehetővé teszi a hatékonyabb döntéshozatalt, és segít megelőzni a hosszabb leállásokat. Emellett az automatikusan gyűjtött adatok alapján részletes elemzések és OEE riportok készíthetők, amelyek támogatják a folyamatos fejlesztést. Így a műhely nemcsak működik, hanem egyre jobban teljesít.

### 2.5.1 OEE KPI

Az OEE (Overall Equipment Effectiveness) mérése az egyik legfontosabb mérőszám a gyártási hatékonyság objektív értékelésére. Az OEE három fő tényező szorzataként számítható ki.

1. Rendelkezésre állás: azt mutatja meg, hogy a gép a tervezett működési időhöz képest mennyit volt ténylegesen működésben.
2. Teljesítmény: azt méri, hogy a gép a maximális kapacitásához képest a valóságban mennyit termelt.
3. Minőség: azt mutatja, hogy a legyártott termékek közül hány volt hibátlan.

OEE képlet (Összesített gépheatékonyság)

Rendelkezésre állás (Availability):

$$A = \frac{\text{gyártási idő}}{\text{tervezett idő}}$$

Teljesítmény (Performance):

$$P = \frac{\text{legyártott darabszám} \times \text{célciklusidő}}{\text{gyártási idő}}$$

Minőség (Quality):

$$Q = \frac{\text{jó darab}}{\text{összes darab}}$$

OEE (Összesített gépheatékonyság):

$$OEE = A \times P \times Q = \frac{\text{gyártási idő}}{\text{tervezett idő}} \times \frac{\text{legyártott darabszám} \times \text{célciklusidő}}{\text{gyártási idő}} \times \frac{\text{jó darab}}{\text{összes darab}}$$

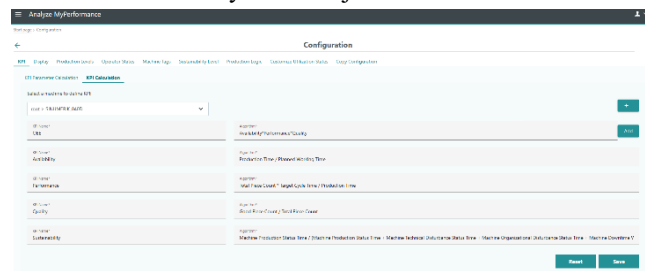
3. ábra: OEE formula

Az OEE KPI mérése azért fontos, mert objektív képet ad a gyártási folyamatok hatékonyságáról, és segít azonosítani a veszteségforrásokat. Ha egy gép nem működik elég ideig, túl lassan termel, vagy sok selejtet gyárt, az OEE mutató ezt egyértelműen megmutatja. Ezáltal a vezetés nem érzések vagy becslések alapján hoz döntéseket, hanem konkrét adatokra támaszkodva. Az OEE lehetővé teszi a különböző gépek, műszakok vagy üzemek összehasonlítását, így könnyen felismerhetők a lejobban teljesítő egységek és a fejlesztésre szoruló területek. A KPI rendszeres mérése támogatja a folyamatos fejlesztést, és segít abban, hogy a

termelés ne csak működjön, hanem optimalisan és költséghatékonyan működjön. Végül soron az OEE egy olyan iránytű, amely segít a gyártásban a hatékonyság felé vezető úton.

Ezáltal az AMP nemcsak azt mutatja meg, hogy a gép dolgozik-e, hanem azt is, hogy miért nem, és hogy az operátor aktív-e vagy sem. Ez kulcsfontosságú a hatékonyság növeléséhez és a veszteségek csökkentéséhez.

Az AMP /OEE modul a Siemens Mcenter Machinum rendszerében valós idejű adatokat gyűjt a gépek működéséről és az operátorok tevékenységéről, így átláthatóvá teszi a gyártási folyamatokat. A rendszer automatikusan érzékeli, hogy a gép működik-e, áll-e, illetve, ha nem üzemel, az okot is rögzíti – legyen szó technikai hibáról, anyaghiányról vagy emberi tényezőről. Az OEE mutató segítségével a termelés hatékonysága objektíven mérhető, ezáltal támogatva a veszteségek csökkentését és a folyamatos fejlesztést.



4. ábra: OEE számítás SINUMERIK vezérlőn

## 3 KONKLÚZIÓ

A Siemens Mcenter platform bevezetése a CNC megmunkálásban nem csupán technológiai fejlesztést jelent, hanem egy szemléletváltás révén versenyelőnyt is a modern gyártóvállalatok számára. Az esettanulmányok alapján egyértelműen látszik, hogy a digitalizáció alapvetően átalakítja a mindennapi munkafolyamatokat: csökkenti a humán hibázás lehetőségét, növeli az adatintegritást, és jelentősen javítja a termelés átláthatóságát. A szigorú rendszerek integrálásával és papíralapú megoldások kiváltásával a szerszámok és NC programok kezelése gyorsabbá, pontosabbá és visszakövethetővé válik. Az OEE mutató és a gépkihasználat valós idejű monitorozása révén pedig a veszteségforrások gyorsan azonosíthatók, a termelés optimalizálható, és a minőségbiztosítás is magasabb szintre emelhető. Ez nemcsak a gépkezelők munkáját könnyíti meg, hanem a vezetőség számára is objektív, valós idejű információkat biztosít a döntéshozatalhoz.

Az esettanulmányok rávilágítottak arra, hogy a digitalizáció nem elméleti fogalom, hanem a mindennapi termelés szerves része. Az ipari példák alapján belátható, hogy az új technológiák és megközelítések konkrét, mérhető előnyöket kínálnak a gyártási folyamatok optimalizálásában, a minőségbiztosításban és a hatékonyság növelésében.

Az evosoftnál – a Siemens leányvállalataként – több mint 15 éve veszünk részt aktívan ennek a rendszernek a fejlesztésében. Az ez idő alatt felhalmozott tapasztalatainkra építve néhány éve már az Mcenter-hez

kapcsolódóan technikai tanácsadást, egyedi megoldásokat és üzembe helyezési szolgáltatásokat is kínálunk. Partnereink a legkülönbözőbb ipari területeken termelnek, vannak köztük világmárkák, és kevésbé ismert vállalatok is. Jelenleg is futnak projektjeink energetikai, autóiipari és élelmiszeripari cégeknél, valamint közúti és vasúti hajtásrendszereket, illetve elektromos szerszámokat gyártó vállalatoknál is. A különbözőségek mellett mindegyik projektben közös, hogy a megoldás részleteit mindig az ügyféllel együtt dolgozzuk ki az egyedi igényei alapján, így a bevezetés során felmerülő kihívásokra valóban testreszabott megoldást tudunk kínálni.

#### IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Siemens AG: Mcenter Platform – Official Product Documentation <https://new.siemens.com/global/en/products/automation/topic-areas/digitalization/mcenter.html>
- [2] Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013): Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0. Final report of the Industrie 4.0 Working Group.
- [3] Finkenzeller, K. (2010): RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards, Radio Frequency Identification and Near-Field Communication. Wiley.
- [4] Altintas, Y. (2012): Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design. Cambridge University Press.
- [5] Schwab, K. (2016): The Fourth Industrial Revolution. World Economic Forum.

# Mesterséges intelligencia módszerek a gyártástechnológiában

Kalmár Zoltán

evosoft Hungary Számítástechnikai Kft., (Budapest, Magyarország)

[zoltan.kalmar@evosoft.com](mailto:zoltan.kalmar@evosoft.com)

**Összefoglalás** — A publikáció célja valós példákon keresztül bemutatni, hogyan formálja az ipari automatizáció jövőjét a mesterséges intelligencia (MI). Jelen kutatás az alapvető fogalmi keretektől kiindulva szisztematikusan elemzi az Ipar 4.0 és 5.0 technológiai fejleményeit, a kulcsfontosságú paradigmákat, a mesterséges intelligencia alapú megoldások minimális előfeltételeit és a tradicionális gépi látáson és statisztikai adatokon alapuló megoldásokkal szemben nyújtott előnyöket. A Siemens által fejlesztett MI-megoldásokra épülő példákon keresztül bemutatjuk, hogyan segít a mesterséges intelligencia a gyártás optimalizálásában és a gyártási költségek csökkentésében, a minőségellenőrzés, gyártásvezérlés és prediktív karbantartás területén. Az esettanulmányok demonstrálják, hogy az MI gyártástechnológiai alkalmazása kézzelfogható versenyelőnyt biztosít azoknak a cégeknek, amelyek felkészültek a benne rejlő lehetőségek kihasználására.

**Kulcsszavak:** Gyártásautomatizálás, Ipar 4.0, Mesterséges Intelligencia Robotika, Kvantumtechnológia

**Abstract** — The aim of this publication is to demonstrate, through real industrial examples, how artificial intelligence (AI) is shaping the future of industrial automation. Starting from the fundamental conceptual framework, the study systematically analyses the technological developments of Industry 4.0 and 5.0, the key paradigms, the minimum prerequisites for AI-based solutions, and the advantages they offer over traditional machine-vision and statistics-driven approaches. Using examples based on Siemens' AI solutions, it is presented how AI supports production optimization and cost reduction in the fields of quality inspection, production control, and predictive maintenance. The case studies illustrate that the application of artificial intelligence in manufacturing provides tangible competitive advantages for companies that are prepared to exploit its potential.

**Keywords:** Manufacturing Automation, Industry 4.0, Artificial Intelligence, Robotics, Quantum Technology

## 1. A GYÁRTÁSAUTOMATIZÁLÁS EVOLÚCIÓJA

### 1.1. Korai fejlődés

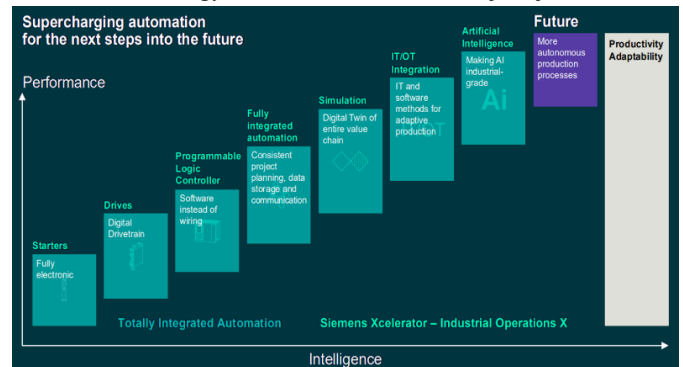
A gyártásautomatizálás története szorosan összefonódik az emberiség örökös törekvéssel az értékek felhalmozására. A neolitikus forradalom (Kr. e. 9500-8500 körül) megteremtette a mezőgazdaság és ezáltal az élelmiszer-felhalmozás alapjait, ami a népesség ugrásszerű növekedésével járt. Ez a növekedés szolgált a későbbiekben a technológiai fejlődés katalizátoraként.

Az első ipari forradalom (18–19. század) a gőzgép, a gépesített textilipar és a vasgyártás fejlődésével

forradalmasította a termelést, megalapozva a modern ipari társadalmat.

A második ipari forradalom a 19. század végén és a 20. század elején zajlott; középpontjában a villamos energia, a futószalagos tömegtermelés, az acélgégyártás és a vegyipar állt. Ezek a technológiai újítások jelentősen növelték a termelékenységet, átfüggővé tették a munka világát, elősegítették a városok növekedését, javítva az életszínvonalat és a társadalmi mobilitást. [2][3]

A harmadik ipari forradalom az 1950-es évektől kezdődött, és a digitalizáció, az információs technológiák, a robotika, valamint a nanotechnológia és a biotechnológia fejlődése jellemzi. Ez az időszak világszerte gyors gazdasági növekedést és új munkalehetőségeket hozott, tovább alakítva a gyártás és az automatizálás jövőjét.



1. ábra: Az automatizálás evolúciója – teljesítmény és intelligencia dimenziók

### 1.2. Negyedik ipari forradalom – Internet of Things

A negyedik ipari forradalom fogalma Klaus Schwab 2016-os könyvében [4][5] jelent meg, és azóta a technológiai fejlődés társadalmi, gazdasági és politikai hatásainak elemzésére szolgál. A fogalom arra utal, hogy bizonyos technológiák együttesen jelentős változásokat eredményeznek a társadalomban és a gazdaságban, túlmutatva a pusztá hatékonyságnövelésen [5].

Az Ipar 4.0 a digitális technológiák gyártásban való alkalmazására koncentrál, szerves részeként a tágabb értelemben vett negyedik ipari forradalomnak.

Az első ipari forradalommal kezdve a többet, gyorsabban, hatékonyabban szemlélet formálja az ipar fejlődését. A gőzgéptől az elektromos áram használatán át a számítógépek által vezérelt gyártósorokig minden evolúciós lépcsőt ez a szemlélet irányított.

Ez a paradigmaváltás eredményezte az 'Ipar 4.0' elnevezését, a 21. század elején kibontakozó technológiai

trendet, valamint ez a szemlélet jelenleg is formálja az ipar jövőbeli alakulását.

Az ipari termelés negyedik forradalma a digitális technológiák, az adatok és a hálózatba kapcsolt rendszerek integrációjában rejlő lehetőségek kihasználását vette/veszi célba. Kimondott célja a termelés hatékonyságának és rugalmasságának növelése, a költségek csökkentése és a versenyképesség növelése. Teszi mindezt nem csak a többit-olcsóbban elv szem előtt tartásával, hanem a teljes ellátási láncra vetített költségek csökkentésével is.

Az ipari automatizálás révén a gépek, robotok és vezérlőrendszerek képesek önállóan, emberi beavatkozás nélkül működni, miközben folyamatosan gyűjtik és elemzik az adatokat a termelési lánc minden pontján. Ez nemcsak a költségek csökkentését, hanem a minőség javítását is szolgálja, hiszen a hibák korai felismerése, a prediktív karbantartás és a folyamatok optimalizálása mind hozzájárulnak a versenyképesség növeléséhez.

A kiberfizikai rendszerek és a dolgok internete (Internet of Things, IoT) szorosan összefonódnak az Ipar 4.0 koncepciójával. A kiberfizikai rendszerek olyan intelligens gépek, amelyek érzékelőkkel, vezérlőkkel és hálózati kommunikációval vannak felszerelve, így képesek valós időben adatokat cserélni és reagálni a környezetükre. Az IoT technológiával ezek az eszközök és rendszerek összekapcsolódnak, egy integrált, intelligens gyártási hálózatot alkotva. Az adatok folyamatos áramlása lehetővé teszi a gyártás gyors alkalmazkodását, a folyamatok optimalizálását és az ellátási lánc átláthatóságát, ami végső soron a digitális és fizikai világ határainak elmosódását eredményezi [6].

#### Az Ipar 4.0 kulcstechnológiái

- Kiberfizikai rendszerek és a "dolgok internete" (*Internet of Things*, IoT)
- Okos gyárak és összekapcsolt rendszerek
- Automatizálás és robotika
- 3D nyomtatás
- Mesterséges intelligencia
- Big data
- Digitális iker
- Felhő alapú és peremhálózati rendszerek (*cloud and edge computing*)
- Kiegészített és virtuális valóság

## 2. A MESTERSÉGES INTELLIGENCIA SZEREPE AZ IPARBAN

A mesterséges intelligencia (MI) kulcsszerepet tölt be az Ipar 4.0-ban: közvetlenül segíti az automatizálást, intelligens döntéshozatalt és rendszeroptimalizálást, előrejelzi az esetleges hibákat, lehetővé teszi a prediktív karbantartást és a személyre szabott gyártást.

Az MI közvetett módon is támogatja az ipari fejlődést. Hatalmas adatmennyiségek elemzésével olyan összefüggéseket és mintázatokat tár fel, amelyek az emberi szem számára láthatatlanok lennének – ezáltal segítve a stratégiai döntéshozatalt és folyamatok optimalizálását. Az IoT biztonság területén az MI felismeri a hálózatra csatlakozó eszközökben fellépő fenyegetéseket és rendelkezéseket, ezáltal emberi beavatkozás nélkül is képes megőrizni az ipari hálózatok biztonságát. Emellett az MI-vezérelt automatizáció lehetővé teszi, hogy az emberek

nagyobb hangsúlyt fektessenek a kreatív és stratégiai feladatokra.

#### A mesterséges intelligencia fogalmi kerete

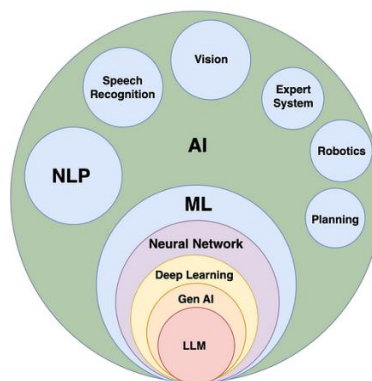
Az Oxford English Dictionary definíciója szerint, a mesterséges intelligencia a számítógépek vagy más eszközök olyan képessége, amikkel intelligens viselkedést mutatnak, vagy szimulálnak. Olyan szoftverek, amik olyan feladatokat hajtanak végre, vagy olyan eredményeket produkálnak, amikről korábban úgy vélekedtek, csak az emberi intelligencia képes [7].

Ha a mesterséges intelligenciára mint tudomány területre hivatkozunk, akkor az alábbi, 1991-ből származó definíció még ma is helytálló, miszerint a mesterséges intelligencia az a terület, ami azt vizsgálja, hogyan lehet a számítógépeket olyan feladatok elvégzésére képessé tenni, amelyekben jelenleg az emberek jobbak [8].

Ez a definíció nem csak tömören összefoglalja a mesterséges intelligenciába fektetett törekvéseket, de tökéletesen illeszkedik a gyártásevolutióról eddig felvázolt képhez. Legyünk képesek olyan rendszereket alkotni, amik az emberi tevékenységet tudják helyettesíteni vagy hatékonyabban elvégezni.

Az MI tehát egy gyűjtőfogalom, szemben a köznapi használattal, ahol egy önálló, futurisztikus technológiaként jelenik meg. Mindennapjainkban számos ilyen technológia szinte észrevétlenül jelen van körülöttünk. Az útvonaltervező alkalmazások, a hangalapú asszisztensek, az arcfelismerő rendszerek vagy akár az otthoni robotporszívók mind olyan fejlett mesterséges intelligencia megoldásokon alapulnak, mint a tervezés, a beszédfelismerés, a gépi látás és a robotika. Ezeket a megoldásokat már annyira természetesnek vesszük, hogy gyakran nem is gondolunk rájuk innovációként, pedig mindegyik fejlett mesterséges intelligenciát alkalmaz a háttérben.

A köznapi értelmezéssel (emberi képességeket felülmúló szuper számítógép-agy) szemben ezek a technológiák a mindennapi élet részévé váltak – nem futurisztikus újdonságként, hanem praktikus eszközként [9].

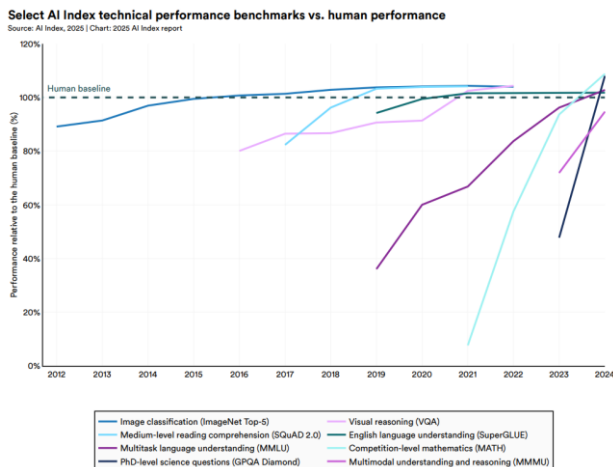


2. ábra: A mesterséges intelligencia terület nagyobb részei

### 1.3. Ember és mesterséges intelligencia

A Stanford Egyetem Human-Centered AI (HAI) egy interdiszciplináris intézet, amelyet 2019-ben hoztak létre a mesterséges intelligencia kutatás, oktatás, szabályozás és gyakorlat fejlesztése érdekében [10]. Az általuk évente

kiadott AI Index riportja [11] pontos képet fest a mesterséges intelligencia modellek jelenlegi képességeiről és az azokban évről évre nyomon követhető, ugrásszerű fejlődésről.



3. ábra: AI rendszerek teljesítménybenchmarkjai az emberi alapteljesítményhez viszonyítva (2012-2024) [12]

### 3. LEGGYAKORIBB MESTERSÉGES INTELLIGENCIA ALKALMAZÁSOK A GYÁRTÁSBAN

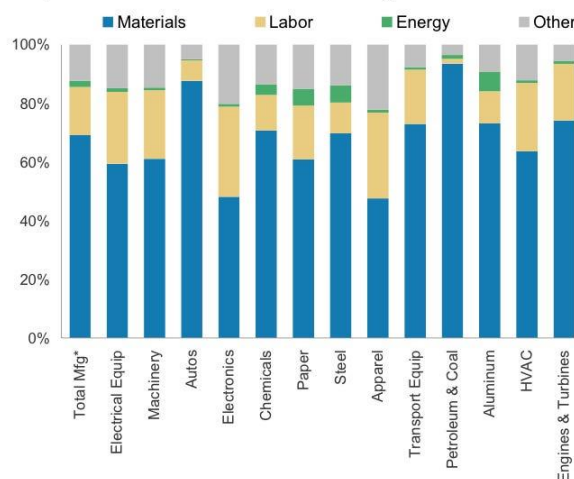
Az ipari mesterséges intelligencia (industrial AI) az MItechnológia termelésautomatizálás, gépek közötti kommunikáció és az ezekhez kapcsolódó adatgyűjtésekből származó adatokon történő alkalmazását jelenti: előrejelzéseket vagy automatizált műveleteket generál olyan környezetekben, mint a gyártás, logisztika vagy energiaipar.

Szemben az explicit, meghatározott problémákör megoldására írt szoftveres megoldásokkal, a mesterséges intelligencia használata lehetőséget nyújt a problématerék tágabb definíciójára. Az így létrehozott rendszerek rugalmasabbak és a feladatok szélesebb spektrumját képesek ellátni anélkül, hogy minden vizsgálni kívánt esetet explicit programozással fednének le.

Elsődleges célja egybecseng a korábban említett definíciókban megjelenő céllal: olyan gépek létrehozása, amik az embernél hatékonyabbak (pontosabb, gyorsabb, olcsóbb) olyan feladatokban, amiket jelenleg nem, vagy csak humán erőforrás bevonásával lehet elvégezni.

A humán erőforrás alkalmazás a gyártásban jelentős költséget jelent. Szektortól függően a fix költségek 10-30%-át is kitehetik a bérrel és juttatásokkal kapcsolatos költségek [13].

Exhibit 48  
Components of US Manufacturing Costs



Source: US Census Bureau, Morgan Stanley Research

4. ábra: Gyártási költségek az Amerikai Egyesült Államokban [13]

Ennek megfelelően indokolt azon technológiák térnyerése, amik a fix költségek csökkentését, vagy racionalizálást célozzák. Fontos megjegyezni, hogy nem csak a gyártósorokon dolgozó munkások béreire és juttatásaira fordított költségek csökkenthetők a mesterséges intelligencia használatával, hanem olyan társterületek költségei, mint például munkaügy (Human Resources, HR), informatika (Information Technology, IT), vagy akár a létesítménygazdálkodás (Facility Management), bár utóbbiak sokkal kisebb mértékben.

Az ipari MI üzemenkritikus környezetben működik, ahol az üzemzavarok és pénzügyi veszteségek elkerüléséhez nagy pontosságú rendszerekre van szükség; ezenfelül skálázhatóságát számos tényező befolyásolja. A gyárak, vagy akár az egyes gyártósorok eltérőek, így egy-egy már működő alkalmazás átültetése egy következő gyártósorra az alkalmazás módosítását is jelentheti. Sok esetben tovább nehezíti a skálázhatóságot, hogy az egyes gyárakban, gyáregységekben keletkező adatok, kibebiztonsági és adatbiztonsági aggályok miatt helyben tárolódnak, és a gyártósorok informatikai rendszerei elszigeteltek (air-gapped), a gyár többi hálózatából, és az internetről nem elérhetők.

Mindezeketől függetlenül a tulajdonosi és befektetői érdeklődés a mesterséges intelligencia ipari alkalmazására növekvő trendet mutat, és a várakozások szerint 2030-ra elérheti 154 milliárd dollárt, ami 23%-os éves növekedési ütemet (CAGR) jelent [14].

Az témában rejlő lehetőségek kiaknázását az alábbi alkalmazási területek szemléltetik a legegyszerűbben.

#### 3.1. Gyártástervezés és virtuális beüzemelés

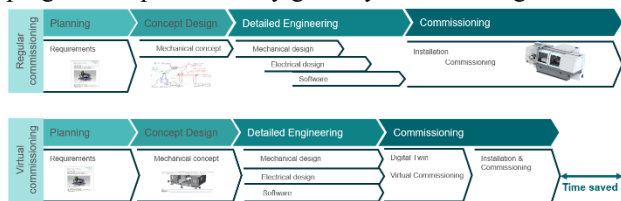
A gyártás optimalizálása napjainkban kulcsfontosságú szerepet tölt be az ipari vállalatok versenyképességének és hatékonyságának növelésében. Az optimalizált gyártási folyamatok révén csökkenthetők a költségek, javítható a termékminőség, valamint gyorsabb és rugalmasabb termelés válik lehetővé. Ugyanakkor számos kihívással is szembe kell nézni: a gyártási rendszerek egyre összetettebbek, az adatok mennyisége folyamatosan nő, és a technológiai fejlődés szüntelen alkalmazkodást igényel.

A digitális ikrek (digital twin) és az ipari metaverzum lehetőséget biztosít arra, hogy a gyártósorok és a gyártás minden paraméterét figyelembe véve szimuláljunk különböző gyártási szcenáriókat.

A mesterséges intelligencia lehetőséget biztosít a digitális térben létrehozott gyárak és gyártósorok teljes működésének szimulálására, ami nem csak a gyártási folyamat megadott célra optimalizált szimulációját teszi lehetővé, de már a gyár tervezésekor segítséget nyújthat az optimális gyártósor kialakításában

Az anyagáram-szimuláció segítséget nyújt arra, hogy a valós gyártási idő töredéke alatt megtaláljuk a gyártósor szűk keresztmetszetét, vagy különböző paraméterek mentén optimalizáljuk a gyártósor működését.

A virtuális beüzemeléssel a gyártósor felépülte előtt tudunk gyártást szimulálni, ami nem csak a teljes gyártósor beüzemelési idejét rövidíti le azáltal, hogy a PLC programok a beüzemelés egy korábbi pontján elkészülhetnek, hanem a PLC program fejlesztési és tesztelési ideje is drasztikusan csökkent, köszönhetően a virtuális térben végezhető tesztelésnek. A gyártósor elkészültekor, a virtuális térben tesztelt PLC program telepítése néhány gombnyomással elvégezhető.



5. ábra: A virtuális beüzemeléssel nyerhető idő és költségmegtakarítás

### 3.2. Minőségellenőrzés

A minőségellenőrzés beépítése a gyártási folyamatokba szinte minden iparágban egységes cél. Ezt nagy általánosságban három módon próbálhatjuk elérni. Mivel a gyártási folyamat alapvetően egy determinisztikus folyamat (a gyártási paraméterek változtatása nélkül a termékek változatlan minőséggel kerülnek legyártásra) megkísérelhetjük a folyamatparaméterek olyan szinten kontrollálni, hogy az garantálja a változatlan termék minőséget. A második lehetőségként, törekedhetünk arra, hogy hibás termék ne kerüljön a vásárlókhöz. A gyártósori és a gyártósor végi minőségellenőrzés ebbe a kategóriába esik. A harmadik lehetőség ezen opciók olyan kombinációja, hogy az egyes opciók hiányosságait a másik opcióval fedjük le, ezzel garantálva a termék minőséget [15].

Egy termék minőségét általában valamilyen termék specifikációban meghatározott, mérhető és számszerűsíthető paraméterek mentén értékeljük. Ezek közül vannak egyszerűen mérhetőek, például egy késztermék súlya, de vannak nehezebben számszerűsíthető részei, mint például a termék színének egységessége, vagy a csomagolás hibátlansága.

Az egyszerűen mérhető paramétereknek (például a termék súlya) való megfelelés vizsgálata általában jól automatizálható, így akár az összes gyártott terméken elvégezhető. Más paraméterek azonban természetüknél fogva nehezebben mérhetőek. A csomagolás bármely pontján felbukkanó gyűrődések, szakadások, karcok felismerésére a klasszikus gépi látás algoritmusokkal

bonyolult megbízhatóan működő ellenőrző mechanizmusokat építeni. Ilyen esetekben, az egységnyi idő alatt gyártott termékek számától függően, gyakran a gyártósor végén, ember által végzett termék ellenőrzéssel igyekeznek garantálni, hogy hibás termék kikerüljön a gyárból. Ez azonban minden esetben fix költséget generál, ami rontja a termék piaci versenyképességét vagy jövedelmezőségét.

Az ilyen jellegű problémák (közel) valós időben történő felismerésére a mélytanulós (deep learning) algoritmusokkal kiegészített képfeldolgozás adhat megnyugtató választ (2. ábra). Az ilyen rendszerekkel történő ellenőrzés az orientációs hibákat éppúgy képes kiszűrni, mint a termék vagy csomagolás sérülését.

### 3.3. Karbantartás-előrejelző rendszerek

Az ipari környezetben a cégek eszközállományának jelentős részét a gyártósor és a hozzá kapcsolt géppark teszi ki. Ezek meghibásodása nem csak közvetlen módon (gépjavítás vagy -csere) jelent plusz költséget, de nem tervezett leállásokat okoznak, amik jelentős veszteséget okoznak.

A svájci székhelyű ABB által 2023-ban végzett felmérésben 3125 gyárüzem-karbantartási döntéshozót kértek meg világszerte az energiaipar, műanyag- és gumigyártás, olaj- és gázipar, szélenergia, vegyipar, vasút, közműszolgáltatások, tengeri szállítás, élelmiszer- és italgyártás, víz- és szennyvízkezelés, valamint fémipar területéről. A válaszadók 66%-a nem végzett megelőző karbantartást, vagy csak üzemidő alapon ütemezte azt. A válaszok alapján a nem tervezett leállások medián költsége 125.000 dollár óránként. Természetesen a relatív munkaerőköltség és a szektorok közötti szabályozási környezet, anyag és kieső bevételek költsége nagyban eltér az egyes szektorok között [16].

A mesterséges intelligencia alapú megelőző karbantartást végző rendszerek a gépek érzékelőiből és a gyártósorról származó adatokat feldolgozva képest megbízhatóan előre jelezni, hogy az egyes gépek mikor szorulnak karbantartásra. Az ilyen rendszerek által a szükséges karbantartások ütemezhetővé és kiszámíthatóvá tehető, ezáltal csökkentve a kiesett termelés okozta veszteséget.

## 4. KIHÍVÁSOK A MESTERSÉGES INTELLIGENCIA ALKALMAZÁSÁBAN

A mesterséges intelligencia ipari alkalmazása számos kihívást rejt magában. Ezen kihívások egyaránt befolyásolják az MI-vel ellátott gyártási folyamatok hatékonyságát vagy ezen rendszerek biztonságát és átláthatóságát.

Az e területeken felmerülő problémák megoldása alapvető fontosságú ahhoz, hogy a mesterséges intelligencia valódi értéket teremtsen az ipari környezetben, miközben megfelel az etikai és jogi normáknak is.

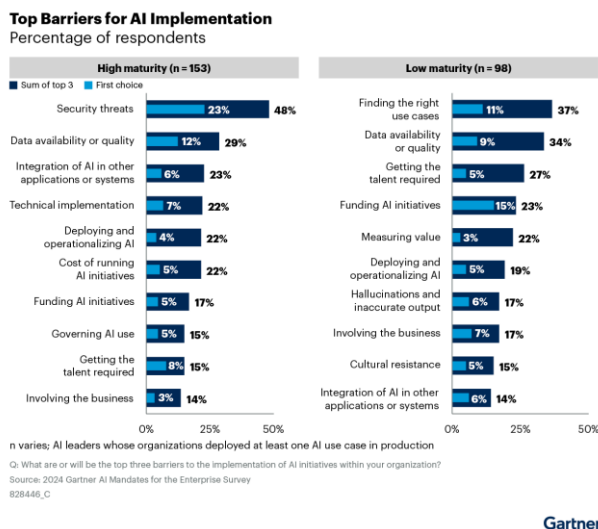
- Adathiány (*data scarcity*)

Az adathiány arra utal, hogy az ipari rendszerekben gyakran nem áll rendelkezésre megfelelő minőségű adat a mesterséges intelligencia algoritmusok betanításához. Ez komoly akadálya lehet a pontos előrejelzéseknek és automatizált döntéshozatalnak. A legnagyobb problémát a széttagolt vagy hiányos

adathalmazok, az adatvédelmi aggályok, illetve az adatok szűkös elérhetősége jelentik, amik a gyártók 70%-át érintik [14].

- **Interoperabilitás**  
Az interoperabilitás azt jelenti, hogy a különböző gyártói rendszerek, szoftverek és eszközök képesek egymással zökkenőmentesen kommunikálni és adatot cserélni. A legnagyobb kihívást az ipari környezetben használt, eltérő technológiák, régi (*legacy*) rendszerek és inkompatibilis adatprotokollok jelentik. Az IOT Analytics 2025-ös riportja alapján az IT vezetők 95%-a szembesül ezzel a problémával [14].
- **Kiberbiztonság**  
A kiberbiztonság az ipari mesterséges intelligencia rendszerek védelmét jelenti a digitális fenyegetésekkel, például hackertámadásokkal, adatszivárgással vagy rendszerleállásokkal szemben. Mivel a mesterséges intelligencia egyre fontosabb szerepet játszik a gyártási folyamatokban, megnő a biztonsági kockázat is: célponttá válhatnak az ipari rendszerek, amelyekben sérülhetnek az érzékeny adatok vagy akár a fizikai berendezések is.
- **Munkaerő átképzés (*workforce reskilling*)**  
A mesterséges intelligenciát használó gyártók fele szerint a mesterséges intelligenciához értő szakemberek hiánya jelentős akadályt jelent. [14] A munkaerő átképzése azokat az erőfeszítéseket jelenti, amelyek célja, hogy az alkalmazottak elsajátítsák a mesterséges intelligenciához kapcsolódó új készségeket és technológiákat. A mesterséges intelligencia bevezetése az iparban átalakítja a munkaköröket és újfajta szakértelmet igényel. Sikeres átképzéshez szükség van folyamatos tanulási lehetőségekre, gyakorlati képzésekre, valamint vállalati és oktatási intézmények összefogására, azonban számolni kell a munkaerő lemorzsolódásával, ami bizonyos esetekben jelenthet tudásvesztést is, különösen egy rosszul dokumentált környezetben.
- **Etikus mesterséges intelligencia használat (*ethical AI deployment*)**  
Az etikus mesterséges intelligencia alkalmazás a fejlesztési és implementációs folyamatok során alkalmazandó etikai normák és irányelvek betartását jelenti, mint az átláthatóság, méltányosság, adatvédelem és felelősség kérdései. Ipari környezetben ez különösen fontos, hiszen a mesterséges intelligencia döntései hatással lehetnek emberek biztonságára és jogaira.

Ezen problémák jól szemléltetik, hogy a mesterséges intelligencia nem stratégiai alapon történő bevezetése jelentős kockázatot hordoz magában. A Gartner 2025-ös, 432 céget érintő felmérése arra is rávilágít, hogy ezen kihívások más-más súllyal jelennek meg, attól függően, hogy az egyes cégek milyen érettségi szinten vannak a Gartner AI Maturity Model szerint (6. ábra) [17].



6. ábra: A mesterséges intelligencia bevezetés akadályai [17]

A stratégia alapon bevezetett mesterséges intelligencia rendszerek felépítésénél/kiválasztásánál a fenti kihívások rangsorolhatók és a megvalósítandó rendszer, illetve az azt működtető szervezet kell, hogy kezelje ezen kihívásokat. Ebben az esetben a rendszerbevezetésre fordított költség rövid távon is meg tud térülni.

## 5. ESETTANULMÁNYOK A SIEMENS INDUSTRIAL AI PORTFOLIÓJÁBÓL

Ipari környezetben, mint minden pénzügyi alapon működő szervezetben, kiemelten fontos a beruházások megtérülésének vizsgálata, hiszen hibásan megválasztott megoldás ipari környezetbe történő illesztésével nem csak a fejlesztési és telepítési költséget veszíthetjük el, de a gyártás minőségét és mennyiségét is negatívan befolyásolhatja egy alulteljesítő rendszer.

Az ilyen rendszerbevetéseknél tehát 3 fő szempontot kell vizsgálni:

- Beruházási költség, ami magában foglalja a fizikai eszközök (például ipari PC-k), a megvásárolt vagy lefejlesztett alkalmazások, valamint ezek telepítésének és beüzemelésének költségét.
- Üzemeltetési költségek változását, ami korábbi üzemeltetési költségek – mint például karbantartás, emberi erőforrás, vagy éppen a selejt termékek költség – csökkenésének, és az újonnan bevezetett rendszer működtetésével kapcsolatos költségek – licenz és képzés díjak, adattárolási költségek, rendszer frissítések – növekedésnek különbségéből áll elő.
- Bevétel és produktivitás változás, ami a bevezetett rendszer céljától (például karbantartás-előrejelzés vagy minőség-ellenőrzés) függően eltérő lehet.

Az alábbi példák olyan rendszerbevezetésekből származnak, ahol a koncepció-validáció után a megoldás több gyártósorra vagy gyáregységre került bevezetésre.

### 5.1. Karbantartáselőrejelzés

Ahogy korábban kifejtettük, a karbantartás – különös tekintettel a nem-tervezett karbantartásra – az egyik legköltségesebb a gyártósoron történő esemény közül.

Az autóiipari karosszériaüzemekben több ezer pneumatikus fogókar működik, amelyek az egyes alkatrészeket rögzítik további megmunkálás céljából. Ezeket a karokat az üzemidő alapján, vagy váratlan meghibásodás miatt cserélik. Az egyes fogókarok állapotának monitorozása és a hibák okának mesterséges intelligencia segítségével történő osztályozása hozzájárul az előre nem tervezett leállások csökkentéséhez és a gyártás rendelkezésre állásának növeléséhez.

Mesterséges intelligencia, valamint az edge eszközök használatával automatikusan előre jelezhető az eszközök állapota, valamint az üzemeltetési adatok alapján azonosítható a meghibásodások legvalószínűbb okai.

Az ügyfél egy hatékony és megbízható ipari MI-megoldásból profitál, amely növeli a termelékenységet és a sor rendelkezésre állását az állásidők csökkentésével. A skálázható MI-infrastruktúra és a szabványosított futtatókörnyezet jelentősen mérséklék a megoldás bekerülési és üzemeltetési költséget, továbbá, akár 80%-kal csökkentik a rendszer bevezetés idejét.

Felhasznált eszközök:

- S7 Connector
- Siemens Industrial AI Suite [18]
- Siemens Industrial Edge [19]

### 5.2. Szoftveres szenzorok

A gyártási folyamatok jelentős részében szükség lehet valamilyen mérés elvégzésére, hogy a folyamatos termelés és a termékminőség biztosítható legyen. Ezen mérések egy része, ahogy korábban is elemeztük, könnyen mérhető, és így könnyen automatizálható. Azonban előfordulnak olyan komplex mérési igények, ahol a fizikai szenzorok alkalmazása vagy nem célszerű, vagy nem lehetséges.

Azokban a vegyipari gyártási folyamatokban, ahol különböző vegyületeket keverési arány fenntartása kiemelten fontos lehet az üzembiztonság és a gyártásminőség fenntartása érdekében a pontos mérés/ellenőrzés kiemelt figyelmet kap.

Egy tisztítószereket gyártó cég gyártási folyamatában több kémiai eljárás megy végbe a késztermék előállításának során. A gyártott termék minőségének biztosítása érdekében számos vegyület koncentrációjának mérése szükséges a gyártás különböző fázisaiban.

Az üzemeltetési döntések, beleértve a folyamat beállítási pontjainak módosítását is, ezen mérések eredményein alapulnak.

A korábbi mintavételezési eljárás megkövetelte, hogy az üzemek teljes munkaidős személyzetet alkalmazzanak a minőségellenőrzéshez és a folyamatirányításhoz. A gyártás során 2-4 óránként mintát vettek a gyártás különböző pontjain, azokat a laborba szállították, a mintákat kielemezték, majd a mért értékek alapján elvégezték a szükséges folyamat beállítás-módosításokat. A mintavételezések közötti időszakokban azonban a vegyületek koncentrációja elmozdulhat, ami nem megfelelő minőségű termék gyártását eredményezi.

A kézi mintavételezés hátrányait egy mesterséges intelligencia modell váltotta, amely a keverőtartályba érkező alapanyagok mennyiségéből előre jelezte a keverékben előforduló vegyületek arányát. Az előrejelzés alapján a rendszer utasítást adott a folyamatvezérlő rendszernek a megfelelő alapanyag(ok) koncentrációjának növelésére, hogy a kívánt koncentrációt elérjék.

Ez a rendszer nem csak megszüntette a korábbi eljárással járó 2-4 órás mintavételezés nélküli gyártást és az esetlegesen előforduló, nem megfelelő minőségű gyártást, de csökkenteni tudta a teljes munkaidős személyzet ezáltal tovább csökkentve a gyártási költségeket és a selejt arányt.

Felhasznált eszközök:

- Siemens Industrial Edge [19]
- Siemens Industrial AI Suite [18]

### 5.3. Mesterséges intelligencia alapú minőségellenőrzés

A gépi látáson alapuló minőségellenőrzés már az 1960-as évek óta része a fejlett gyárak működésének. A technológia fejlődésével a gépilátáson alapuló minőségellenőrzés számos evolúciós mérföldkövön ment keresztül. Az utóbbi 15 évben a mesterséges intelligenciával támogatott rendszerek nyertek teret.

Ilyen rendszer került kifejlesztésre egy tisztítószerek gyártásával foglalkozó ügyfél számára, ahol a gyártósoron egy nagysebességű szállítószalag szállította a késztermékeket, amelyek között hibás darabok is előfordulhattak. A gyártás sebessége miatt a kézi osztályozás nem volt megvalósítható, és a hagyományos gépi látás alapú rendszerek vagy nem bizonyultak praktikusnak, vagy túl sok hibás riasztást eredményeztek.

Az elégtelen minőségellenőrzés következtében termék-reklamációk, bevételkiesés, vagy más gépek és folyamatok működési problémái jelentkeztek.

A problémára megoldásként egy mesterséges intelligencián alapuló látásmodellt fejlesztettek ki, amely képes volt a terméktípusok osztályozására. A megvalósított rendszer egy, a gyártósoron telepített MI-t használó gépi látás rendszert és egy szinkronizált selejtező mechanizmust tartalmazott.

Ez a rendszer skálázható platformra épült, így lehetővé tette a széles körű bevezetést, és integrálhatóvá vált felhőalapú MI-megoldásokkal is, amelyek támogatták a különféle termékváltozatok kezelését. Az új megoldás révén jelentősen javult a minőségellenőrzés pontossága, csökkent a hibás riasztások száma, és nőtt a termelés megbízhatósága.

Felhasznált eszközök:

- Siemens Industrial Edge [19]
- Siemens Industrial AI Suite [18]

## 6. A FELTÖREKVŐ TRENDEK AZ IPARBAN

### 6.1. Ötödik ipari forradalom

Tekintve, hogy a különböző iparágak és cégek eltérő ütemben vezetnek be és alkalmazzák az Ipar 4.0-ban használt technológiákat, nem tekinthetjük lezártnak a negyedik ipari

forradalmat, hiszen bizonyos aspektusai, technológiai még nem terjedtek el olyan mértékben, hogy általános használtként tekinthessünk rájuk. Ettől függetlenül, a technológia exponenciális fejlődése miatt már a küszöbön áll az ötödik ipari forradalom is.

Ennek egyenes következménye, hogy mélyülni fog a szakadék azon cégek és iparágak között, melyek képesek lépést tartani a technológia fejlődésével és a legújabb technológiákat alkalmazni és azok között, akik megrekedtek valamely korábbi evolúciós szinten.

Az Ipar 5.0 meghatározó technológiai irányai

- Ember központú mesterséges intelligencia és az emberrel együttműködő robotok (*collaborative robots, cobots*), amelyek a gyárakban végzett, főként nagy fizikai megterhelést jelentő vagy repetitív feladatokban, illetve az emberi munkavégzésre alkalmatlan környezetben fogják helyettesíteni az embereket [20]. Jellemzőjük az egyszerű használat és a gyártósoron elvégezhető újra konfigurálás, mellyel különböző feladatok elvégzését lehet rájuk bízni.
- Fenntarthatóság és a fenntartható gyártásra való törekvés úgy a technológia fejlődése, mint az egyre növekvő társadalmi nyomás hatására még inkább előtérbe fog kerülni. A technológia ugrásszerű fejlődése lehetőséget kínál a gyárak és gyártási folyamatok energiaszükségletének optimalizálására, a hulladékanyagok csökkentésére vagy újrahasznosítására.
- Decentralizált gyártástechnológiák és valós idejű adatokon alapuló tervezés lehetőséget teremt a sokkal kisebb léptékű, de testreszabott gyártást biztosító gyártó egységek működtetésére, ezáltal csökkentve az átfutási időt, raktározási költségeket, mindazonáltal lehetőséget biztosítva az olyan egyedi igények kiszolgálására, amik megkövetelik az ipari minőséget, de a kis darabszám miatt nem gyárthatók költséghatékonyan. Tipikusan ilyen technológia a 3D nyomtatás, ami lehetőséget biztosít különféle anyagokból (fém, műanyag, vagy akár beton) készített egyedi termékek gyártására.

## 6.2. Kitekintés a gyártás távoli jövőjébe

A technológia és az ipar fejlődése egymás katalizátorai. A gyártás jövőjét egyre inkább a számítástechnika vívmányai fogják befolyásolni, elmosva a korábbi éles határt az informatika (IT) és az ipari környezetek (OT) között.

A következő technológiák jelenleg nem minősülnek széles körben alkalmazottnak a gyártástechnológiában, de szerepük pont az IT és OT rendszerek közötti határok elmosódása miatt jelentős lesz.

### 6.2.1. Értelmezhető és Magyarázható mesterséges intelligencia

Amikor mesterséges intelligencia modellekről beszélünk, felépítésüknél fogva két csoportot megkülönböztethetünk meg. Az első az eredendően értelmezhető mesterséges intelligencia (interpretable AI) modellek csoportja [21], melyben a modellek egyszerűbb

felépítése lehetőséget biztosít a modell belső működésének megértére, utólagosan alkalmazott magyarázó algoritmusok nélkül is.

A másik kategóriába az úgynevezett fekete doboz modellek (a modell belső működésébe nem látunk bele) tartoznak, melyek belső felépítése és működését kizárólag magyarázó algoritmusok segítségével lehet megérteni. Ezen magyarázó algoritmusokat és használatukat nevezzük magyarázható mesterséges intelligenciának (explainable AI)

Egy 2024-es szisztematikus irodalomfelmérés 45, gyártással és magyarázható mesterséges intelligenciával foglalkozó publikáció metaanalízise alapján három gyártáson belüli alkalmazási területet határoztak meg [22].

Az első alkalmazási terület a modellek megbízhatóságának biztosítása, a döntésekbe vetett bizalom kiépítése és fenntartása, valamint a döntések mögött láthatatlanul meghúzódó torzítások feltárása.

A második, az általuk tudásfeltárás-ként definiált terület, az ok-okozati összefüggések felderítésére, a gyártási folyamatok és termékspecifikus adatok védelmére, valamint egy adott modell más gyártási környezetben vagy feladatban történő alkalmazhatóságának felmérésére szolgál.

A harmadik terület a döntéstámogatás. A magyarázható mesterséges intelligencia képessé teszi a felhasználókat arra, hogy magabiztosan hozzanak adatvezérelt döntéseket azáltal, hogy érthetővé teszi a komplex mesterséges intelligencia rendszereket, függetlenül attól, hogy mennyi tapasztalattal rendelkeznek a mesterséges intelligencia területén.

Az MI-modellek emberi étellel, biztonsággal vagy alapvető jogokkal kapcsolatos döntéshozatalban történő alkalmazása imperatívusként követeli meg a döntési mechanizmusok teljes átláthatóságát. Ezt az utóbbi években formálódó szabályozói háttér is előtérbe helyezi. A három legjelentősebb szabályzás az EU AI Act [23], az amerikai AI Action Plan [24], valamint a kínai Interim Measures for the Management of Generative AI Services („the Measures”) [25].

Ezen szabályzások közül az Európai Unió AI Act a legszélesebb körű, és jelenleg (a kínai szabályzás azon pontját leszámítva, miszerint a felhasználók jogosultak magyarázatot kapni, ha egy algoritmus jelentősen befolyásolja érdekeiket) az egyetlen, amely ténylegesen megköveteli a mesterséges intelligencia modellek átláthatóságát.

Mindazonáltal számítani lehet ezen szabályzások szélesebb körben történő megjelenésére az úgynevezett „Brüsszel effektus” miatt. Eszerint az Európai Unió piaci ereje elegendő, hogy a nemzetközi cégek önként kiterjesztik az uniós szabályzásokat saját, globális működésükre, ezáltal formálva az iparági sztenderdeket és az anyaország szabályozói háttérét [26].

### 6.2.2. Testet öltött (embodied) mesterséges intelligencia

A testet öltött mesterséges intelligencia a mesterséges intelligencia olyan formájára utal, amely a fizikai világban saját „testén” keresztül, szenzorokkal, motorokkal és egyéb robotikai elemekkel interakcióba lép és tanul. Ellentétben a pusztán kognitív mesterséges intelligenciával, amely csak modellekre és adatokra támaszkodik, a testet öltött MI szenzoros érzékelése révén közvetlenül kapcsolódik a

fizikai környezethez – ez a mesterséges intelligencia fejlődésének új, dinamikus területe.

Ezek a rendszerek kognitív, szenzoriális és aktuációs képességei a fizikai környezetben, jelentős előrelépést hozhat a termelékenység és hatékonyság növelésében számos iparágban. A testet öltött MI kulcsszerepet játszhat az ipari gyártásban, logisztikában és az egészségügyben, ahol várhatóan egyre több általános célú robotot fognak alkalmazni – legyen szó kerek, négy lábú vagy humanoid robotokról.

Jelenleg a testet öltött mesterséges intelligencia még nem érhető el széles körben kereskedelmi forgalomban, mivel több alapvető kihívás is akadályozza a terjedését. Az érzékelési képességeket fejlesztő alapmodellek továbbra is nagymennyiségű, feladat-specifikus adatot igényelnek a tanításhoz és skálázhatóságához. Fizikailag a robotikai innováció egyelőre nem képes reprodukálni az emberi kéz összetettségét és precíz mozgását, ráadásul az energiaellátás és akkumulátor-élettartam is komoly korlátot jelent. Ezek a technológiai és ellátási lánc problémák mind nehezítik a tömeges alkalmazást, mégis, a robotikai technológiák bevezetése továbbra is dinamikusan fejlődik: az ABI Research előrejelzése szerint a kereskedelmi és ipari robotokból származó bevételek 2030-ra elérhetik a 164 milliárd dollárt, ami 2024-től számított 21,3%-os éves növekedési ütemet (CAGR) jelent [27].

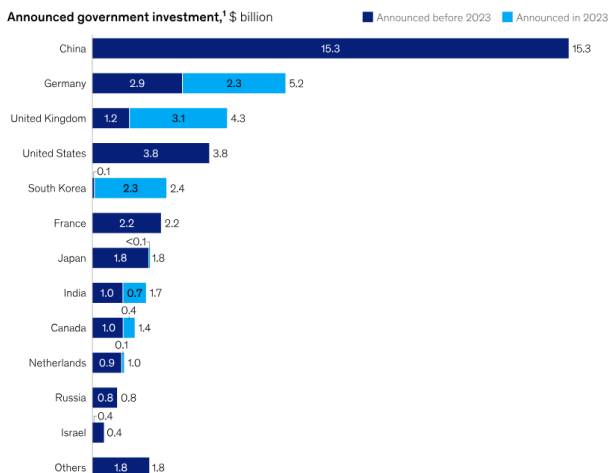
### 6.2.3. Kvantumszámítógépek

A legizgalmasabb és egyben legkevésbé kiforrott irány a kvantumtechnológia alkalmazása. Bár a kvantumtechnológia teoretikus alapjait Max Planck és Albert Einstein már az 1900-as évek elején lefektették, a kereskedelmi célú fejlesztés csak 100 évvel később, a 2010-es években kezdődött.

A McKinsey 2024-ben kiadott riportjában négy olyan ágazatot sorol fel, amelyek valószínűsíthetően a kvantumtechnológia alkalmazásában az élen járnak. Ezek a vegyipar, pénzügy, közlekedés, és az élettudomány [28].

Bár a privát szektor beruházásai 2023-ban jelentősen csökkentek, a publikus szektor beruházásai 50 százalékkal nőttek az előző évhez képest (7. ábra) [28].

Global public investments in quantum technology reached \$42 billion in 2023.



\*Total historic announced investment; timelines for investment vary by country.

7. ábra: Publikus szektor kvantumtechnológiai beruházásai 2023-ig [28]

A jelenlegi technológiai kihívások és korlátok miatt kvantumtechnológia a jövőbeni alkalmazása egyelőre nem tisztázott. Mindazonáltal számos olyan, jelenleg is számításgépes terület látszik körvonalazódni, ahol a kvantumszámítógépekben rejlő potenciálokat ki lehet aknázni.

Bár egyelőre csak teoretikus alapokon léteznek, de a kvantum neurális hálózatok a jelenleginél sokkal pontosabb és gyorsabb mesterséges intelligencia modellek megalkotásával kecsegtetnek, melyek akár képesek lehetnek következtetni a gyártósor bizonyos pontjának meghibásodására pusztán a termékeken előforduló hibák előfordulását figyelembe véve.

A valóság-hű szintetikusadatgenerálás jelenleg csak kisléptékben érhető el, azonban a kvantumszámítógépek számítási kapacitása lehetővé teszi azt elérhető adatok gyors és pontos feltérképezését, felismerve az adatok közötti rejtett összefüggéseket. Ezeket az összefüggéseket is figyelembe véve olyan szintetikus adathalmaz hozható létre, amely tetszőleges mélységben és mennyiségben tartalmaz a való életben előforduló adat mintázatokat.

Az anyagfejlesztés és a kapcsolódó szimulációs feladatok egyre pontosabb és gyorsabb számítási kapacitást igényelnek – a kvantumtechnológia pedig pont ezt ígéri. Alkalmazásával nem csak alkatrészek és termék részeket végezhetünk szimulációt, hanem komplex rendszerekre, akár városokra kiterjedően is [29].

Számos vállalat fedezte már fel a kvantum technológiában rejlő lehetőségeket és kezdte már el kutatni vagy alkalmazni a benne rejlő lehetőségeket.

A kvantumtechnológia alkalmazásának területe gyorsan fejlődik, a pénzügyi szolgáltatások pedig élen járnak ebben a folyamatban, mivel összetett számítási igényeikhez és a legmodernebb technológiákba való befektetési hajlandóságukhoz igazodnak. Ahogy a kvantum hardverek tovább fejlődnek és az árak csökkennek, várhatóan minden iparágban felgyorsul majd az elterjedésük.

### 6.2.4. Általános mesterséges intelligencia

Az általános mesterséges intelligencia (Artificial General Intelligence, AGI) a mesterséges rendszerek azon csoportját jelenti, melyek emberi (vagy éppen azt meghaladó) kognitív képességekkel rendelkezik minden tudás és érvelési (reasoning) területen [30].

Ezek a rendszerek potenciálisan képesek a különböző alkalmazási területek közötti tudástranszferre, saját fizikai entitásuk észlelésére és értelmezésére, képesek lehetnek spontán reakciókra vagy éppen általános tárgyak flexibilis felhasználására [31].

Az általános mesterséges intelligenciával kapcsolatos kutatások és remények egészen az 1950-es évekig nyúlnak vissza, és minden nagyobb, a mesterséges intelligencia fejlődést érintő szakaszban felmerült ezen rendszerek belátható időn belüli megalkotása. Ezek az elvárások és törekvések tudományosan megalapozottak. Az AGI elérése és kereskedelmi implementációja paradigmátikus változásokat eredményezhet a gyártási folyamatokban.

Jelenleg csak találgatni tudunk, hogyan fog kinézni az ipari termelés AGI használatával. Néhány elvárt karakterisztikája ezen rendszereknek előrevetíthet alkalmazási területeket.

A különböző területek között tudásátadási lehetőséget biztosíthat olyan általánosan használható karbantartás-

előrejelző rendszerek megalkotására, amik a gyártás minden paraméterét nyomon követik, és különböző iparágak és gyárak adatait is figyelembe véve 100%-közeli rendelkezésre állást biztosíthat.

A termékfejlesztés, napjaink szoftverfejlesztési irányához hasonlóan, drasztikusan egyszerűsödhet. Egy jól meghatározott célcsoport és termék ötlet alapján az általános mesterséges intelligencia képes lehet a célcsoport igényeinek felmérésére, a termék specifikáció célcsoport-igényekhez történő igazítására és termék prototípusok százainak egyidejű digitális modelljének elkészítésére, amiket szimulációs modellekkel kiértékelve és legmegfelelőbb terméket állíthatja majd elő. Az ötlettől a tervezésen, tesztelésen át minden lépés a digitális térben történhet majd.

Az ellátási-lánc menedzsment egy új szintre emelkedhet azáltal, hogy egy általános mesterséges intelligencia hetekkel, hónapokkal előre képes lesz olyan, a globális ellátási láncot és ezáltal a termelékenységet érintő politikai, szociális, vagy természeti eseményeket és befolyásoló tényezőket előre jelezni és a szükséges vészhelyzeti terveket felállítani.

A gyártási precizitás atomi szintre történő növelése, a hiba nélküli gyártás vagy akár a személyre szabott gyógyszergyártás mind elérhető közelségbe kerülhetnek.

Az AGI megjelenésével a technológiai lehetőségek nem lesznek korlátozva az emberi kognitív kapacitás által. Olyan anyagok, technológiák, paradigmák jelenhetnek meg, melyeket jelenleg még elképzelni sem tudunk, és amik által a gyártás, ahogy most ismerjük végleg meg fog változni.

## 7. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JÖVŐBELI IRÁNYOK

### 7.1. Főbb megállapítások

Az emberiség a vadászó-gyűjtögető életmód mezőgazdaságra és később az ipari termelésre történő felcserélésével évezredekken keresztül alakított ki a most ismert társadalmi és gazdasági rendszert. Ezen társadalmi és gazdasági rendszer motorja a közelmúltig az iparosodás, tömegtermelés, a többlet-jobban-olcsóbban szemlélet volt.

A mesterséges intelligencia, különösen az általános mesterséges intelligencia magában hordozza a lehetőséget a termelés mostani szemléleteinek megváltoztatásához, mert a gyártástervezésnél, optimalizálásnál, és ellenőrzésnél olyan aspektusokat is képes lehet figyelembe venni, melyek eddig kívül estek a gyártásautomatizálás keretein.

### 7.2. Gyakorlati implikációk

A tömegtermelés, ahogy most ismerjük, nem fog egyik napról a másikra eltűnni. Azonban a technológia fejlődésével és a gyártási költségek fokozatos csökkenésével a személyre szabott termelés teret nyerhet az uniformizált gyártással szemben

Az információs technológia és az ipar egyre inkább összeolvad, és az iparban történő változások sebessége az információs technológiában tapasztalhatóéval válik egyenlővé.

Ezzel együtt a jövő gyárainak számos olyan kihívással kell megküzdeni, amik eddig nem, vagy csak korlátozottan fordultak elő. Az adatbiztonság garantálása, a hálózatra kapcsolt rendszerek sérülékenysége vagy akár a mesterségesintelligencia-rendszerek adatminőségre való

érzékenysége mind olyan kockázati faktorok, amikre az új technológiák bevezetésével egyidejűleg fel kell készülni.

### 7.3. Záró gondolatok

A mesterséges intelligencia, a kvantumszámítógépek és a segítségükkel kifejlesztett, ma még nem létező technológiák nem csak az ipari, és ezáltal a gazdasági és társadalmi evolúciójának következő lépcsőfokát fogják megalapozni, és magukban hordozzák annak lehetőségét, hogy az emberi fejlődés utolsó gátjait ledöntsék.

## IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Y. N. Harari, *Sapiens: A Brief History of Humankind*, London: Vintage, Penguin Random House, 2015.
- [2] Encyclopedia Britannica, Inc, „Industrial Revolution” [Online]. Available: <https://www.britannica.com/event/Industrial-Revolution>. [Hozzáférés dátuma: 08 08 2025].
- [3] Encyclopedia Britannica, Inc, „Industrial Revolution Key Facts” [Online]. Available: <https://www.britannica.com/summary/Industrial-Revolution-Key-Facts>. [Hozzáférés dátuma: 08 08 2025].
- [4] K. Schwab, *The Fourth Industrial Revolution*, New York: Crown Publishing Group, 2016.
- [5] T. Philbeck és N. Davis, „THE FOURTH INDUSTRIAL REVOLUTION: SHAPING A NEW ERA”, *Journal of International Affairs*, %1. kötet72, %1. szám1, pp. 17-22, 2018.
- [6] „Digital Supply Chain”, Coursera, [Online]. Available: <https://www.coursera.org/in/articles/digital-supply-chain>. [Hozzáférés dátuma: 11 08 2025].
- [7] Oxford University press, „Oxford English Dictionary” [Online]. Available: [https://www.oed.com/dictionary/artificial-intelligence\\_n?tab=meaning\\_and\\_use#38531565](https://www.oed.com/dictionary/artificial-intelligence_n?tab=meaning_and_use#38531565). [Hozzáférés dátuma: 08 08 2025].
- [8] K. Knight és E. Rich, *Artificial Intelligence*, New York: McGraw-Hill, 1991.
- [9] Santoshp, „Exploring the Subsets of Artificial Intelligence” [Online]. Available: <https://medium.com/@santoshp987/exploring-the-subsets-of-artificial-intelligence-45fec844716>. [Hozzáférés dátuma: 08 08 2025].
- [10] Stanford, „Stanford HAI - About” [Online]. Available: <https://hai.stanford.edu/about>. [Hozzáférés dátuma: 27 08 2025].
- [11] Stanford, „The 2025 AI Index Report” [Online]. Available: <https://hai.stanford.edu/ai-index/2025-ai-index-report>. [Hozzáférés dátuma: 27 08 2025].
- [12] Stanford, „Artificial Intelligence Index Report 2025”, 2025.
- [13] Business insider, „CHART OF THE DAY: The Manufacturing Cost Components For A Bunch Of Different Things”, 4 2013. [Online]. Available: <https://www.businessinsider.com/chart-the-cost-of-manufacturing-stuff-2013-4>. [Hozzáférés dátuma: 14 09 2025].
- [14] F. Brügge, K. L. Lueth, P. Wegner, S. Sinha és C. Pratama, „Industrial AI Market Report 2025-2030”, Hamburg, 2025.
- [15] W. E. Barkman, *In-Process Quality Control for Manufacturing*, Boca Raton: CRC Press, 1989.
- [16] ABB, „Value of Reliability: ABB Survey Report 2023”, ABB, Zurich, 2023.
- [17] Gartner Press Release, „Gartner Survey Finds 45% of Organizations With High AI Maturity Keep AI Projects Operational for at Least Three Years”, GARTNER is a trademark of Gartner, Inc. and/or its affiliates., 30 June 2025. [Online]. Available: <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2025-06-30-gartner-survey-finds-forty-five-percent-of>

- organizations-with-high-artificial-intelligence-maturity-keep-artificial-intelligence-projects-operational-for-at-least-three-years. [Hozzáférés dátuma: 26 08 2025].
- [18] Siemens, [Online]. Available: <https://www.siemens.com/global/en/products/automation/topic-areas/industrial-ai/industrial-ai-suite.html>. [Hozzáférés dátuma: 01 09 2025].
- [19] Siemens, „Industrial Edge – maximize your competitive edge” [Online]. Available: <https://www.siemens.com/global/en/products/automation/topic-areas/industrial-edge.html>. [Hozzáférés dátuma: 09 09 2025].
- [20] A. M. Djuric, R. J. Urbanic és J. L. Rickli, „A Framework for Collaborative Robot (CoBot) Integration in Advanced Manufacturing Systems”, *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, %1. kötet9, %1. számNo.2, pp. 457-464, 2016.
- [21] C. Rudin, „Stop explaining black box machine learning models for high stakes decisions and use interpretable models instead”, *Nature Machine Intelligence*, %1. kötet1, pp. 206-215, 2019.
- [22] Z. Alexander, D. H. Chau és C. Saldaña, „An Interrogative Survey of Explainable AI in Manufacturing”, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, %1. kötet20, %1. szám5, 27 02 2024.
- [23] European Commission, „AI Act”, [Online]. Available: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/regulatory-framework-ai>. [Hozzáférés dátuma: 28 08 2025].
- [24] E. O. o. t. U. States, „Winning the Race AMERICA’S AI ACTION PLAN”, 2025. [Online]. Available: <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2025/07/Americas-AI-Action-Plan.pdf>. [Hozzáférés dátuma: 28 08 2025].
- [25] M. Zou és L. Zhang, „Navigating China’s regulatory approach to generative artificial intelligence and large language models”, *Cambridge Forum on AI: Law and Governance*, %1. kötet1, 06 01 2025.
- [26] A. Bradford, *The Brussels Effect: How the European Union Rules the World*, New York, NY: Oxford University Press, 2023.
- [27] B. Chan, M. Foo és A. Cavalier, „SuperAI 2025 Global collaboration key to unlocking full potential of AI”, *ABI Research*, New York, 2025.
- [28] M. Bogobowicz, K. Dutta, M. Gschwendtner, A. Heid, M. Issler, N. Mohr, H. Soller, R. Zimmel és A. Zhang, „Steady progress in approaching the quantum advantage”, *McKinsey & Company*, New York, 2024.
- [29] E. Garcell, „The promise of quantum computing in manufacturing”, *Endeavor Business Media*, Nashville, 2024.
- [30] B. Goertzel, „Artificial General Intelligence: Concept, State of the Art, and Future Prospects”, *Journal of Artificial General Intelligence*, %1. kötet5, %1. szám1, 2014.
- [31] B. Goertzel, „Mapping the Landscape of AGI Ideas and Conclusions from the 2009 AGI Roadmap Workshop” [Online]. Available: [https://agi-conf.org/2011/wp-content/uploads/2009/06/AGI\\_Roadmap.pdf](https://agi-conf.org/2011/wp-content/uploads/2009/06/AGI_Roadmap.pdf). [Hozzáférés dátuma: 14 09 2025].
- [32] J. Winter, „What is Generative AI and where does it fit into the scope of AIM”, *Naperville*, 2023.
- [33] H. K. Mohajan, *Third Industrial Revolution Brings Global Development*, Bangladesh: American Institute of Science, 2021.
- [34] C. R. China, „Five machine learning types to know”, *International Business Machine*, [Online]. Available: <https://www.ibm.com/think/topics/machine-learning-types>. [Hozzáférés dátuma: 08 08 2025].
- [35] Siemens, „Plant Simulation”, [Online]. Available: <https://plm.sw.siemens.com/en-US/tecnomatix/plant-simulation-software/>. [Hozzáférés dátuma: 01 09 2025].

# Prediktív karbantartás alkalmazása CNC megmunkálóközpontoknál az Ipar 4.0 környezetben

## Application of Predictive Maintenance in CNC Machining Centers within an Industry 4.0 Environment

Burai István György

Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Budapest, Magyarország  
burai.istvan@uni-obuda.hu

**Összefoglalás** — Az ipari digitalizáció és az Ipar 4.0 technológiák megjelenése jelentősen átalakította a gyártóberendezések üzemeltetésének és karbantartásának módszereit. A hagyományos reaktív és időalapú karbantartási stratégiákat egyre inkább felváltják az adatvezérelt állapotfelügyeleti megoldások, amelyek lehetővé teszik a berendezések működési állapotának folyamatos monitorozását és a meghibásodások előrejelzését. A prediktív karbantartás szenzoradatok, ipari kommunikációs rendszerek és fejlett adatfeldolgozási módszerek alkalmazásával támogatja a karbantartási döntéshozatalt, ezáltal csökkentve a nem tervezett gépleállások kockázatát. A tanulmány bemutatja a prediktív karbantartási rendszerek működési elvét, valamint azok alkalmazási lehetőségeit CNC megmunkálóközpontok esetében. A cikk ismerteti a legfontosabb állapotdiagnosztikai módszereket, például a rezgésdiagnosztikát, a hőmérséklet-monitorozást és az áramfelvétel elemzését, valamint áttekinti az ipari adatgyűjtési és kommunikációs technológiák szerepét az Ipar 4.0 gyártási környezetben. A vizsgálat rámutat arra, hogy a prediktív karbantartási megoldások hozzájárulhatnak a gyártási folyamatok megbízhatóságának növeléséhez, a berendezések rendelkezésre állásának javításához és a karbantartási költségek optimalizálásához.

**Kulcsszavak:** Ipar 4.0, prediktív karbantartás, CNC megmunkálóközpont, állapotfelügyelet, ipari adatgyűjtés

**Abstract** — The digital transformation of manufacturing systems and the emergence of Industry 4.0 technologies have significantly changed maintenance strategies in industrial production. Traditional reactive and time-based maintenance approaches are increasingly replaced by data-driven condition monitoring systems that enable continuous monitoring of equipment status and the prediction of potential failures. Predictive maintenance uses sensor data, industrial communication technologies and advanced data analysis methods to support maintenance decision-making and reduce the risk of unexpected machine downtime. This paper presents the operating principles of predictive maintenance systems and their potential application in CNC machining centers. The study discusses the main condition monitoring methods, including vibration analysis, temperature monitoring and electrical current analysis, and reviews the role of industrial data acquisition and communication technologies in Industry 4.0 manufacturing environments. The results highlight that predictive maintenance solutions can significantly improve production

reliability, increase machine availability and optimize maintenance costs.

**Keywords:** Industry 4.0, predictive maintenance, CNC machining centers, condition monitoring, industrial data acquisition

### 1 BEVEZETÉS

Az ipari termelési rendszerek az elmúlt évtizedben jelentős technológiai átalakuláson mentek keresztül, amelyet a szakirodalom az Ipar 4.0 fogalmával ír le. Az új ipari paradigma a gyártórendszerek digitalizációjára, hálózatba kapcsolására és az információs technológiák integrációjára épül. Ennek eredményeként a modern gyártási rendszerek egyre inkább adatvezérelt működést valósítanak meg, amely lehetővé teszi a termelési folyamatok hatékonyabb irányítását és optimalizálását [1][2].

A gyártóberendezések megbízható működése alapvető feltétele a stabil és hatékony termelési folyamatoknak. A nem tervezett gépleállások jelentős termelési veszteséget okozhatnak, valamint növelhetik az üzemeltetési költségeket. A hagyományos karbantartási stratégiák, mint a reaktív vagy az időalapú preventív karbantartás gyakran nem képesek hatékonyan kezelni a komplex gyártórendszerek működési kockázatait. A modern ipari környezetben ezért egyre nagyobb figyelmet kapnak az állapotfüggő és prediktív karbantartási megoldások, amelyek célja a berendezések működési állapotának folyamatos monitorozása és a potenciális meghibásodások előrejelzése.

A prediktív karbantartási rendszerek működése elsősorban szenzoradatok gyűjtésén és azok elemzésén alapul. A különböző diagnosztikai módszerek például rezgésanalízis, hőmérséklet monitorozás vagy elektromos áramfelvétel vizsgálata lehetővé teszik a berendezések állapotának folyamatos nyomon követését és az eltérések korai felismerését [3][4]. Az ipari adatgyűjtési rendszerek és a fejlett adatfeldolgozási módszerek fejlődése tovább növelte a prediktív karbantartás alkalmazhatóságát a modern gyártási környezetben.

A prediktív karbantartás különösen fontos szerepet játszik a CNC megmunkálóközpontok üzemeltetésében, mivel ezek a berendezések komplex mechanikai és vezérlési rendszereket tartalmaznak, amelyek meghibásodása jelentős termelési kiesést okozhat. A CNC gépek kritikus komponenseinek – főorsó, szervohajtások

vagy szerszámrendszer – állapotfelügyelete ezért kiemelt jelentőségű a gyártási folyamat megbízhatóságának biztosítása szempontjából.

A tanulmány célja a prediktív karbantartási rendszerek működési elvének bemutatása, valamint annak vizsgálata, hogy ezek a megoldások milyen módon alkalmazhatók CNC megmunkálóközpontok esetében az Ipar 4.0 környezetben. A cikk áttekinti a karbantartási stratégiák fejlődését, bemutatja a prediktív karbantartási rendszerek technológiai alapjait, valamint ismerteti azok ipari alkalmazási lehetőségeit.

## 2 KARBANTARTÁSI STRATÉGIÁK FEJLŐDÉSE

Az ipari karbantartási stratégiák fejlődése szorosan kapcsolódik a gyártórendszerek technológiai fejlődéséhez. A karbantartási módszerek az ipari termelés korai szakaszában elsősorban a meghibásodások utáni javításra épültek, azonban a gyártórendszerek komplexitásának növekedésével egyre nagyobb igény jelent meg a berendezések működési megbízhatóságának növelésére és a nem tervezett leállások csökkentésére [4][5].

A karbantartási stratégiák fejlődése általában három fő megközelítés mentén írható le: reaktív, preventív és prediktív karbantartás (1. ábra).



1. ábra: Karbantartási stratégiák fejlődése

### 2.1 Reaktív karbantartás

A reaktív karbantartás gyakran *run-to-failure* (meghibásodásig tartó) stratégiaként is ismert, és a legegyszerűbb karbantartási megközelítés, amely során a karbantartási beavatkozás kizárólag a meghibásodás bekövetkezése után történik. Ez a módszer a berendezések kezdeti üzemeltetési szakaszában széles körben elterjedt volt, mivel nem igényelt külön karbantartási tervezést vagy állapotfelügyeleti rendszereket [6].

A reaktív karbantartás előnye az alacsony kezdeti költség, azonban jelentős hátránya, hogy a váratlan meghibásodások termelési kiesést és magas javítási költségeket eredményezhetnek. A modern ipari gyártórendszerekben ezért ez a megközelítés elsősorban csak nem kritikus berendezések esetében alkalmazható.

### 2.2 Preventív karbantartás

A preventív vagy időalapú karbantartás célja a meghibásodások megelőzése előre meghatározott karbantartási intervallumok alkalmazásával. Ebben az esetben a berendezések karbantartása vagy az alkatrészek cseréje meghatározott üzemidő vagy ciklusszám után történik [5].

Ez a megközelítés jelentős mértékben csökkentheti a váratlan meghibásodások valószínűségét, azonban gyakran olyan karbantartási beavatkozásokat is eredményez, amelyek műszakilag még nem indokoltak. Ennek következtében a preventív karbantartás bizonyos esetekben felesleges alkatrészcserehez és magasabb karbantartási költségekhez vezethet.

### 2.3 Prediktív karbantartás

A prediktív karbantartás a modern ipari karbantartási stratégiák egyik legfejlettebb formáját képviseli. A módszer alapja a berendezések működési állapotának folyamatos monitorozása és a meghibásodások előrejelzése különböző diagnosztikai és adatfeldolgozási módszerek alkalmazásával [7][8].

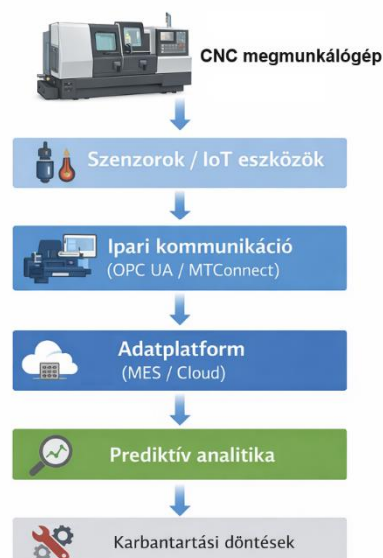
A prediktív karbantartási rendszerek szenzorok segítségével folyamatosan gyűjtik a berendezések működésével kapcsolatos adatokat, például rezgési jeleket, hőmérsékleti adatokat vagy elektromos terhelési paramétereket. Az összegyűjtött adatok elemzése lehetővé teszi az eltérések korai felismerését, így a karbantartási beavatkozások a tényleges műszaki állapot alapján tervezhetők meg [3].

Az ipari digitalizáció és az Ipar 4.0 technológiák fejlődése tovább növelte a prediktív karbantartás jelentőségét, mivel a modern gyártórendszerek egyre nagyobb mennyiségű működési adatot képesek gyűjteni és feldolgozni. Ennek eredményeként a prediktív karbantartás napjainkban a gyártási rendszerek megbízhatóságának növelésében és az üzemeltetési költségek csökkentésében kulcsfontosságú szerepet játszik [1][6].

## 3 PREDIKTÍV KARBANTARTÁSI RENDSZEREK MŰKÖDÉSI ELVE

A prediktív karbantartási rendszerek alapvető célja a gyártóberendezések működési állapotának folyamatos monitorozása, valamint a potenciális meghibásodások előrejelzése az üzemeltetési adatok elemzésével. A modern ipari rendszerekben ez a megközelítés a különböző szenzorokkal gyűjtött adatok, az ipari kommunikációs rendszerek és az adatfeldolgozási módszerek integrációjára épül [7][8].

A prediktív karbantartási rendszerek általában több egymással összekapcsolt technológiai elemből állnak (2. ábra). Ezek az elemek biztosítják a berendezések állapotának mérését, az adatok továbbítását, az adatok elemzését és a karbantartási döntések támogatását.



2. ábra: Prediktív karbantartási rendszer architektúrája

### 3.1 Szenzorok és állapotmonitorozás

A prediktív karbantartási rendszerek alapját a különböző mérési rendszerek és szenzorok jelentik, amelyek a berendezések működési paramétereit folyamatosan rögzítik. A leggyakrabban alkalmazott mérési módszerek közé tartozik a rezgésdiagnosztika, a hőmérsékletmonitorozás, az elektromos áramfelvétel vizsgálata, valamint az akusztikus jelanalízis [3].

A rezgésanalízis különösen fontos szerepet játszik a forgó gépegységek, úgymint csapágyak vagy elektromos motorok állapotának vizsgálatában. A rezgési jelek elemzésével korai stádiumban felismerhetők a mechanikai hibák, például a csapágykopás vagy a kiegyensúlyozatlanság [4].

### 3.2 Adatgyűjtés és kommunikáció

A szenzorok által gyűjtött adatok ipari adatgyűjtő rendszereken keresztül kerülnek feldolgozásra. A modern gyártórendszerekben az adatgyűjtést gyakran PLC alapú rendszerek, ipari IoT (*Internet of Things*, dolgok internete) eszközök vagy speciális adatgyűjtő egységek végzik.

Az adatátvitel különböző ipari kommunikációs protokollok segítségével történik, amelyek biztosítják a gyártóberendezések és az informatikai rendszerek közötti adatkapcsolatot. Az ipari digitalizáció fejlődésével egyre elterjedtebbé váltak az olyan szabványos kommunikációs megoldások, mint az OPC UA vagy az MTConnect, amelyek lehetővé teszik a gyártóberendezések állapotadatainak egységes kezelését [9].

### 3.3 Adatfeldolgozás és állapotdiagnosztika

Az adatgyűjtési rendszerek által rögzített adatok feldolgozása kulcsfontosságú szerepet játszik a prediktív karbantartás működésében. Az adatfeldolgozás során különböző statisztikai és matematikai módszereket alkalmaznak a berendezések működésében bekövetkező eltérések azonosítására [7][11].

A modern rendszerekben egyre gyakrabban alkalmaznak gépi tanulási algoritmusokat, amelyek képesek felismerni a normál működési állapottól való eltéréseket. Az ilyen módszerek lehetővé teszik az anomáliák automatikus detektálását, valamint a berendezések várható meghibásodásának előrejelzését [8].

### 3.4 Karbantartási döntéstámogatás

A prediktív karbantartási rendszerek végső célja a karbantartási döntések támogatása. Az adatfeldolgozás eredményeként a rendszer képes riasztásokat generálni, ha a berendezések működésében olyan eltérés figyelhető meg, amely potenciális meghibásodásra utal.

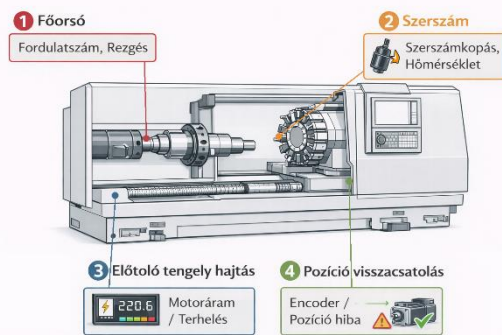
Az ilyen rendszerek segítségével a karbantartási beavatkozások tervezhetővé válnak, ami lehetővé teszi a karbantartási erőforrások hatékonyabb felhasználását és a nem tervezett gépleállások csökkentését. A prediktív karbantartás ezért a modern gyártórendszerekben a megbízható és hatékony üzemeltetés egyik kulcsfontosságú eszközévé vált [5][7].

## 4 PREDIKTÍV KARBANTARTÁS CNC GÉPEK ESETÉBEN

A CNC megmunkálóközpontok a modern gyártórendszerek kulcsfontosságú berendezései, amelyek nagy pontosságú és automatizált megmunkálási műveletek végrehajtására alkalmasak. A berendezések komplex mechanikai és vezérlési rendszereket tartalmaznak, ezért működésük megbízhatósága jelentős hatással van a gyártási folyamat hatékonyságára. A CNC gépek meghibásodása

gyakran jelentős termelési kiesést okozhat, ezért ezeknél a berendezéseknél különösen fontos az állapot monitorozáson alapuló karbantartási stratégiák alkalmazása [3], [4].

A prediktív karbantartási rendszerek lehetővé teszik a CNC gépek kritikus komponenseinek folyamatos felügyeletét (3. ábra). Az állapotmonitorozás során különböző diagnosztikai módszereket alkalmaznak a mechanikai és elektromos rendszerek működésének vizsgálatára.



3. ábra: CNC megmunkálóközpont állapotmonitorozási pontjai

### 4.1 Szerszámkopás monitorozása

A szerszámkopás a CNC megmunkálási folyamat egyik legfontosabb befolyásoló tényezője, amely közvetlen hatással van a megmunkált felület minőségére és a gyártási pontosságra. A túlzott szerszámkopás nemcsak a megmunkálási minőséget rontja, hanem növelheti a szerszám-törés kockázatát is.

A szerszám állapotának vizsgálata több különböző módszerrel történhet. A gyakorlatban gyakran alkalmazzák a vágóerő elemzést, a rezgésdiagnosztikát vagy az akusztikus emissziós jelek vizsgálatát. Az ilyen módszerek segítségével a szerszám állapotában bekövetkező változások kezdeti állapotukban felismerhetők, ami lehetővé teszi a szerszámcsere optimális időpontjának meghatározását [3].

### 4.2 Főorsó-diagnosztika

A főorsó a CNC gépek egyik legkritikusabb mechanikai egysége, amely a megmunkálási folyamat során nagy fordulatszámon és jelentős mechanikai terhelés mellett működik. A főorsó csapágyzásának meghibásodása komoly gépleállást és költséges javítási műveleteket eredményezhet.

A főorsó állapotának vizsgálatára gyakran alkalmaznak rezgésdiagnosztikai módszereket, amelyek lehetővé teszik a csapágykopás vagy a kiegyensúlyozatlanság korai felismerését. A rezgési spektrum elemzése segítségével a különböző mechanikai hibák azonosíthatók még a tényleges meghibásodás bekövetkezése előtt [4].

### 4.3 Tengelyhajtások és szervorendszerek felügyelete

A CNC gépek tengelymozgásait szervomotorok és hajtásrendszerek biztosítják, amelyek pontos pozicionálást tesznek lehetővé a megmunkálási folyamat során. A tengelyhajtások állapotának romlása befolyásolhatja a gép pozicionálási pontosságát és a megmunkálási minőséget.

A szervomotorok állapotának vizsgálatára gyakran alkalmazzák az elektromos áramfelvétel elemzését, amely lehetővé teszi a motor terhelésének és működési állapotának nyomon követését. Az ilyen jellegű diagnosztikai módszerek segítségével a mechanikai problémák – mint a golyósorsók kopása vagy a lineáris vezetékek hibái – szintén felismerhetők [3].

## 5 PREDIKTÍV KARBANTARTÁS AZ IPAR 4.0 RENDSZEREKBE

Az Ipar 4.0 koncepció a gyártórendszerek digitalizációjára, a fizikai és információs rendszerek integrációjára, valamint az adatvezérelt döntéshozatalra épül. A modern gyártási környezetben a berendezések működési adatai folyamatosan gyűjthetők és elemezhetők, ami lehetővé teszi a gyártási folyamatok optimalizálását és a berendezések állapotának hatékonyabb felügyeletét [1][9].

A prediktív karbantartás szorosan kapcsolódik az Ipar 4.0 technológiai infrastruktúrájához, mivel működésének alapja a szenzoradatok gyűjtése, az ipari kommunikációs rendszerek alkalmazása és az adatok feldolgozása (4. ábra). Az ilyen rendszerek lehetővé teszik a gyártóberendezések állapotának valós idejű monitorozását és a karbantartási beavatkozások optimalizálását.



4. ábra: Prediktív karbantartási rendszer architektúrája Ipar 4.0 környezetben

### 5.1 Ipari IoT rendszerek

Az ipari IoT rendszerek a gyártóberendezések és az informatikai rendszerek közötti adatkapcsolatot biztosítják. Az IoT eszközök segítségével a gépek működési paraméterei például rezgési adatok, hőmérséklet vagy energiafelhasználás folyamatosan rögzíthetők és továbbíthatók az adatfeldolgozó rendszerek felé.

Az IoT technológiák alkalmazása lehetővé teszi a gyártórendszerek decentralizált adatgyűjtését, amely a prediktív karbantartási rendszerek egyik alapvető feltétele [9].

### 5.2 Kiberfizikai rendszerek

Az Ipar 4.0 egyik meghatározó eleme a *cyber-physical systems* (CPS, kiberfizikai rendszerek) koncepciója, amely a fizikai gyártóberendezések és a digitális információs rendszerek integrációját jelenti. A CPS rendszerek lehetővé teszik a gyártóberendezések működésének digitális reprezentációját és valós idejű figyelését.

A prediktív karbantartási rendszerek a CPS infrastruktúrára támaszkodva képesek a berendezések működési állapotának folyamatos elemzésére és a lehetséges meghibásodások előrejelzésére [1].

### 5.3 Felhőalapú adatfeldolgozás

A modern gyártórendszerekben egyre gyakrabban alkalmaznak felhőalapú adatfeldolgozási platformokat a gyártási adatok tárolására és elemzésére. A felhőalapú rendszerek lehetővé teszik a nagymennyiségű adat feldolgozását és az összetett analitikai módszerek alkalmazását.

A felhőalapú adatfeldolgozás előnye, hogy a különböző gyártóberendezésekből származó adatok egy központi platformon elemezhetők, ami támogatja a prediktív karbantartási modellek fejlesztését és alkalmazását.

### 5.4 Digitális iker technológia

A digitális iker (*digital twin*) technológia a fizikai berendezések virtuális modelljének létrehozását jelenti, amely lehetővé teszi a berendezések működésének szimulációját és monitorozását. A digitális iker rendszerek segítségével a gyártóberendezések működési állapota valós időben nyomon követhető, és különböző szimulációs módszerekkel előre jelezhetők a potenciális működési problémák.

A prediktív karbantartás és a digitális iker technológia kombinációja új lehetőségeket teremt a gyártórendszerek optimalizálásában és a karbantartási folyamatok fejlesztésében [9].

### 5.5 Mesterséges intelligenciaalapú döntéstámogató rendszerek

Az Ipar 4.0 környezetben működő prediktív karbantartási rendszerek hatékonyságát jelentősen növeli a mesterséges intelligencia (MI) alapú analitikai módszerek alkalmazása [9][12]. Az MI algoritmusok képesek a szenzorhálózatokból származó nagymennyiségű működési adat feldolgozására, valamint a berendezések állapotában bekövetkező változások és rendellenességek azonosítására. Az ilyen modellek támogatják a karbantartási döntéshozatalt, mivel képesek előre jelezni a potenciális meghibásodások bekövetkezésének valószínűségét és időpontját [9].

A prediktív karbantartásban alkalmazott gépi tanulási módszerek közé tartoznak a különböző osztályozási és regressziós algoritmusok, például a döntési fák, a *Support Vector Machine* (SVM) modellek vagy a neurális hálóok. Ezek az algoritmusok a korábbi működési és meghibásodási adatok alapján képesek mintázatokat felismerni és a berendezések jövőbeli állapotát becsülni. A fejlettebb rendszerekben mélytanulási módszereket is alkalmaznak, amelyek különösen hatékonyak nagy

mennyiségű idősor jellegű szenzoradat feldolgozásában [10].

Az MI alapú analitikai modellek eredményei gyakran döntéstámogató rendszerek formájában jelennek meg, amelyek segítik a karbantartási szakembereket a beavatkozások optimális időpontjának meghatározásában, valamint a karbantartási prioritások kijelölésében. Az ilyen rendszerek hozzájárulnak a gyártóberendezések megbízhatóságának növeléséhez, a váratlan leállások csökkentéséhez és a karbantartási költségek optimalizálásához [9][12].

## 6 A PREDIKTÍV KARBANTARTÁS ELŐNYEI ÉS KIHÍVÁSAI

A prediktív karbantartási rendszerek alkalmazása jelentős előnyökkel járhat a modern gyártórendszerek üzemeltetésében. Az állapotmonitorozáson alapuló karbantartási stratégiák lehetővé teszik a berendezések működésének folyamatos felügyeletét, valamint a meghibásodások korai felismerését. Ennek eredményeként a karbantartási tevékenységek tervezhetőbbé válnak, ami hozzájárul a gyártási folyamatok stabilitásának növeléséhez és a nem tervezett gépleállások csökkentéséhez [5][7].

A prediktív karbantartás egyik legfontosabb előnye a gyártóberendezések rendelkezésre állásának növelése. A berendezések állapotának folyamatos monitorozása lehetővé teszi a hibák korai azonosítását, így a karbantartási beavatkozások még a meghibásodás bekövetkezése előtt elvégezhetők. Ez jelentősen csökkentheti a termelési kiesések mértékét és javíthatja a gyártórendszerek megbízhatóságát [8].

A prediktív karbantartás alkalmazása gazdasági szempontból is kedvező lehet, mivel lehetővé teszi a karbantartási erőforrások hatékonyabb felhasználását. A karbantartási műveletek a berendezések tényleges műszaki állapotához igazíthatók, így elkerülhetők a szükségtelen alkatrészcsere és karbantartási beavatkozások [3].

Ugyanakkor a prediktív karbantartási rendszerek bevezetése számos technikai és szervezeti kihívással is járhat. Az egyik legjelentősebb kihívás a szükséges infrastruktúra kialakítása, amely magában foglalja a szenzorok telepítését, az adatgyűjtési rendszerek kiépítését és az adatfeldolgozó platformok integrációját. Ezek a beruházások jelentős kezdeti költségeket igényelhetnek, különösen a kisebb vállalatok esetében.

További kihívást jelent az adatok kezelése és elemzése. A prediktív karbantartási rendszerek működése nagymennyiségű üzemeltetési adat feldolgozását igényli, amely megfelelő informatikai infrastruktúrát és szakértői kompetenciát feltételez [9].

A technológiai és szervezeti kihívások ellenére a prediktív karbantartási rendszerek alkalmazása egyre nagyobb szerepet kap a modern ipari környezetben, mivel hozzájárulhat a gyártási folyamatok hatékonyságának növeléséhez és a berendezések üzemeltetési költségeinek csökkentéséhez.

## 7 KÖVETKEZTETÉSEK

A modern ipari gyártórendszerek működésében egyre nagyobb jelentőséget kapnak az adatvezérelt technológiák és az intelligens gyártási megoldások. Az Ipar 4.0 koncepció megjelenésével a gyártóberendezések működéséről gyűjtött adatok hatékonyan felhasználhatók a

termelési folyamatok optimalizálására és a berendezések üzemeltetésének fejlesztésére.

A tanulmány bemutatta a prediktív karbantartási rendszerek működési elvét, valamint azok alkalmazási lehetőségeit CNC megmunkálóközpontok esetében. Az állapotmonitorozási technológiák, mint például a rezgésdiagnosztika, a hőmérsékletmonitorozás vagy az elektromos paraméterek vizsgálata, melyek lehetővé teszik a berendezések működési állapotának folyamatos nyomon követését és a potenciális meghibásodások korai felismerését.

A vizsgálat rámutat arra, hogy a prediktív karbantartási rendszerek alkalmazása jelentősen hozzájárulhat a gyártási folyamatok megbízhatóságának növeléséhez, a nem tervezett gépleállások csökkentéséhez és a karbantartási tevékenységek hatékonyabb tervezéséhez. A szenzorokkal támogatott adatgyűjtési rendszerek és az adatfeldolgozási módszerek fejlődése lehetővé teszi a berendezések állapotának pontosabb meghatározását, ami fontos szerepet játszik a modern gyártórendszerek üzemeltetésében.

A jövőben várhatóan egyre nagyobb szerepet kapnak a fejlett adatfeldolgozási módszerek és a mesterséges intelligencián alapuló diagnosztikai rendszerek, amelyek tovább növelhetik a prediktív karbantartási megoldások hatékonyságát. Az ilyen technológiák alkalmazása különösen fontos lehet a komplex gyártórendszerek, mint a CNC megmunkálóközpontok megbízható és gazdaságos üzemeltetésében.

## IRODALOMJEGYZÉK

- [1] L. Monostori, "Cyber-physical production systems: Roots, expectations and R&D challenges", *Procedia CIRP*, vol. 17, pp. 9–13, 2014.
- [2] H. Kagermann, W. Wahlster, and J. Helbig, *Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0*, Frankfurt: acatech, 2013.
- [3] A. Heng, S. Zhang, A. Tan, and J. Mathew, "Rotating machinery prognostics: State of the art", *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 23, pp. 724–739, 2009.
- [4] R. Jardine, D. Lin, and D. Banjevic, "A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance", *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 20, pp. 1483–1510, 2006.
- [5] Y. Peng, M. Dong, and M. Zuo, "Current status of machine prognostics in condition-based maintenance", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 50, pp. 297–313, 2010.
- [6] M. Mobley, *An Introduction to Predictive Maintenance*, Butterworth-Heinemann, 2002.
- [7] J. Lee, B. Bagheri, and H. Kao, "A cyber-physical systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems", *Manufacturing Letters*, vol. 3, pp. 18–23, 2015.
- [8] T. Wuest, D. Weimer, C. Irgens, and K. Thoben, "Machine learning in manufacturing: advantages, challenges, and applications", *Production & Manufacturing Research*, vol. 4, 2016.
- [9] A. Carvalho et al., "A systematic literature review of machine learning methods applied to predictive maintenance", *Computers & Industrial Engineering*, vol. 137, 2019.
- [10] S. Zhang, Y. Yang and Y. Wang, "Machine learning and deep learning methods for predictive maintenance: A review", *IEEE Access*, vol. 7, pp. 181213–181230, 2019.
- [11] J. Vachtsevanos, *Intelligent Fault Diagnosis and Prognosis for Engineering Systems*, Wiley, 2006.
- [12] J. Lee, H. Davari, J. Singh, and V. Pandhare, "Industrial Artificial Intelligence for industry 4.0-based manufacturing systems", *Manufacturing Letters*, vol. 18, pp. 20–23, 2018.

# Additív gyártás integrálása az oktatásba az Ipar 4.0 és Minőség 4.0 szemléletében

## Integrating additive manufacturing into education from the perspectives of Industry 4.0 and Quality 4.0

Hopka Brigitta\*, Dr. habil. Farkas Gabriella\*

\* Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Budapest, Magyarország  
[hopkabrigitta@gmail.com](mailto:hopkabrigitta@gmail.com), [farkas.gabriella@bkgk.uni-obuda.hu](mailto:farkas.gabriella@bkgk.uni-obuda.hu)

**Összefoglalás** — Az additív gyártási technológiák, különösen a 3D-nyomatás, elengedhetetlenek az Ipar 4.0 és a Minőség 4.0 keretrendszereknek megfelelő projektalapú műszaki oktatás elősegítéséhez. A tanulmány központi eleme egy felügyelet nélküli működésre tervezett, 3D nyomtatás számára kialakított nyílt laboratórium koncepciójának bemutatása, amely kifejezetten a hallgatók önállóságának, az együttműködésen alapuló tanulásnak és a digitális kompetenciák fejlesztésének elősegítését célozza. A kutatás során felmérést végeztünk a hallgatói elvárásokról, amelynek eredményei alapján funkcionális, informatikai és szervezeti javaslatokat határoztunk meg. A laboratórium biztonságos működésének értékeléséhez három kockázatelemzési módszert – GYELV-elemzést, kockázati mátrixot és csokornyakkendő elemzést – alkalmaztunk. Az elemzés rávilágított a legkritikusabb műszaki, elektromos, munkavédelmi, informatikai és felhasználói veszélyekre, valamint azok enyhítésére és ellenőrzésére szolgáló stratégiákra. Az eredmények azt mutatják, hogy a felügyelet nélküli 3D nyomtató laboratórium nem alacsony kockázatú környezet, azonban megfelelő ellenőrzések és technikai segítségnyújtás mellett biztonságosan üzemeltethető. A kutatás kihangsúlyozza, hogy a digitalizáció, az érzékelőhálózatok, a távfelügyelet és az adatközpontú működés alkalmazása jelentősen javítja a laboratórium megbízhatóságát. A javasolt modell megfelel az Ipar 4.0 és a Minőség 4.0 követelményeinek, és kiválóan alkalmas a projektalapú műszaki felsőoktatásra.

**Kulcsszavak:** additív gyártás, szabadlabor, biztonság, kockázatfelmérés

**Abstract** — Additive manufacturing technologies, especially 3D printing, are essential for promoting project-based engineering education compliant with Industry 4.0 and Quality 4.0 frameworks. The central focus of this article is the presentation of a concept for an open laboratory designed for 3D printing and intended for supervision-free operation, which specifically aims to promote student autonomy, collaborative learning, and the development of digital competencies. During the research, we conducted a survey on student expectations, and based on the results, we identified functional, IT, and organizational recommendations. To assess the safe operation of the laboratory, we applied three risk analysis methods: SWOT analysis, a risk matrix, and a bow-tie analysis. The analysis highlighted the most critical technical, electrical, occupational safety, IT, and user hazards, as well as strategies for reducing and controlling them. The results show that an

unattended 3D printing laboratory is not a low-risk environment; however, it can be operated safely with appropriate controls and technical support. The research emphasizes that the use of digitalization, sensor networks, remote monitoring, and data-driven operations significantly improves the reliability of the laboratory. The proposed model meets the requirements of Industry 4.0 and Quality 4.0 and is well-suited for project-based technical higher education.

**Keywords:** additive manufacturing, open lab, safety, risk assessment

### 1 BEVEZETÉS

Az additív gyártási technológiák napjainkban egyre nagyobb teret hódítanak, hiszen gyorsabb, rugalmasabb és gazdaságosabb termelést tesznek lehetővé. Azonban nem csak a termelő területen, hanem az oktatásban is, különösen a projektalapú szemléletet megvalósító műszaki képzések területén is jelentős szerepük van. Az additív technológiák az ISO/ASTM 52900:2021 szabvány szerinti megfogalmazásában: „az anyagok összekapcsolásának folyamata alkatrészek előállítására 3D-s modellek adatai alapján, általában rétegenként, szemben a szubtraktív gyártási és formáló gyártási módszerekkel” [1]. Ez a technológia az utóbbi évtizedekben rendkívül gyors fejlődési folyamaton ment keresztül, mára széles ipari környezetben alkalmazzák, úgymint az autógyártásban, a repülőgépiparban, az elektronikában, az orvostudományban stb. [2]. A 3D nyomtatás – amely tulajdonképpen a rétegről rétegre történő anyagfelépítés – előnyei között említendő, hogy:

- gyors prototípus gyártásra alkalmas módszer,
- bonyolult geometriájú termékek előállítására is alkalmazható,
- testre szabható,
- anyagtakarékos,
- kisebb szerszámgéppel rendelkezik.

Az ilyen típusú gyártás digitalizálható, ezért támogatja az intelligens termelést [1].

#### 1.1 Az Ipar 4.0 kapcsolata a projektalapú oktatással

Az Ipar 4.0 egyik jelentős törekvése a digitalizáció, az automatizálás és az intelligens rendszerek integrálása a gyártásba. Ennek jelentősége főként a gyorsabb, hatékonyabb, optimalizált gyártás, mely által nem csupán a piac változó igényeire adott gyors reakció valósítható meg, hanem csökkenő selejtráta érhető el a költséghatékony gyártás

által. Ezzel párhuzamosan a Quality 4.0 célja, hasonlóan az Ipar 4.0-hoz, az automatizálás és a digitalizálás a minőségmenedzsment szempontjából. Folyamatos monitorozással adatvezérelt minőségirányítás építhető ki. A minőség és a karbantartás prediktív jellege pedig segít a hatékonyabb termelésben. A két fejlesztési irány közös célja a magasabb minőség elérése kisebb hibaarány és alacsony költségek mellett.

Az Ipar 4.0 és a Quality 4.0 fejlesztésének egyik közös és hasznos eszköze a projektalapú oktatás, főleg a műszaki képzések területén. A PBL (*Project Based Learning*, projekt alapú oktatás) központjában a probléma áll. A problémával kapcsolatban minden vonatkozást vizsgálunk, komplex elméleti és gyakorlati szinten, és akár valós élethelyzetekben is. Együttműködésen és kommunikáción alapuló közös tevékenység, mely végigkíséri a tervezés és döntés folyamatát, ezzel a projekten dolgozók kritikus gondolkodását fejlesztve. A módszer a források széles tárházának használatával, korlátok nélkül teszi lehetővé a projektcsapat közös munkáját. A PBL megfelelő alkalmazásával nemcsak a tanulási eredmények javíthatók, hanem a hallgatók motivációja és a problémamegoldó képessége is. [3]

A PBL-lel kapcsolatos kutatások alapvetően hat jellemzőjét emelik ki, ezek: a motiváció, a tanulási célokra való összpontosítás, az oktatási tevékenységekben való részvétel, a diákok közötti együttműködés, a támogató technológiák használata és a kézzelfogható termékek létrehozása. Az oktatók általában támogatóként vesznek részt ebben az oktatási formában azzal a céllal, hogy visszajelzést és támogatást nyújtanak a hallgatóknak, hatékonyítják a tanulási folyamatukat. Mindezen jellemzők közül kiemelendő a valós kihívásokat megoldó projekt-szemlélet, ami alapvetően megkülönbözteti a PBL-t más tanulóközpontú pedagógiai módszerektől, mint például a problémamegoldáson alapuló tanulástól. [4][5]

Az Ipar 4.0 és a PBL közös célja a valós problémákra építkezve fejlődő hatékonyság és adaptív működés, melyek az elvárásokon alapuló megvalósítás és gyártás elvárásainak alapjául szolgálhat. A műszaki felsőoktatásban mindezek alapján különösen nagy jelentősége van olyan infrastrukturális háttér létrehozásának, amelyben megvalósíthatók ezek a módszerek.

## 1.2 A 3D nyomtatás

Az additív gyártástechnológia, ezen belül a 3D nyomtatás Intézményünkben számos területen megtalálható, a hallgatók rendelkezésére álló laborban több típusú nyomtatót tesztelhetik, tanulmányozhatják ezt a modern technológiát. Fontos megemlíteni, hogy a 3D nyomtatás mögött összetett eszköz- és informatikai rendszer áll. A digitális 3D modellből a nyomtatás során fizikai termék készül, de a megvalósulásához számos fizikai-mechanikai és informatikai tényező játszik még közre.

A mechanikai rendszerhez mozgásvezérlés csatlakozik, a munkatérben a nyomtatás 3 tengelyen ( $x$ -,  $y$ -,  $z$ -) történik, melyek pontosságát a lineáris vezetékek, motorok, szíjhajtások, orsók és pozicionáló berendezések biztosítják. A minőséget ezen a ponton a felületi minőségből, méretpontosságból és a folyamat megismételhetőségéből mérjük fel. Az anyagadagoló rendszer és extruder szerepe nem csupán a filament hotendhez történő adagolása, hanem beállításaitól függően biztosíthatja a felépülő rétegek egyenletességét és a termék geometriai pontosságát. A tárgyasztal, másnéven építőtér stabil, sík asztal, mely technológiától függően akár fűthető is lehet. Az elektronikai vezérlőegységhez számos

érzékelő csatlakozik, például a hőmérsékletet, anyagjelentést figyelik, vannak köztük végállás kapcsolók és szintező szenzorok is. Az elektronikai vezérlőegységben történik a digitális utasítások mechanikai művelettel alakítása [6].

Az alapanyagok és az eljárásváltozatok tekintetében széles paletta áll rendelkezésre a kutatási-gyártási terület igényeihez, termékeihez igazodva:

- FDM/FFF (*Fused Deposition Modeling/Fused Filament Fabrication*): Szálhúzásos 3D nyomtatás filamentből. Az alkalmazott filament anyaga valamilyen hőre lágyuló műanyagból [7,8], amely lehet például

- PLA (Politejsav): biológiai eredetű, megújuló forrásból előállítható polimer, alacsony hőmérsékleten is jól alakítható, kismértékű zsugorodás mellett. Jó felületi minőséggel rendelkező termékek állíthatók elő belőle, így az oktatási modellek esetében gyakori eljárás. Hátrányaként említhető, hogy ridegebb anyag, hőállósága és ütésállósága alacsonyabb.
- ABS (Akrilnitril-butadién-stirol): ütésállósága, hőállóság és szívóssága okán funkcionális alkatrészek, burkolatok, gépelemek és igénybevett szerkezeti elemek gyártására alkalmas alapanyag. Fontos megemlíteni, hogy nehezebben nyomtatható, hiszen vetemedésre hajlamos, így fűtött tárgyasztalra/zárt nyomtatótérre van szükség.
- PETG (Polietilén-tereftalát-glikol): a jó nyomtathatóságot és a kedvező mechanikai tulajdonságokat ötvözi. Jó szívósság/ellenállás, ütésállóság és rétegtapadás jellemzi, kisebb az esélye, azonban hajlamos szálhúzóásra.

- SLA (*Stereolithography*), műgyanta nyomtatás: folyékony polimert, műgyantát UV fényrel rétegről rétegre megszilárdítanak.

- SLM/DMLS (*Selective Laser Melting/Direct Metal Laser Sintering*): por alapú nyomtatás, melynek során nem nyomtatószállból, hanem porrétegekből építi fel a tárgyakat.

- Binder Jetting: a por alapú anyaghoz kötőanyagot is adagol.

- PolyJet: precíziós eljárás, mely során több anyag is adagolható egyidejűleg.

A tervezés CAD (Computer-Aided Design) szoftverben történik, ez képezi a gyártás alapját. A megfelelő fájlformátum kiválasztása (leginkább használt kiterjesztés: STL-Standard Tessellation Language) után a modellt egy szeletelő (*slicer*) szoftverbe tápláljuk. A szoftver vízszintes rétegekre bontja a modellt, itt állíthatjuk be a bejárando útvonalat, sebességet, rétegvastagságot, kitöltési logikát stb. A G-kódot a firmware és a gépkezelő logika alakítja át és értelmezi a nyomtatófej mozgásának pályáját, sebességét, hőmérsékletet, anyagadagolást, műveleteket. Az adatátvitel a hagyományos USB vagy memóriakártya mellett megoldható hálózati vagy felhőalapú, digitalizált módszerrel is [6]. Ez a megoldás biztosítja, hogy a folyamat távolról is vezérelhető, felügyelhető legyen. Kapcsolat épülhet ki a hálózatban található más berendezésekkel, rendszerbe integrálhatóvá válik a nyomtatás, ezzel az Ipar 4.0 egyik jelentős törekvésének téve eleget. Lehetővé válik a folyamat monitorozása és a digitális ellenőrzése is, így a nyomtatási állapot ellenőrzése, a szenzoradatok gyűjtése, hibadetektálás és ez által az adatalapú minőségbiztosítás is megvalósítható, így eleget téve a Quality 4.0 céljának.

## 2 A PBL MEGVALÓSÍTÁSÁT TÁMOGATÓ ADDITÍV GYÁRTÁS KONCEPCIÓJA

Tanulmányunkban szeretnénk ismertetni egy felügyelet nélkül működő 3D nyomtató szabadlabor megvalósításának koncepcióját, továbbá annak biztonsági kockázatainak felmérését és elemzését. A tervezés során figyelembe vett szempontok:

- a projekt alapú oktatás támogatása,
- a laborban lévő eszközök, berendezések megóvása,
- a felhasználók biztonságának megóvása,
- a nyomonkövethetőség megvalósítása,
- a labor szabad alkalmazásának kialakítása.

Ennek érdekében felmérést készítettünk a hallgatók körében, melynek célja elsősorban az elvárások összegyűjtése volt. A projektalapú oktatásban népszerű és hasznos eszköz, a 635-módszer segítségével a hallgatók ötleteket gyűjtöttek.

A 635 egy kreatív, gyors módja az ötletelésnek, mely során a csapat tagjai egyenlő szerepet kapnak. Bernd Rohrbach 1968-ban alakította ki ezt a hatékony módszert a brainstorming igazán aktívvá tétele érdekében. Egy csapat 6 főt jelent, fejenként 3 ötlet hozzáadásával, egy kör csupán 5 perc; következő körökben egymás ötleteinek továbbfejlesztése is lehetséges, így csupán 30 perc alatt akár 108 ötlet is születhet [9].

A hallgatók által meghatározott elvárások a következőképpen foglalhatók össze. Az első pont a szabadlabor használatára irányuló jogosulatlan belépés, felhasználás elkerülésére irányult. Ennek érdekében a labor használatához előzetes vizsgával egybekötött képzés elvégzése szükséges, hogy a felhasználó megkapja az alap tudást, melyet aztán egy – akár szabadon választható – kurzus kereteiben bővíthetik az érdeklődők. A második pontban egy beléptető rendszer kiépítésével ellenőrizhetővé válna, hogy ki és mikor tartózkodik a laborban. Harmadik pontban a hibázási lehetőségek csökkentése érdekében használati útmutatók, oktató videók készülhetnek a különböző típusú nyomtatóinkhoz, melyeket a géphez dedikált QR-kód beolvasásával elérhetnek a felhasználók.

A hibák kiküszöbölésére és a labor gördülékeny működésére és használatára informatikai oldalról is születtek ötletek: egy weboldal fejlesztése, melyen időpont foglalási rendszer működne, számolva a gyártani kívánt modell nyomtatási idejével. A megfelelő gép és anyag típus kiválasztására alkalmas szoftver kifejlesztése is a hosszabb távú tervek között szerepel, így törekedve a lehető legkevesebb hibára és selejtre, ezzel egyidejűleg pedig egy alapanyag nyilvántartás is létrejönne. A felhasználói felületen hiba/veszélybejelentő modul segítené a felmerülő problémák megoldását a lehető leghamarabb, a laborral kapcsolatban naprakész információk állnának az üzemeltetők és a dedikált karbantartó munkatárs rendelkezésére. Kiaknázva az Ipar 4.0 alappilléreit felhő szolgáltatás használata vezethető be, melyben a gyártandó modelleket a kurzus vezetője ellenőrizheti, a szimulációs szoftver pedig biztosíthatná a tervezőt a nyomtatás sikerességéről, akárcsak egy CAM- szoftver.

A szabadlabor szabályainak fenntartása és a biztonságos működés kamerarendszer kiépítésével válna ellenőrizhetővé.

## 3 A BIZTONSÁGI KOCKÁZATOK FELMÉRÉSE ÉS ELEMZÉSE

A hallgatók számos remek elvárást fogalmaztak meg mind a szabadlabor biztonságával, működtetésével, mind az informatikai háttérével kapcsolatban, azonban ezeket biztonság és megvalósíthatóság szempontjából kockázattertelési módszerekkel is szükséges elemezni. A megvalósítás előtt tehát érdemes a felügyelet nélkül működő labor esetén felmerülő veszélyek kockázatát, gyakoriságát, súlyosságát felmérni, illetve értékelni, majd megelőző, kárcsökkentő intézkedéseket hozni. Hiszen nem csupán előnyöket rejt magában ez a lehetőség, de számos üzemeltetési, műszaki, biztonsági, minőségügyi és emberi tényezőtől eredő kockázatot is hordoznak.

A kockázatterteléshez három minőségbiztosítási módszer került kiválasztásra: a SWOT-analízis, a csokornyakendő-módszer és a kockázati mátrix. E három eszköz együttes használata lehetővé teszi, hogy a vizsgálat ne csupán az egyes veszélyforrások azonosítására korlátozódjon, hanem azok stratégiai, ok-okozati és súlyossági szempontból is értékelhetők legyenek. Mindhárom eljárás jól illeszkedik az IEC 31010:2019 kockázatelemzési szabványhoz, elvárásaihoz és keretrendszeréhez.

Vizsgálati szempontok:

- műszaki és berendezésbiztonság,
- villamos és tűzvédelmi kockázatok,
- egészségügyi és környezeti hatások,
- minőségügyi és gyártásstabilitási problémák,
- informatikai hálózat kockázatai,
- emberi tényezőtől fakadó hibák.

Az 1. táblázat összefoglalja azokat a kockázati tényezőket, melyek a leginkább veszélyeztetik a szabadlaborot, a benne található eszközöket, berendezéseket (3D nyomtatókat), és legfőképpen a benne dolgozó kollégákat, hallgatókat, felhasználókat. Ezek azok a veszélyek, melyeknek bekövetkezése a gyakorlati tapasztalatok alapján a legnagyobb valószínűséggel megtörténhetnek. A tűzveszély a labor egyik legjelentősebb kockázata, amelyet elsősorban az elektromos és hőtermelő elemek meghibásodása okozhat. A túlmelegedés, rövidzárlat vagy sérült kábelezés különösen veszélyes felügyelet nélküli üzemelés esetén. A kockázatok hatékonyan csökkenthetők rendszeres karbantartással, érzékelőkkel támogatott felügyelettel és megfelelő tűzvédelmi eszközök alkalmazásával. A műszaki intézkedések mellett a jól kidolgozott tűzvédelmi protokoll és a felhasználók oktatása kulcsszerepet játszik a biztonságos labor-üzemeltetésben.

Az elektromos veszélyek a 3D nyomtató laborban elsősorban a tápegység, a motorok, a fűtőelemek, a vezérlőegységek és a szenzorok meghibásodásából eredhetnek, amelyek rövidzárlatot, túlterhelést vagy túlmelegedést okozhatnak. Ezek a hibák nemcsak az eszközök károsodásához, hanem az elektromos rendszer meghibásodásához is vezethetnek, különösen folyamatos vagy felügyelet nélküli működés esetén. A kockázatok csökkentése érdekében elengedhetetlen a rendszeres műszaki karbantartás, az állapotfelmérés és az elektromos biztonság folyamatos ellenőrzése. A megfelelő tűzvédelmi infrastruktúra, a nem éghető felületek alkalmazása, valamint a dokumentált protokollok és oktatás együttesen biztosítják a labor biztonságos üzemeltetését.

1. táblázat. Veszélyforrások és megelőző tevékenységek

Veszélytípus	Okok	Megelőzés
Tűz	Túlmelegedő fűtőszál vagy hotend Hibásan fűtött tárgyasztal Rövidzárlat Sérült kábelek Hibás ventilátor miatti túlhevülés	Rendszeres karbantartás és állapotfelmérés Tűz-és füstjelző rendszer Nem éghető felületekre történő nyomtató telepítés Tűzoltó készülék Tűzvédelmi protokoll és oktatás
Elektromos veszély	Tápegység, motor, fűtőelem, vezérlőegység, szenzorok meghibásodása okozta rövidzárlat, túlterhelés, kontakthiba, túlmelegedés	Rendszeres érintésvédelmi és vilamos ellenőrzés Kábelek mechanikai védelme (kábelcsatornák, kábel elvezetők) Túlfeszültségvédelem, kismegszakító
Levegőminőség és eü. kockázatok	Ultrafinom részecskék, finom por Illékony vegyületek Műgyanta párolgása okozta irritáció, toxikus anyagok	Megfelelő szellőztetés, elszívó berendezés Zárt nyomtatótér Elérhetővé tett MSDS dokumentumok Megfelelő hulladékkezelés
Mechanikai- és berendezésbiztonság	Beszorulás, törés, nyomtatófej ütközés, hibás mozgó alkatrész okozta túlmelegedés, anyagfelhalmozódás	Rendszeres karbantartás és a kopóalkatrészek tervezett cseréje Távoli leállítási lehetőség Kamerás felügyelet a nyomtatótérben
Nyomatási hibák	Vetemedés, rétegeltolódás Filament elakadás Nozzle clog (nyomtatófej) eltömődés	Tárgyasztal szintezés Alapanyagjelentés szenzor Próba és tesztüzem Kamerás felügyelet a nyomtatótérben
Informatikai- és hálózatbiztonság	Távoli vezérlés hibája Hálózati kapcsolat megszakadása Hibásan generált G-kód Szoftver vagy firmware hiba Adatvesztés	Kontrollált felhasználói jogosultság Szoftverfrissítések Engedélyezett fájlok nyomtatása Biztonságos távoli elérés
Emberi tényező	Rossz alapanyag használata Hibás szeletelő-szoftver beállítások Helytelen tisztítás Labor fegyelmegsértése	Működési szabályzat Jogosultság a labor használatához Checklist/ 5S Laborprotokoll Használati utasítások, munkautasítások elérhető helyen

A 3D nyomtatás során keletkező ultrafinom részecskék, finom porok és illékony vegyületek jelentős levegőminőségi és egészségügyi kockázatot jelenthetnek, különösen zárt térben és huzamosabb működés esetén. A műgyanta párolgásából származó irritáló vagy toxikus anyagok fokozottan veszélyeztethetik a felhasználók légzőrendszerét. A kockázatok hatékonyan csökkenthetők megfelelő szellőztetéssel, elszívó berendezések alkalmazásával és zárt nyomtatótérek kialakításával. Az MSDS dokumentumok hozzáférhetősége és a szabályozott hulladékkezelés tovább növeli a labor biztonságos és egészség tudatos működését.

A berendezésekkel kapcsolatos kockázatok közé tartoznak a mozgó alkatrészek által okozott beszorulások, törések, a nyomtatófej ütközései, valamint a meghibásodott mechanikai elemek miatti túlmelegedés és anyagfelhalmozódás. Ezek a problémák nemcsak a berendezések állapotát veszélyeztetik, hanem a felhasználók biztonságát is, különösen felügyelet nélküli üzem esetén. A kockázatok csökkenthetők rendszeres karbantartással és a kopó alkatrészek tervezett cseréjével. A távoli leállítási lehetőség és a nyomtatótér kamerás felügyelete lehetővé teszi a gyors beavatkozást és növeli az üzembiztonságot.

A nyomtatási hibák, mint a vetemedés, a rétegeltolódás, a filament elakadása vagy a nyomtatófej eltömődése jelentősen ronthatják a kész darab minőségét és növelik az anyag- és idővesztéseket. Ezek a problémák gyakran a nem megfelelő beállításokra, alapanyag-ellátásra vagy mechanikai instabilitásra vezethetők vissza. A megelőzés érdekében kulcsfontosságú a tárgyasztal pontos szintezése, az alapanyagjelentés-szenzor alkalmazása, valamint a nyomtatások előtti próba- és tesztüzem. A nyomtatótér kamerás felügyelete lehetővé teszi a hibák korai felismerését és a gyors beavatkozást, ezáltal növelve a nyomtatási folyamat megbízhatóságát.

Az informatikai problémák a 3D nyomtató labor működésében elsősorban a távoli vezérlés hibáiból, hálózati kapcsolat megszakadásából, illetve hibásan generált G-kódból vagy szoftveres, firmware-es meghibásodásokból eredhetnek. Ezek a nyomtatási folyamat megszakadásához, hibás gyártáshoz vagy adatvesztéshez vezethetnek, különösen több felhasználót kiszolgáló, automatizált környezetben. A kockázatok csökkenthetők kontrollált felhasználói jogosultsági rendszer alkalmazásával és a rendszeres szoftverfrissítések biztosításával. Az engedélyezett fájlok nyomtatása és a biztonságos távoli elérés kialakítása hozzájárul az informatikailag stabil és megbízható laborüzemeltetéshez.

A felhasználói kockázatok a 3D nyomtató laborban elsősorban a nem megfelelő alapanyag használatából, hibás szeletelési beállításokból, helytelen tisztításból és a laborfegyelmegsértéséből adódnak. Ezek a problémák nemcsak a nyomtatás minőségét rontják, hanem berendezéskárosodáshoz és biztonsági kockázatokhoz is vezethetnek. A megelőzés kulcsa az egyértelmű működési és laborprotokollok kidolgozása, valamint a laborhasználat jogosultságához kötése. A jól látható használati utasítások, munkautasítások és az ellenőrző lista/5S szemlélet alkalmazása jelentősen csökkenti a hibák és mulasztások előfordulását. A SWOT-analízis jelentősége, hogy a külső és belső tényezőket egyaránt figyelembe vesszük, tehát teljeskörű felmérést és elemzést tesz lehetővé. A módszer egy mozaikszó, utalva az erősségekre (*strengths*), gyengeségekre (*weaknesses*), lehetőségekre (*opportunities*) és veszélyekre (*threats*).

ats). A belső tényezők az erősségek és gyengeségek, melyekre építkezni kell, vagy fejleszteni szükséges azokat [10].

<b>ERŐSSÉGEK</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Folyamatosan működő nyomtatás, gyártás felügyelet nélkül</li> <li>Rugalmas lehetőségek, gyors prototípus gyártás</li> <li>Több folyamat egyidejű, párhuzamos működése</li> <li>Remek lehetőség a kutatás-fejlesztés és oktatás területén</li> <li>Monitorozhatóság</li> <li>Időhatékony</li> </ul>	<b>GYENGESÉGEK</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>A felügyelet hiánya növelheti a hibák kockázatát</li> <li>Előfordulhat a hibák észlelésének késése</li> <li>Rendszeres karbantartás és kalibrálás szükséges a minőségi hibák kiküszöbölésére</li> <li>Anyagelakadás, vetemedés vagy tapadási probléma késői észlelése</li> <li>Hibás fájlok, téves beállítások valószínűsége, nagyobb hatása</li> </ul>
<b>LEHETŐSÉGEK</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Távoli felügyelet kiépítése</li> <li>Szenzorok beépítése, automatizált megoldások</li> <li>Ipar 4.0 és Quality 4.0 rendszerek</li> <li>Adatalapú hibamegelőzés és prediktív karbantartás</li> <li>Optimalizált laborizemleltetés</li> <li>Oktatási innovációs projektek és önálló hallgatói munka támogatása</li> </ul>	<b>VESZÉLYEK</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Tűz-és túlmelegedés kockázata</li> <li>Elektromos hibák</li> <li>EÜ kockázatok (káros poranyag belélegzés, illékony vegyületek)</li> <li>Adatvesztés, hiba a vezérlésben</li> <li>Berendezés hibái, laborállás</li> <li>Emberi mulasztások lehetősége</li> </ul>

1. ábra. A SWOT-analízis eredményei

Az elkészített elemzés alapján elmondható (1. ábra), hogy a 3D nyomtató labor működése jelentős szakmai és oktatási potenciállal rendelkezik. Az erősségek között kiemelkedik a folyamatos, felügyelet nélküli működés lehetősége, valamint a gyors és rugalmas prototípusgyártás, amely egyszerre támogatja a kutatás-fejlesztést és az oktatást. A párhuzamosan működtethető folyamatok és a jó monitorozhatóság magas időhatékonyt és kapacitáskihasználást tesznek lehetővé. Ugyanakkor a felügyelet hiánya növeli a hibák kialakulásának és késői észlelésének kockázatát, különösen anyagelakadások, vetemedés vagy rossz tapadás esetén. A rendszeres karbantartás és kalibrálás elengedhetetlen a minőségi problémák megelőzéséhez, míg a hibás fájlok vagy téves beállítások jelentős selejtet okozhatnak. A lehetőségek oldalon a távoli felügyelet, szenzorok és automatizált megoldások bevezetése, valamint az Ipar 4.0 és Quality 4.0 szemlélet alkalmazása jelentős fejlődési irányt kínál. Az adatalapú hibamegelőzés és a prediktív karbantartás hozzájárulhat a stabilabb és biztonságosabb üzemeltetéshez. A labor oktatási szerepe tovább erősíthető innovációs projektek és önálló hallgatói munkák támogatásával. A fő veszélyek közé tartoznak a tűz- és túlmelegedési kockázatok, az elektromos meghibásodások és

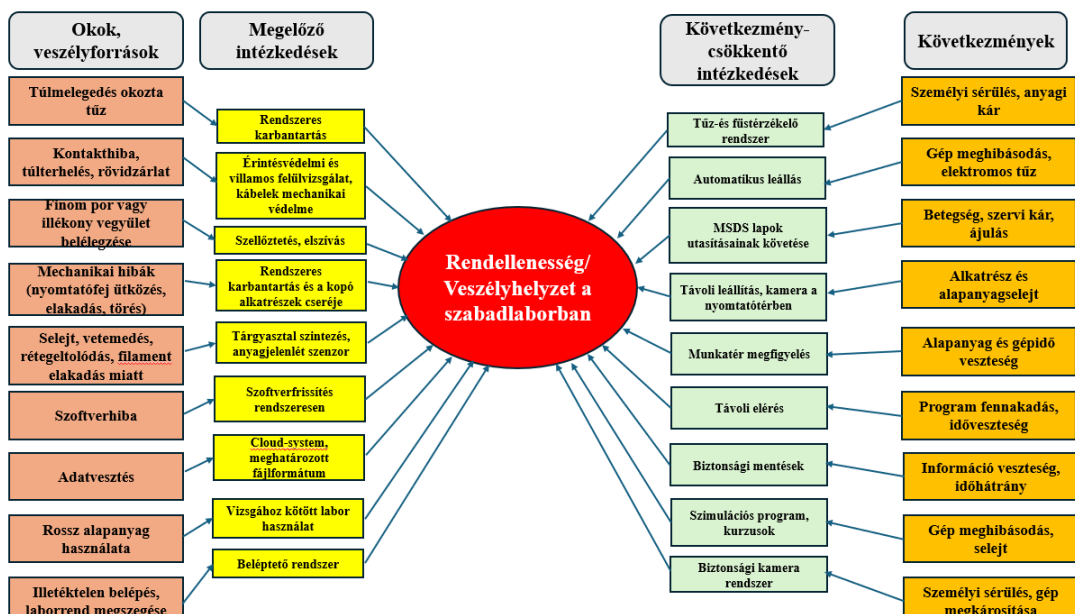
az egészségügyi ártalmak. Emellett az adatvesztés, a vezérlési hibák és az emberi mulasztások is jelentős kockázatot jelentenek. Összességében a labor nagy hozzáadott értéket képvisel, de a biztonságos és megbízható működéshez a technológiai fejlesztések és a kockázatkezelés tudatos erősítése elengedhetetlen.

A kockázati mátrix (2. ábra) segítségével két szempont szerint értékeltük a veszélyeket: a bekövetkezés valószínűsége és a következmény súlyossága. E két jellemző alapján priorizáltuk a kockázatokat és fogalmaztunk meg iránymutatást a beavatkozás jelentőségére. A valószínűséget és a súlyosságot 1-től 5-ig terjedő skálán pontoztuk, ezen pontszámok szorzatából kaptuk meg a kockázati értéket (kockázati szint) [11].

Veszély/Kockázat	Valószínűség	Súlyosság	Kockázati szint	Intézkedés
Túlmelegedés, hibás fűtésbeállítás okozta tűz	2	5	10 magas	Rendszeres karbantartás, Tűzoltókészülék, Tűz-és füstjelző rendszer, Nem éghető anyagból készült
Kontakthiba, rövidzárlat, túlterhelés, túlmelegedés	3	4	12 magas	Kábelek mechanikai védelme Rendszeres érintésvédelmi és villamos felülvizsgálat
Finom por vagy illékony vegyület belélegzése	4	4	16 kritikus	Megfelelő elszívás, szellőztetés kiépítése Zárt nyomtatóterület MSDS lapok közzététele
Mechanikai hibák (nyomtatófej ütközés, elakadás, törés)	4	2	8 közepes	Karbantartás és a kopó alkatrészek rendszeres cseréje Távoli leállítás Kamera felügyelet a nyomtatóterületen
Selejt, alapanyag-és gépidővesztéses vetemedés, rétegtelődés, filament elakadás miatt	4	2	8 közepes	Alapanyagjelentés szenzor Munkatér figyelő kamera Tárgyasztal szintezése
Távoli vezérlés vagy szoftverhiba	2	3	6 alacsony	Folyamatos szoftverfrissítés Biztonságos távoli elérés
Adatvesztés	2	4	8 közepes	Cloud system Csak engedélyezett fájlformátum
Rossz alapanyag	3	2	6 alacsony	Jogosultság vizsgálathoz köve Szimulációs szoftver Tudásbővítő kurzusok
Illetéktelen belépés, helytelen laborhasználat	4	3	12 magas	Kamera rendszer Beléptető rendszer
Helytelen tisztítás/takarítás hiánya	3	2	6 alacsony	SS bevezetése a laborba laborprotokoll közzététele

2. ábra. Kockázati mátrix, amely értékeli a lehetséges kockázatokat

Az elvégzett kockázatelemzés eredményeiben jól látszik, hogy több magas és kritikus kockázat is feltárható, melyek megelőzése és csökkentése elsődleges szempont a labor



3. ábra. Csokonyakkendő elemzés

biztonságos, folyamatos működtetéséhez. Magas kockázatok (10-16 pont) a biztonságos munkavégzéssel kapcsolatban jelentek meg, míg a közepes kockázati szintű (8-10 pont) veszélyek a berendezésekkel kapcsolatban értékelhetők. Az alacsony kockázatok (6-8 pont) többnyire a szakmai hozzáértés tekintetében azonosíthatók.

A csokornyakkendő-diagram (3. ábra) a felügyelet nélküli működő 3D nyomtató laborban történő nemkívánatos eseményeket szemlélteti [11][12]. Az elemzés átfogó és jól strukturált módon mutatja be a felügyelet nélküli 3D nyomtató laboratórium működésével kapcsolatos rendellenességek és veszélyhelyzetek teljes ok-következmény láncolatát.

Az ábra bal oldalán a kiváltó okok és a megelőző kontrollok, míg a jobb oldalon a lehetséges következmények és azok csökkentésére szolgáló intézkedések jelennek meg. A módszer jól alkalmazható a kapcsolódó kockázatok vizuális rendszerezésére és a kritikus beavatkozási pontok azonosítására. Az ábra szemléletesen mutatja az eddig kifejtett veszélyeket és azok következményeit. Az ellenintézkedéseket megelőző tevékenységre és következménycsökkentő tevékenységekre bontottuk.

Egyértelműen elkülöníti az okokat, a megelőző és következménycsökkentő intézkedéseket, valamint a lehetséges következményeket, így jól támogatja a rendszerszintű gondolkodást. Különösen értékes, hogy a műszaki, informatikai, munkavédelmi és felhasználói kockázatok egyaránt megjelennek, ami a labor valós működését tükrözi. Az elemzés eredményei alapján megállapítható, hogy a veszélyek jelentős része nem szüntethető meg teljesen, azonban megfelelő szervezési, technikai és digitális kontrollokkal kezelhető szintre csökkenthető. A digitális megoldások és az automatizált felügyelet hangsúlyos szerepe jól illeszkedik az Ipar 4.0 és Minőség 4.0 szemlélethez. Összességében az elemzés megbízható alapot nyújt a biztonságos üzemeltetési modell kialakításához és az oktatási célú alkalmazás megalapozásához.

#### 4 KÖVETKEZTETÉSEK

A tudományos és műszaki háttér áttekintése után feltárt kockázatok és azoknak három módszer használatával történt átfogó elemzése és kiértékelése jól mutatja, hogy a 3D nyomtatásra tervezett szabadlabor létrehozása milyen előremutató, innovatív és hasznos lehetőségeket hordoz magában, hatékonysági és automatizálási lehetőségekkel, azonban minde mellett műszaki, biztonsági, minőségügyi és informatikai kockázatokat is hordoz. Az eredmények összegzése után megállapítható, hogy a felügyelet nélküli labor létrehozása és működtetése nem tekinthető alacsony kockázatú projektnak, de a megfelelő ellenőrzések mellett hatékonyan és biztonságosan működtethető.

A kutatás célja volt az is, hogy a felügyelet nélküli működő labor esetén felmerülő kockázatokat feltárjuk és elemezzük annak érdekében, hogy annak jövőbeni működése megbízható és biztonságos legyen. Az elvégzett elemzések alapján megállapítható, hogy a labor működtetéséhez nem elegendő a technológiai háttér, hanem többrebbtel megelőző és ellenőrző rendszer is szükséges. Elengedhetetlen a biztonsági funkciók kiépítése és a megbízható távoli felügyelet biztosítása, jogosultságok kezelése. Ezek összességében hatékonyan hozzájárulnak a munkabiztonsághoz és nyomomonkövetetőséghez. A vizsgált kockázatokat tekintve, amennyiben a kár és vész helyzetek megelőzésére előterjesztett javaslatok megvalósításra kerülnek a labor hatéko-

nyan integrálhatóvá válik az oktatási rendszerbe, a fejlesztési javaslatok bevezetésével a labor üzemeltetése jól illeszkedhet az Ipar 4.0 és a Quality 4.0 szemlélethez.

Olyan modern, intelligens felügyeleti rendszer létrehozására és annak vizsgálatára nyílnak lehetőségek, melynek része a mesterséges intelligencia alapú hibafelismerés, szenzorhálózat és kamerás képfeldolgozás, ezzel elősegítve az önellenőrzőképességét a laboroknak. A jövőbeni fejlesztések és kutatások várhatóan hozzájárulhatnak ahhoz, hogy ezek a laborok a korszerű, digitálisan támogatott és minőségorientált gyártási környezetek megbízható elemeivé váljanak.

#### IRODALOMJEGYZÉK

- [1] ISO/ASTM 52900:2021 Additive manufacturing — General principles — Fundamentals and vocabulary
- [2] M. R. Khosravani & T. Reinicke (2020): On the environmental impacts of 3D printing technology. *Applied Materials Today*, Volume 20, 100689, ISSN 2352-9407 <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2020.100689>
- [3] M. Sony, S. Naik (2020): Key ingredients for evaluating Industry 4.0 readiness for organizations: a literature review. *Benchmarking: An International Journal*, Vol. 27 No. 7, 2213–2232. <https://doi.org/10.1108/BIJ-09-2018-0284>
- [4] P. Guo, N. Saab, L. S. Post, W. Admiraal (2020): A review of project-based learning in higher education: Student outcomes and measures. *International Journal of Educational Research*, Volume 102, 101586, ISSN 0883-0355 <https://doi.org/10.1016/j.ijer.2020.101586>
- [5] Blumenfeld, P. C., Soloway, E., Marx, R. W., Krajcik, J. S., Guzdial, M., & Palincsar, A. (1991): Motivating Project-Based Learning: Sustaining the Doing, Supporting the Learning. *Educational Psychologist*, 26(3–4), 369–398. <https://doi.org/10.1080/00461520.1991.9653139>
- [6] P. Jain, T. Bhardwaj (2022): Additive Manufacturing: A Comprehensive Review. *International Journal of Engineering Research in Mechanical and Civil Engineering (IJERMCE)*, Vol 9, Issue 7
- [7] A. Jandyal, I. Chaturvedi, I. Wazir, A. Raina, M. I. Ul Haq (2022): 3D printing – A review of processes, materials and applications in industry 4.0. *Sustainable Operations and Computers*, Volume 3, 33–42. <https://doi.org/10.1016/j.susoc.2021.09.004>
- [8] D. Aciermo & A. Patti, Antonella (2023): Fused Deposition Modeling (FDM) of Thermoplastic-Based Filaments: Process and Rheological Properties — An Overview. *Materials*, 16., 7664. <https://doi.org/10.3390/ma16247664>
- [9] Wang, TI., Chang, PC (2016): The Effect of 635 Brainstorming on the Creativity of Programming Design. In Wu, TT., Gennari, R., Huang, YM., Xie, H., Cao, Y. (eds) *Emerging Technologies for Education. Lecture Notes in Computer Science*, vol 10108, Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-52836-6\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-319-52836-6_6)
- [10] R. Puyt & F. Lie & C. Wilderom, Celeste (2023): The origins of SWOT analysis. *Long Range Planning*, doi: 10.1016/j.lrp.2023.102304
- [11] ISO/IEC 31010:2019 Risk management - Risk assessment techniques
- [12] A. de Ruijter, F. Guldenmund (2016): The bowtie method: A review. *Safety Science*, Volume 88, 211–218. ISSN 0925-7535 <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2016.03.001>

# Big data feldolgozás teljesítményének vizsgálata hibrid felhőkörnyezetben: fájlformátumok és a sávszélesség hatása

## Performance Analysis of Big Data Workloads in Hybrid Cloud Environments: The Role of File Formats and Bandwidth

Kantó Attila\*, Marosi Attila Csaba\*\*

\*Cloudera Hungary Kft., Budapest, Magyarország

\*\*HUN-REN Számítástechnikai és Automatizálási Kutatóintézet (HUN-REN SZTAKI), Magyar Kutatói  
Hálózat (HUN-REN), Budapest, Magyarország

[akanto@cloudera.com](mailto:akanto@cloudera.com), [attila.marosi@sztaki.hun-ren.hu](mailto:attila.marosi@sztaki.hun-ren.hu)

**Összefoglalás** — A tanulmány azt vizsgálja, hogyan befolyásolja a fájlformátum-választás (CSV, Parquet, ORC) a lekérdezések teljesítményét hibrid felhőkörnyezetben, ahol az adatok hagyományos adatközpontban kerülnek tárolásra, a feldolgozás pedig felhőben történik. A TPC-DS benchmark alapján méréseink azt mutatják, hogy az oszlopalapú formátumok több mint 88%-kal csökkentik a végrehajtási időt, és akár 96%-kal az adatátvitelt a CSV-hez képest. Az eredmények rámutatnak arra, hogy a fájlformátum-választás nemcsak a tárolási hatékonyságot, hanem a hálózati terhelést is érdemben befolyásolja, különösen elosztott, hibrid környezetekben.

**Kulcsszavak:** oszlopos fájlformátum, data lake, adatlokalitás, hibrid cloud, forgalomszabályozás, TPC-DS

**Abstract** — This study examines how file format selection (CSV, Parquet, ORC) impacts query performance in a hybrid cloud environment where data remains on-premise while processing occurs in the cloud. Based on TPC-DS benchmarks, our measurements show that columnar formats reduce execution time by over 88% and data transfer by up to 96% compared to CSV. The results indicate that file format selection significantly impacts not only storage efficiency but also network load, especially in distributed hybrid environments.

**Keywords:** columnar storage, data lake, data locality, hybrid cloud, traffic shaping, TPC-DS

### 1 BEVEZETÉS

A nagyvállalati adatfeldolgozásban a hibrid felhőarchitektúrák olyan rugalmas megoldást kínálnak, amely lehetővé teszi az *on-premise* adatközpontok meglévő infrastruktúrájának kiegészítését felhőalapú számítási kapacitásokkal, így biztosítva a fokozatos átmenetet a teljes migráció helyett. A hibrid megközelítések bevezetését több szempont is motiválja.

Egyrészt gazdasági rugalmasságot kínálnak: a publikus felhők hozzáférést biztosítanak olyan speciális

erőforrásokhoz, mint például GPU-k, FPGA-k vagy memóriaoptimalizált virtuális gépek. Ezek folyamatos használata azonban az *on-demand* árazás miatt jellemzően nem költséghatékony. A hibrid modell lehetőséget nyújt arra, hogy a már amortizált, helyszíni infrastruktúra szolgálja ki az állandó terhelést, míg az időszakosan megnövekedő kapacitásigények – például évszakos kampányidőszak vagy előrejelezhető adatcsúcsok – a felhőbe kiszervezve kerüljenek feldolgozásra.

Másrészt szabályozási és geopolitikai kényszerek is meghatározzák a hibrid stratégiák kialakítását. Különösen a pénzügyi szektor szereplőinek kell szigorúan betartaniuk az adatrezidencia-szabályozásokat, amelyek előírják, hogy bizonyos típusú adatokat az adott ország határain belül kell tárolniuk és feldolgozniuk.

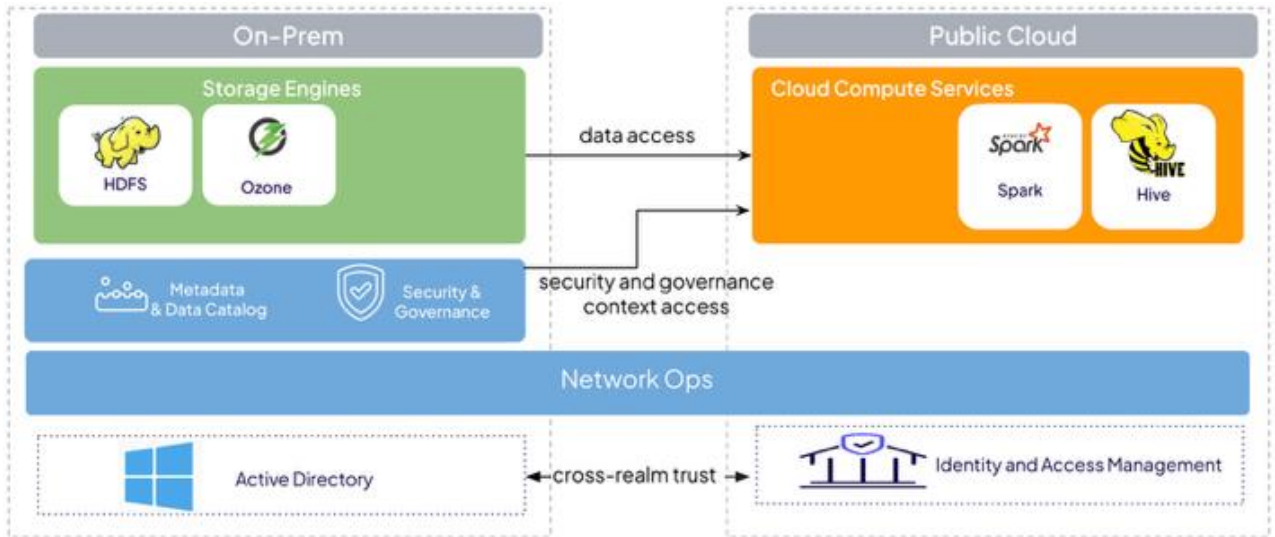
Végül nem elhanyagolható tényező a technikai inercia és alkalmazás-gravitáció sem. A meglévő, adatközponti környezetben futó analitikai rendszerek – mint például a tradicionális Hadoop-ökoszisztéma – gyakran nehezen migrálhatók felhőbe. Ennek oka többek között a *schema-on-read* szemantikán alapuló adattárolás, a beégetett és nem paraméterezhető elérési útvonalak, valamint a petabájtos nagyságrendű HDFS [1] klaszterek fizikai mozgathatóságának kihívásai. A hibrid modell lehetővé teszi, hogy ezek a rendszerek fokozatosan váljanak felhőkompatibilissé, elkerülve a “migrációs szakadékot”, amely egy egyszeri, teljes átállás során jelentkezik.

A hibrid modell különösen hasznos lehet akkor, ha egy szervezet időszakosan jelentkező, nagy számítási igényű feladatokat futtat, és nem kíván állandóan túlméretezett saját infrastruktúrát fenntartani, ugyanakkor a hibrid felhőmodell hatékony működése számos technikai kihívást vet fel. Az egyik legkritikusabb tényező a hálózati sávszélesség, amely gyakran szűk keresztmetszetként jelenik meg a felhőből indított, de *on-premise* adattárolót használó lekérdezések esetében. Ezen a ponton különösen fontos szerepet kap az adattárolás formátuma. Jelen tanulmány célja annak vizsgálata, hogy különböző

fájlformátumok hogyan befolyásolják a lekérdezések végrehajtási idejét és az átvitt adatmennyiséget.

A vizsgálat során az alábbi főbb következtetésekre jutottunk:

- A hibrid felhőarchitektúrákban alkalmazott fájlformátum-választás jelentős hatással van a lekérdezések végrehajtási idejére, a hálózaton átvitt adatmennyiségre és a CPU-kihasználtságra, még akkor is, ha a végrehajtási terv (Directed Acyclic Graph, DAG) lényegében változatlan marad.



1. ábra. Távoli adathozzáférés on-premise tárolóból architektúra diagramja

- Az oszlopalapú Parquet [2][4] és ORC [4] formátumok több mint 88%-kal csökkentették a végrehajtási időt a CSV-hez képest, miközben az átvitt adatmennyiség több mint 96%-kal volt alacsonyabb.
- A távoli adatelérés típusú hibrid modell sikeres alkalmazásához elengedhetetlen az adatátviteli mennyiség csökkentése. Ezt elsődlegesen a fájlformátum és az adatstruktúra megválasztásával lehet elérni.
- Bár jelen tanulmány nem tért ki a tömörítési algoritmusok részletes vizsgálatára, előzetes tapasztalataink alapján a formátumon belüli tömörítési technikák szintén jelentősen befolyásolják a hálózati átvitel mértékét és a feldolgozás teljesítményét.

A tanulmány a következőképpen épül fel. A második fejezet bemutatja a hibrid felhőarchitektúrák két domináns modelljét: a távoli adathozzáféréseken és az adatreplicáción alapuló megközelítést. A harmadik fejezet áttekinti a technológiai háttérelemeket és korábbi kutatásokat. A negyedik fejezet részletesen ismerteti a kísérleti környezetet, különös tekintettel a hálózati sávszélesség szabályozására és a vizsgálati paraméterekre. Az ötödik fejezet bemutatja a TPC-DS [5] benchmark alapján elvégzett mérések eredményeit, valamint a fájlformátumok és hálózati korlátok teljesítményre gyakorolt hatását. A hatodik fejezet összefoglalja a főbb megállapításokat és kijelöli a jövőbeni kutatás lehetséges irányait.

## 2 A HIBRID FELHŐKÖRNYEZET ARCHITEKTURÁLIS MODELLJE

A nagyvállalati környezetekben az adatokhoz való hozzáférés nem csupán technikai kérdés, hanem biztonsági, megfelelőségi és üzleti szempontból is kritikus tényező. A hibrid architektúrák megvalósítása során kiemelt fontosságú az autentikáció és autorizáció, az adatbiztonság, valamint a *governance* következetes és egységes kezelése mind az *on-premise*, mind a felhős környezetekben. A hibrid felhőarchitektúrák két domináns megközelítése az adatok és a metaadatok – például tábladefiníciók, valamint

a hozzájuk tartozó hozzáférési jogosultságok, vagyis annak meghatározása, hogy ki milyen szinten férhet hozzá az egyes táblákhoz, oszlopokhoz, sorokhoz vagy konkrét adatokhoz – fizikai elhelyezkedése és elérhetősége alapján: ezek a távoli adathozzáféréseken, illetve az adatreplicáción alapuló megoldások. Ezt a két megközelítést a következő két alfejezetben részletesen bemutatjuk.

### 2.1 Távoli adathozzáférés on-premise tárolóból

Ebben a hibrid modellben az adatok fizikai tárolása az adatközponti infrastruktúrában történik (pl. HDFS vagy Ozone [6]), míg a számítási feladatokat a publikus felhőben futó szolgáltatások végzik (pl. Apache Spark, Hive). Az adatfeldolgozás tehát a felhőben fut, de az adatforrás továbbra is az *on-premise* környezet marad. Minden lekérdezés során hálózati adatátvitel történik a két környezet között (lásd 1. ábra). Az egyik legfontosabb előny ebben a modellben, hogy az analitikai alkalmazások kódja jellemzően változatlan maradhat, hiszen az adatok logikai elérési útjai és szerkezete nem változik. Nincs szükség az alkalmazások újra tervezésére vagy adatmigrációra, ami jelentős idő- és költségmegtakarítást eredményezhet. Ez különösen hatékony akkor, amikor ideiglenesen megnövekedett feldolgozási kapacitásra van szükség (*burst workload*). További előny, hogy a metaadatok biztonsági kontrollréteg központosítva marad az *on-premise* környezetben, és ez a központosított biztonsági réteg lehetővé teszi, hogy a tábla-definíciók, hozzáférési jogosultságok, auditálási beállítások és *governance* szabályok egységesen érvényesüljenek – függetlenül attól, hogy a feldolgozás *on-premise* vagy publikus felhőben történik, például az adatbázis táblákhoz rendelt olvasási

vagy írási jogosultság mindkét környezetben ugyanúgy érvényesül.

Ugyanakkor a modell kihívásokkal is jár, különösen az identitáskezelési réteg integrációja terén. A nagyvállalati környezetekben az autentikációt jellemzően Active Directory biztosítja, míg a felhőben gyakran teljesen más identitáskezelési rendszerek működnek. Mivel a felhőben futó számítási motorok adatot érnek el az *on-premise* környezetből, biztosítani kell hogy azonosított és jogosult felhasználóként tudják ezt megtenni. Erre az egyik legegyszerűbb megoldás az ún. Cross-Realm Trust, amely lehetővé teszi az *on-premise* és felhőbeli tartományok közötti hitelesítési kapcsolatot, így az egyik rendszerben lévő felhasználók jogosultan férhetnek hozzá a másik rendszer erőforrásaihoz, legyen az adat, metainformáció, vagy akár rendszerkomponens.

## 2.2 Adatreplikáció a felhőbe

A második elterjedt hibrid megközelítés az adatreplikációra épül, ahol a vállalati adatok és metaadatok a helyszíni környezetből a felhőszolgáltató által biztosított tárhelyre kerülnek átmásolásra - jellemzően objektumtárolókba (pl. Amazon S3, Azure Blob Storage, Google Cloud Storage). A feldolgozás így teljes egészében a publikus felhőben történik, a replikált adatokkal dolgozó szolgáltatások közvetlenül felhős erőforrásokra támaszkodnak, ahogy a 2. ábra mutatja.

Ez a modell akkor lehet előnyös, ha az adatfeldolgozást teljesen el akarjuk választani az adatközponttól. A publikus és *on-premise* rendszerek fizikailag és logikailag is függetlenül működnek, így nincs szükség állandó hálózati kapcsolat fenntartására a két környezet között, valamint önállóan skálázhatók és üzemeltethetők. Az architektúra egy- vagy kétirányú replikációval is működhet, például a forrásadatok felhőbe történő másolása után előfordulhat, hogy a feldolgozás eredményeként keletkező adattermékek egy részét vissza kell másolni az adatközpontba.

Mivel az adatok fizikailag átkerülnek a felhőbe, az analitikai alkalmazásokat és lekérdezéseket módosítani kell, hogy az új adattárakat érhék el. A korábban említett, kódváltoztatás nélküli feldolgozás így lehetséges a logikát, útvonalakat újra kell konfigurálni.

Emellett a metaadatokat, a biztonsági beállításokat és a *governance* szabályokat is külön kell kezelni és replikálni, mivel az adatok fizikai helye, hozzáférési útvonala és

jogosultsági kontextusa megváltozik. Ez különösen bonyolult lehet dinamikusan változó szabályok vagy érzékeny adatok esetén, mivel a biztonsági és *governance* réteg már nem központilag érvényesül, hanem külön kell kialakítani a felhőben és az adatközpontban is. További korlátozás, hogy mivel az alkalmazásokat, lekérdezéseket és adatfeldolgozó folyamatokat újra kell írni, és gyakran eltérő, felhőspecifikus komponensekhez kell igazítani, nem valószínű, hogy az a fajta dinamikus terhelésalapú irányítás, amely lehetővé tenné, hogy egy adott feldolgozási feladat valós időben kerüljön átirányításra a privát vagy publikus környezetbe a pillanatnyi erőforrás-igények szerint.

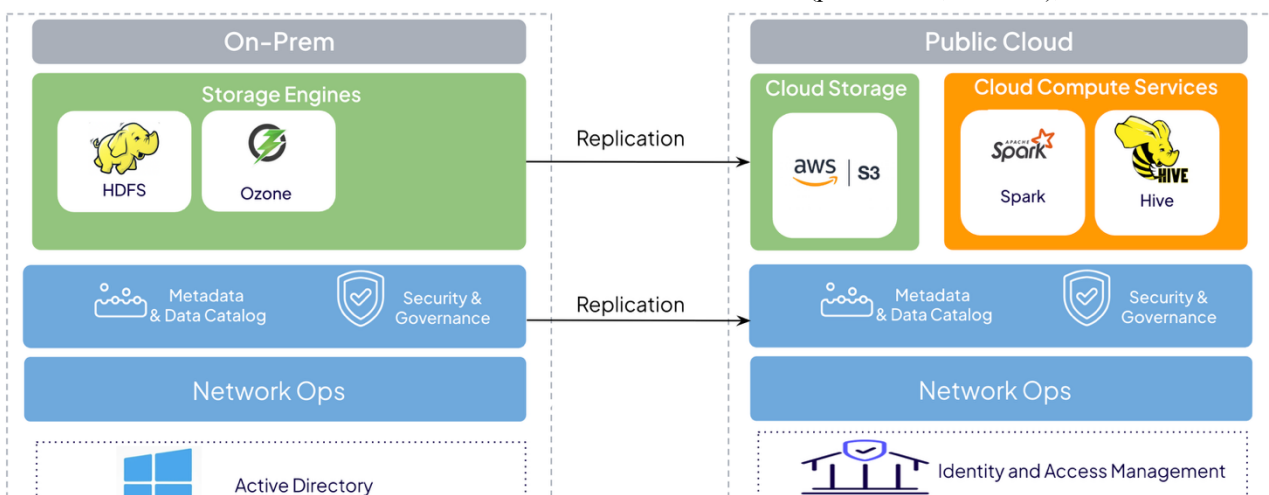
Ez az architektúra akkor lehet előnyös, ha a szervezet világosan el tudja különíteni a felhőben és az adatközpontban végzett feldolgozási feladatokat, és vállalja az ehhez szükséges alkalmazásmódosításokat és metaadatreplikációt. Ugyanakkor a környezetek közötti laza kapcsolódás, a független skálázhatóság és a hálózati szétválasztás magas fokú üzemeltetési rugalmasságot biztosít.

## 2.3 A vizsgálat fókusz: távoli adateléréses modell

A hibrid architektúrák közül jelen tanulmány az első megközelítést, a távoli adatelérés (*remote data access*) modelljét helyezi fókuszba. Ennek egyik legfontosabb indoka, hogy ez a megközelítés gyakorlatban a legegyszerűbb olyan szervezetek körében, amelyek már rendelkeznek jelentős méretű helyszíni (*on-premise*) adatplatformmal, de a feldolgozási kapacitásuk időszakosan kiegészítésre szorul.

A *burst* típusú munkaterhelések, amikor rövid ideig kiemelten nagy számítási igény lép fel, ideális jelöltek erre a modellre. Mivel az adatok logikai elérési útja nem változik, az analitikai alkalmazások kódja módosítás nélkül újrafelhasználható, és nincs szükség újraépített ETL *pipeline*-okra vagy felhőspecifikus rendszerkomponensek integrálására.

A modell hátránya, hogy minden lekérdezés adatot továbbít a hálózaton keresztül a helyszíni adatforrás és a felhőben futó végrehajtómotor között. Míg a felhőalapú számítási, memória- és tárolóerőforrások könnyen skálázhatók, a hálózati sávszélesség jellemzően merev korlát, amelynek bővítése költséges és technikailag is nehézkes lehet. A sávszélességet befolyásolja a fizikai infrastruktúra (pl. *switchek*, *routerek*), a cloud interconnect



2. ábra. Adatreplikáció a felhőbe architektúra diagramja

konfigurációja, ezért a távoli adatelérés esetén kulcskérdés, hogyan lehet csökkenteni a hálózaton továbbított adatmennyiséget.

### 3 TECHNOLOGIAI HÁTTÉR ÉS KAPCSOLÓDÓ KUTATÁSOK

Ebben a fejezetben áttekintjük azokat az alapvető technológiákat és fogalmakat, amelyek a dolgozat későbbi részeiben szerepelnek.

#### 3.1 Adattárolás

A Hadoop Distributed File System (HDFS) egy elosztott, nagy adatmennyiségek kezelésére tervezett fájlrendszer, amely replikáción alapul a megbízhatóság érdekében. A többszörösen tárolt blokkok lehetővé teszik a párhuzamos olvasást, ezáltal jelentősen növelhető az elérhető olvasási sávszélesség. Ez a modell akkor a leghatékonyabb, ha a számítás fizikailag közel történik az adatokhoz (*data locality*). A hibrid környezetek megjelenése azonban felbontja ezt a mintát: ha a feldolgozás felhőben történik, az on-premise HDFS eléréséhez minden esetben hálózaton keresztül kell adatot olvasni.

Bár újabb tárolási megoldások is megjelentek, a HDFS továbbra is széles körben használt az adatközponti rendszerekben, emiatt jelen tanulmány mérései során HDFS-alapú adattárolást alkalmaztunk.

#### 3.2 Adatkatalógus

A Hive Metastore (HMS) egy központosított metaadat-szolgáltatás, amely sémákat, tábladefiníciókat és az adatok fizikai elérési útvonalát tartalmazó URI-kat tárolja. Emellett statisztikai információkat is nyilvántart sor-, tábla- és partíciószinten, amelyeket a lekérdező motorok optimalizálásra használnak. Jelenleg az *on-premise* környezetekben az HMS az iparági szabványként működik. A vizsgálat során mi is ezt használjuk. A jövőbeni kutatások során újabb generációs megoldásokat tervezünk megvizsgálni, mint például az Apache Iceberg [18], Hudi [19] vagy Delta Lake [20], amelyek táblakezelési és evolúciós képességek terén fejlettebbek, és a felhőalapú környezetekben már egyre elterjedtebbek.

#### 3.3 Lekérdezésvégrehajtás Apache Spark SQL

A nagy adatmennyiségek lekérdezéséhez a strukturált lekérdezési nyelvek, elsősorban az SQL-alapú megközelítések, továbbra is a legelterjedtebbek. A Spark SQL integrálható az előző szekcióban bemutatott Hive Metastore-ral, így képes a meglévő sémákat és táblákat változtatás nélkül kezelni, támogatva az *on-premise* és hibrid környezetek közötti átjárhatóságot. Ezért a mérések során Spark SQL-t használtunk a lekérdezések végrehajtására.

#### 3.4 Fájlárolási formátumok

A strukturált táblázatos adatok különböző formátumokban tárolhatók, amelyek hatással vannak az adatfeldolgozás teljesítményére, a tárolási költségekre, valamint a hálózati adatátvitel mértékére. Az alábbiakban bemutatjuk a három legfontosabb fájlformátumot, amelyek szerepeltek a mérések során: CSV, Apache Parquet és Apache ORC.

A CSV (*Comma-Separated Values*) az egyik legegyszerűbb fájlformátum, ahol az adatok egyszerű szöveggé kerülnek tárolásra, soronként, egy meghatározott elválasztó karakterrel (általában vessző vagy pontosvessző). A mezők nem rendelkeznek

típusinformációval, minden érték karakterláncként értelmeződik. A CSV soralapú elrendezése miatt a lekérdező motoroknak a teljes sort be kell olvasniuk, még akkor is, ha csak egyetlen oszlopra van szükség ez jelentős I/O terhelést eredményezhet nagy adathalmazoknál. Emellett a CSV nem támogatja a sémaváltozást (*schema evolution*), nem tartalmaz belső metaadatokat, és nem rendelkezik indexeléssel. Előnye ugyanakkor az egyszerűsége, könnyű generálhatósága és olvashatósága.

Az Apache Parquet egy modern, oszlopalapú fájlformátum, amelyet kifejezetten nagy adatmennyiségek hatékony tárolására és feldolgozására terveztek. A Parquet oszloponként tárolja az adatokat, így csak a lekérdezés által érintett oszlopok kerülnek beolvasásra; ez jelentősen csökkenti az I/O műveletek számát, és gyorsítja a feldolgozást. A formátum számos adattömörítési és kódolási [7] technikát alkalmaz, például:

- *Dictionary encoding*: gyakran előforduló értékek szótáralapú tárolása.
- *Run-Length Encoding (RLE)* és *Bit-Packing*: ismétlődő értékek és kis egész számok tömör tárolása.

Az Apache Parquet támogat többféle tömörítési algoritmust, köztük az Uncompressedet, Snappyt, Gzipet, LZ4-t és a Zstandardet (Zstd). A Parquet fájl logikai felépítése *row group*okra (sorcsoport) tagolódik. Egy *row group* több ezer sor adatát tartalmazza, oszloponként csoportosítva, valamint tárolja az adott csoport statisztikáit (pl. min/max, null-arány). Ezek lehetővé teszik a *predicate pushdown*-technikák alkalmazását, a lekérdező motor a statisztika alapján már a beolvasás előtt eldöntheti, hogy egy adott csoport releváns-e.

Az Apache ORC (Optimized Row Columnar) szintén oszlopalapú formátum, a Parquet-hoz hasonlóan ORC is tömbösíti az adatokat, de *stripe*-okba (adatsávokba) rendezi azokat, amelyek egy-egy vízszintes szeletként tartalmazzák az adatokat, indexeket, statisztikákat és opcionálisan Bloom-filtereket. Az ORC minden fájlban háromszintű indexelést biztosít: fájl szintű index, *stripe*-szintű index, és soronkénti statisztikák (minden 10 000 rekord után). Ez lehetővé teszi, hogy a lekérdezés-végrehajtó motor gyorsan kizárja azokat az adatblokkokat, amelyek biztosan nem tartalmaznak releváns értékeket az I/O műveletek minimalizálása érdekében.

#### 3.5 TPC-DS benchmark

A teljesítménymérésekhez a TPC-DS (*Transaction Processing Performance Council - Decision Support*) [5][9] benchmarkot alkalmaztuk, amely a nagyvállalati döntéstámogató rendszerek terhelésének szabványos szimulációjára szolgál. A TPC-DS tartalmaz egy szintetikus, de üzletileg releváns adatkészletet, amely egy kiskereskedelmi vállalat működését szimulálja. Az adatkészlet 24 táblából áll: 17 ténytábla és 7 dimenziótábla. A ténytáblák lineárisan, míg a dimenziótáblák szublineáris arányban növekednek a konfigurált adatmennyiség függvényében. A vizsgálatok során 1000-es skálázási faktort használtunk, ami körülbelül 1000 GB nyers adatnak felel meg.

A TPC-DS benchmark része 99 SQL-lekérdezést tartalmaz, amelyek valós döntéstámogatási forgatókönyveket tükröznek. A lekérdezések között szerepelnek [8]:

- ad-hoc lekérdezések (egyszeri, gyors döntéshozatal támogatására);
- jelentéskészítés (pl. napi/heti összegzések);
- OLAP típusú elemzések (többdimenziós összehasonlítás, szezonális vizsgálatok);
- valamint adatbányászati mintázatkeresés.

Az adatok nem egyenletes eloszlásúak: a TPC-DS adatkészlet szándékosan olyan torzításokat (*skew*) tartalmaz, amelyek a valós üzleti környezetre jellemzőek. Ilyen például:

- A szezonális keresletváltozás, amely ünnepi időszakokra, kampányokra utal.
- Gyakran előforduló terméknevek és eladási csúcsok.
- Az időszakos visszaesések, amelyek természetes részei a kiskereskedelmi ciklusnak.

Ennek a felépítésének köszönhetően a TPC-DS különösen hasznos azokban a scenáriókban, ahol időszakos terhelésnövekedés figyelhető meg, például promóciók, kampányidőszakok vagy szezonáltság miatt. Ezek a környezetek gyakran igénylik a rövid távú skálázást, amit a hibrid felhőmodellek *compute burst* képességei képesek kiszolgálni. Éppen ezért a TPC-DS ideális benchmark számunkra is hálózati korlátok és adattárolási formátumok összehasonlító vizsgálatához.

### 3.6 AWS Direct Connect

AWS Direct Connect [16] egy dedikált hálózati kapcsolatot biztosító szolgáltatás, amely lehetővé teszi, hogy egy szervezet saját belső hálózatát közvetlenül csatlakoztassa az AWS infrastruktúrájához egy szabványos Ethernet optikai kapcsolat keresztül. A kapcsolat egyik vége a vállalati routerhez, a másik az AWS Direct Connect routeréhez kapcsolódik. Ennek révén virtuális interfészek hozhatók létre, amelyek közvetlen hozzáférést biztosítanak AWS-szolgáltatásokhoz. Kutatásunk szempontjából az AWS Direct Connect kulcsfontosságú technológia, mivel egy olyan dedikált hálózati kapcsolatot képvisel, amely a vállalati gyakorlatban is széles körben használt megoldás a hibrid felhőarchitektúrák kialakítására.

### 3.7 Kapcsolódó kutatások

Ivanov és Pergolesi [10] munkájukban az ORC és Parquet fájlformátumok teljesítményét hasonlították össze Apache Hive és SparkSQL környezetekben a BigBench [11] benchmark segítségével. Céljuk annak vizsgálata volt, hogy a fájlformátum megváltoztatása, illetve a különböző konfigurációs paraméterek hogyan befolyásolják a feldolgozómotorok általános teljesítményét. Ezzel szemben jelen tanulmány célja annak feltárása, hogy egy hibrid felhőkörnyezetben, ahol az adat *on-premise* tárolóban marad, a feldolgozás pedig a felhőben történik, a fájlformátum miként hat a lekérdezések teljesítményére, különösen akkor, amikor a két környezet közötti hálózati sávszélesség szűk keresztmetszetet jelent.

## 4 KÍSÉRLETI KÖRNYEZET

A kísérleti környezet két elkülönített klaszterből állt:

- *On-premise* klaszter: Ez a környezet egy klasszikus *on-premise* telepítést szimulált, amelyben HDFS, AWS-ben futó, virtualizált gépeken került kialakításra.

- Felhőalapú klaszter: Ez a klaszter szintén AWS virtuális gépeken futott, és a feldolgozási feladatokat a SparkSQL motor segítségével hajtotta végre.

Mindkét környezet négy virtuális gépből állt: egy dedikált vezérlő gépből (*master*), amely az irányítási és koordinációs feladatokat látta el, valamint három munkavégző (*worker*) virtuális gépből, amelyek a benchmark futtatásáért feleltek. Bár minden gép az AWS infrastruktúráján futott, az *on-premise* klaszter szoftveres és hálózati konfigurációja a lehető legnagyobb mértékben követte egy valós HDFS-alapú adatközponti környezet felépítését. Célunk az volt, hogy egy hagyományos, *on-premise* infrastruktúra viselkedését minél pontosabban modellezzük. A használt virtuális gépek részletes hardverkonfigurációját az 1. táblázat tartalmazza [15].

1. táblázat. Hardver konfiguráció

Specifikáció	Master VM	Worker VM (x 3)
VM típus (AWS)	r5.4xlarge	m6i.4xlarge
vCPU	16	8
Memória (GB)	128	64
Adattároló típusa	–	GP3 EBS
Lemezok száma	–	4
Lemezkapacitás (TB)	–	1 / disk
Átviteli sebesség (MB/s)	–	250 / disk
Alap hálózati sávszélesség (Gb/s)	5.0	6.25
Burst hálózat (Gb/s)	10.0	12.5

### 4.1 Forgalm szabályozás (Traffic Shaping Gateway)

A távoli adathozzáféréseken alapuló hibrid architektúrák esetében feltételezzük, hogy a hálózati sávszélesség korlátozottsága kritikus hatással van a lekérdezések végrehajtási idejére. E hipotézis vizsgálatára egy köztes infrastruktúraelem, az ún. forgalm szabályzó átjáró (*Traffic Shaping Gateway*, TSG) került beépítésre a helyszíni és a felhőalapú környezet közé. A TSG egy olyan központosított hálózati komponensként terveztük, amely lehetővé teszi a két klaszter közötti hálózati forgalom monitorozását és korlátozását, miközben az egyes klasztereken belüli kommunikáció zavartalanul és változatlan módon működhet. A teljes infrastruktúrában minden virtuális gépen statikus útvonalbeállításokat alkalmaztunk (*ip route* parancs segítségével) [12], így minden adat- és metaadatforgalom a TSG-n keresztül haladt át. A hálózati sebességkorlátozást a Linux tc [14] keretrendszerében elérhető *Hierarchical Token Bucket* (HTB) [13] algoritmus segítségével valósítottuk meg, amely lehetővé teszi sebességprofilok definiálását, késleltetések bevezetését, valamint a prioritások szabályozását.

Mivel az AWS-ben futó virtuális gépek hálózati viselkedését befolyásolhatja az ún. *network I/O credit* rendszer, mely ideiglenes, kreditalapú sávszélesség-növekedést (*burst*) tesz lehetővé, a mérések torzulásának elkerülése érdekében minden gépen rögzítettük a hálózati kapcsolatot az alap sávszélességi értéken, ezáltal egy valós

*on-premise* környezethez hasonló hálózati viselkedést biztosítva.

Az AWS Direct Connect [16] szolgáltatás 50 Mb/s és 25 Gb/s közötti sávszélességet támogat. Kísérleteink során kettő jellemző értéket, 5 Gb/s, és 25 Gb/s választottunk ki. Ezeket a sávszélesség-korlátokat egyenként alkalmaztuk a forgalomszabályzó átjárón keresztül. Ennek köszönhetően a vizsgálat nem csupán szintetikus tesztkörnyezetre épült, hanem iparági szempontból is valóságghú kapcsolatmodelleket tükrözött.

## 5 MÉRÉSI EREDMÉNYEK

Ebben a fejezetben a TPC-DS benchmark lekérdezések végrehajtása során tapasztalt erőforrás-használati mintázatokat elemezzük. Méréseink során minden egyes lekérdezést öt alkalommal futtattunk le, és az eredmények közül a medián végrehajtási időt rögzítettük, hogy csökkentsük az esetleges zaj vagy infrastruktúra-ingadozás hatását. Méréseink során az alábbi metrikákat rögzítettük minden egyes lekérdezés esetében:

- Átlagos CPU-kihasználtság: a lekérdezés teljes futása alatt mért CPU-terhelés a munkavégző virtuális gépeken.
- Hálózati sávszélesség-használat: az *on-premise* és felhő között átvitt adatmennyiség, lekérdezésenként.
- Végrehajtási idő: a lekérdezés teljes időtartama.
- Adatkészlet mérete: a formátumtól és tömörítéstől függően változó tárolási méret.

### 5.1 Összehasonlító eredmények különböző fájlformátumok esetén

A benchmarkot három különböző fájlformátum esetén futtattuk le: tömörítetlen CSV, Parquet, valamint ORC. A 2. táblázat a 99 lekérdezés aggregált statisztikáit tartalmazza.

2. táblázat. TPC-DS lekérdezések aggregált eredménye különböző fájlformátumok esetén

Formátum	Adatkészletmérete (GB)	Végrehajtási idő (s)	Átvitt adat (GB)	CPU kihasználtság (%)
CSV	864,61	31018,39	22268,80	81,14
Parquet	326,23	3669,06	814,69	65,59
ORC	284,63	3876,30	704,19	70,19

Az eredmények alapján egyértelműen megállapítható, hogy az oszlopalapú adattárolási elvet követő fileformátumok jelentős teljesítménybeli előnyt biztosítanak a CSV formátumhoz képest, még akkor is, ha tömörítés nem került alkalmazásra. Vizsgálatunk kizárólag az oszlopalapú formátumok belső adatstruktúráira és kódolási mechanizmusaira koncentrált. A végrehajtási idő Parquet esetén 88,2%-kal, ORC esetén 87,5%-kal csökkent. Az *on-premise* és felhő közötti átvitt adatmennyiség Parquet esetén 96,3%-kal, ORC esetén 96,8%-kal volt alacsonyabb. Az adatkészlet mérete Parquet esetén 62,3%-kal, ORC esetén 67,1%-kal kisebb a CSV-hez viszonyítva. Az átlagos CPU-kihasználtság is számottevően csökkent: CSV esetén 87,14%, míg Parquet és ORC esetében 65,59% illetve 70,19%.

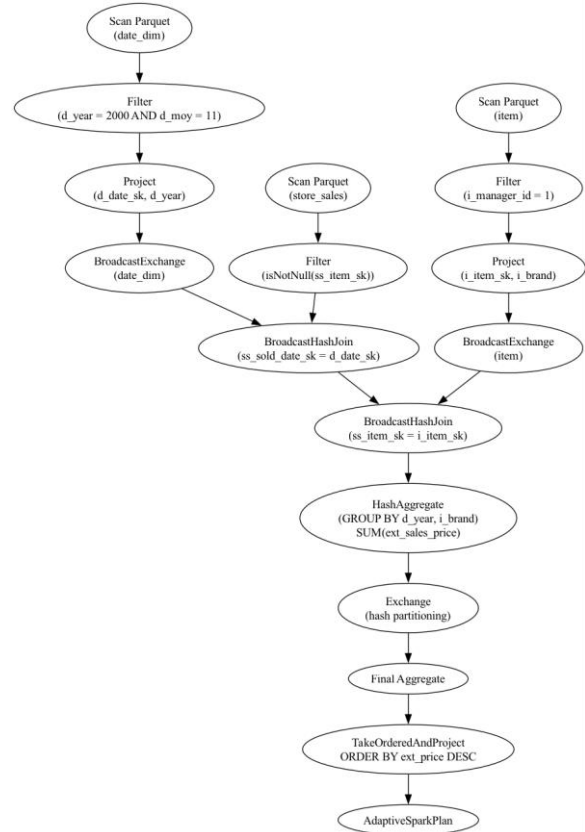
A teljesítménykülönbség elsősorban az oszlopalapú tárolás és a hozzá kapcsolódó belső kódolási technikák hatékonyságának köszönhető. Ezek közül kiemelendő:

- A *dictionary encoding*, amely a gyakran előforduló oszlopértékekhez szótárt rendel, ezáltal csökkenti a tárolandó értékek redundanciáját.
- Az RLE, amely a többször ismétlődő értékeket tömören reprezentálja, különösen hatékony alacsony kardinalitású oszlopok esetén.
- Az ORC formátum által támogatott Bloom-filterek, amelyek gyorsan képesek eldönteni, hogy egy adott érték szerepelhet-e az adott oszlopban, így hatékony előszűrést biztosítanak lekérdezés előtt.

Ezzel szemben a CSV formátum semmilyen ilyen típusú optimalizációt nem biztosít: sem kódolás, sem előszűrés, sem struktúra nincs beépítve. Ennek következtében minden lekérdezés során a fájl teljes egészében feldolgozásra kerül, ami jelentősen megnöveli a CPU- és hálózati terhelést, különösen hibrid környezetben, ahol a sávszélesség korlátos.

### 5.2 Esettanulmány: Query 52

Ebben a fejezetben egy konkrét példán keresztül mutatjuk be, hogyan befolyásolja a fájlformátum megválasztása egy lekérdezés végrehajtását. A TPC-DS 52-es [17] számú lekérdezése összetett *join*- és szűrési műveleteket tartalmaz (a végrehajtási tervet lásd a 3. ábrán), ezért jól reprezentálja azokat az analitikus lekérdezéseket, ahol a tárolási réteg és a formátum optimalizálása jelentős hatással lehet a végrehajtási időre, az adatátvitel mennyiségére és a CPU-kihasználtságra. Az



3. ábra. Lekérdezés-végrehajtási terv, TPC-DS lekérdezés 52

52-es lekérdezés egy összesített értékesítési kimutatást készít: kiszámítja a teljes eladási értéket (`ext_sales_price`) egy adott évben és hónapban értékesített, meghatározott márkájú termékekre. A végrehajtás során három táblát kapcsol össze: a `date_dim`, az `item` és a nagy méretű `store_sales` táblákat. A szűrés a `date_dim` táblán történik a `d_moy` és `d_year` oszlopok alapján, azaz időszakra szűr. Az `ss_sold_date_sk` kulcs alapján történő szűrés lehetővé teszi a `store_sales` partíciók hatékony beolvasását. Ennek köszönhetően, bár a tábla több mint 2,8 milliárd rekordot tartalmaz, a lekérdezés során csupán 88 millió rekord kerül tényleges beolvasásra, függetlenül a fájlformátumtól. A különbségek elsősorban a formátumok tárolási és dekódolási hatékonyságából fakadnak. CSV esetén a teljes `date_dim` tábla (73 049 sor) kerül beolvasásra, és csak utólag kerül alkalmazásra a szűrés. Ez nemcsak több adat beolvasását, hanem a teljes rekord minden mezőjének feldolgozását is jelenti (23 oszlop), még akkor is, ha csak 3 mező szükséges a lekérdezéshez. Parquet formátumban a Spark a *row group* statisztikák segítségével már a beolvasás előtt képes a szűrést részben alkalmazni, így csak 20 000 sort olvas be, amelyek közül végül 30 releváns sor marad. ORC esetén a formátum *stripe*-szintű statisztikai és Bloom-filterei révén a beolvasott rekordok száma 10.000-re csökken a szűrés előtt. A `store_sales` táblában is jelentős különbség tapasztalható. Míg CSV esetén minden oszlop beolvasásra kerül (majd a nem releváns 20 oszlop elvetésre), Parquet és ORC csak a lekérdezés által használt oszlopokat olvassa (`ss_item_sk`, `ss_ext_sales_price`, `ss_sold_date_sk`), így csökkentve az adatátviteli mennyiséget és a processzorterhelést. A következőkben a három formátum teljesítményét foglaljuk össze.

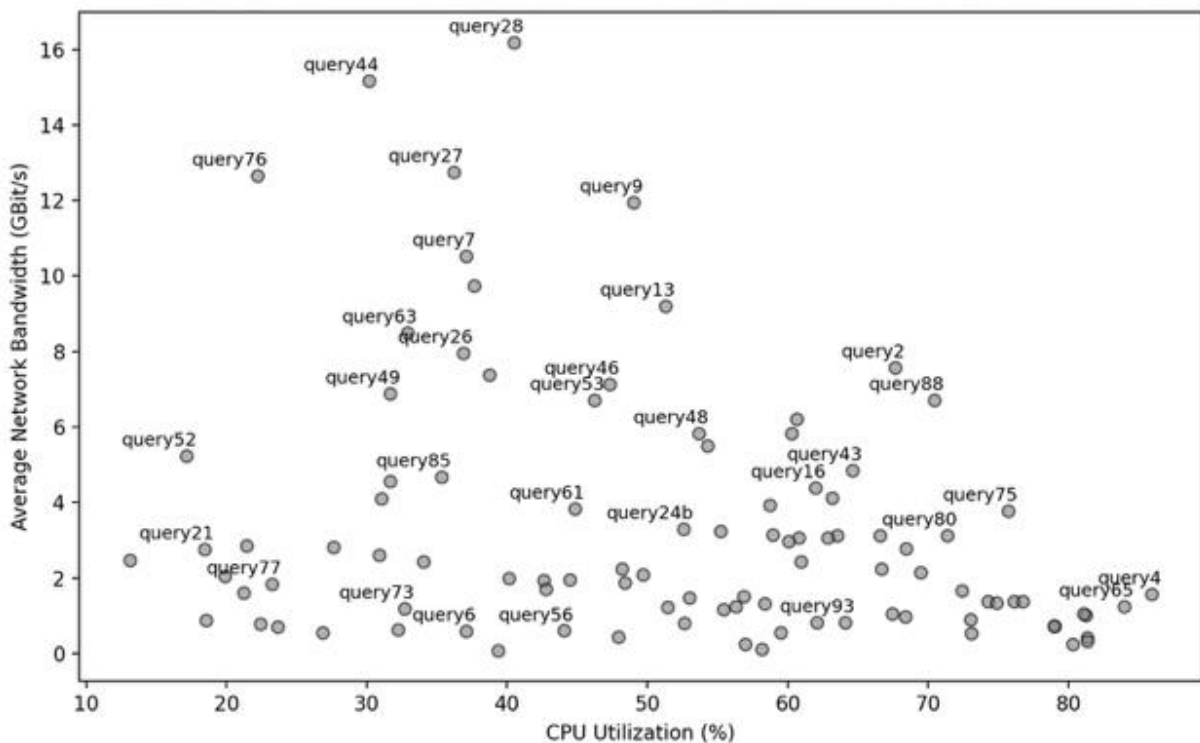
3. táblázat. TPC-DS 52-es lekérdezés teljesítményének összehasonlítása különböző fájlformátumok esetén

Formátum	Végrehajtási idő (s)	Átvitt adat (GB)	CPU kihasználtság (%)
CSV	17,41	11,05	69,52
Parquet	1,34	0,70	17,16
ORC	1,70	0,66	40,04

A 3. táblázatban szereplő mérések alapján jól látható, hogy a Parquet formátum alkalmazásával közel 13-szoros gyorsulás érhető el a CSV-hez képest, miközben az átvitt adatmennyiség több mint 15-szörös csökkenést mutat. Az ORC formátum szintén hasonló javulást eredményez, ugyanakkor valamivel magasabb CPU-kihasználás mellett, ami feltehetően a formátum dekódolási sajátosságaiból – például a Bloom-filterek alkalmazásából és a *stripe*-szintű indexelésből – adódik. Ezek az eredmények egyértelművé teszik, hogy bár a lekérdezés végrehajtási terve nem változik jelentősen, a fájlformátum megválasztása drasztikus hatással lehet a végrehajtási időre, az adatátviteli mennyiségre és a processzorterhelésre.

### 5.3 Lekérdezések erőforrásigényének vizsgálata *scatter plot* alapján

A következő két ábrán lekérdezésenként ábrázoljuk a CPU-kihasználtság és az átlagos hálózati sávszélesség értékeit, különböző sávszélességi korlátok mellett. Minden pont egy-egy TPC-DS lekérdezést jelöl, a címkéken a lekérdezés szám is feltüntetésre került.



4 ábra. TPC-DS lekérdezések CPU- és hálózati sávszélesség igényének eloszlása korlátlan sávszélesség mellett

A 4. ábra azt az esetet mutatja be, amikor a hálózati sávszélesség felső korlátját 25 Gbit/s értékre állítottuk be a forgalom szabályzó átjárón. Ez a kísérleti környezetben gyakorlatilag korlátlannak tekinthető, mivel a háttértárolók összesített I/O teljesítménye ennél alacsonyabb volt. Ezért látható az ábrán, hogy egyetlen lekérdezés sem éri el a 25 Gbit/s elméleti sávszélességet.

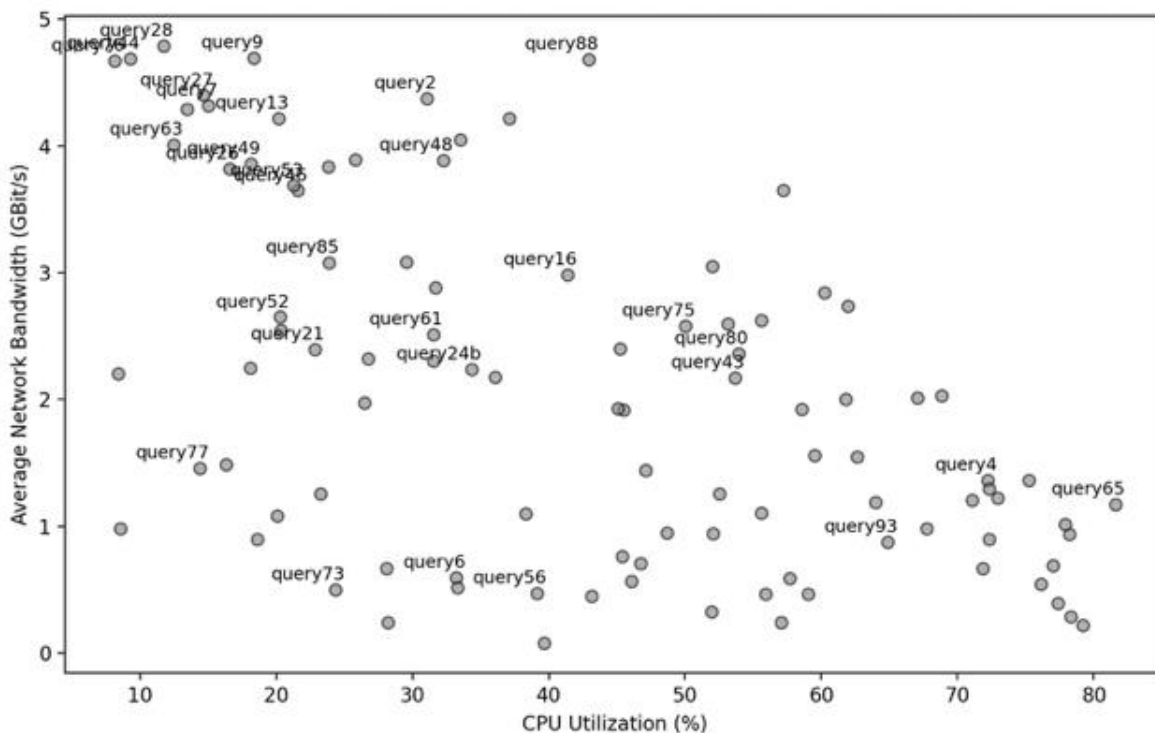
Ezzel szemben az 5. ábra azokat a méréseket szemlélteti, amelyek során a hálózati kapacitást 5 Gbit/s értékre korlátoztuk. Ez lehetővé tette, hogy megfigyeljük, hogyan viselkednek a hálózatintenzív és processzorigényes lekérdezések eltérő sávszélességi feltételek mellett.

A bal felső régióban elhelyezkedő lekérdezések, mint például a query28, query44, query76 és query9, jellemzően magas hálózati sávszélességet igényelnek, miközben viszonylag alacsony CPU-kihasználtsággal futnak. Ezek a lekérdezések gyakran nagyméretű adatmozgatást végeznek, és sávszélesség korlátozását követően ezek a lekérdezések egyértelműen lejjebb toldódtak a grafikonon, ami arra utal, hogy a rendelkezésre álló hálózati kapacitás csökkenése jelentősen befolyásolta az adatátvitel mértékét. Ennek hatására a végrehajtási idő is megnövekedett, mivel a csökkent hálózati áteresztőképesség miatt a feldolgozás hosszabb időt vett igénybe. Ezzel szemben a jobb alsó régióban található lekérdezések, például a query65, query4 és query93, kifejezetten magas CPU-terhelést mutatnak, ugyanakkor alacsony hálózati igényrel rendelkeznek. Ezek esetében a sávszélesség korlátozása nem eredményezett érdemi elmozdulást a grafikonon, ami arra utal, hogy teljesítményüket elsősorban a processzorerőforrások határozzák meg, és nem érzékenyek a hálózati áteresztőképesség szűk keresztmetszeteire.

## 6 KÖVETKEZTETÉSEK

A tanulmány célja az volt, hogy megvizsgáljuk a hibrid felhőkörnyezetekben futó analitikus munkaterhelések teljesítményét különböző fájlformátumok alkalmazásával, valamint, hogy elemezzük a hálózati sávszélesség szűk keresztmetszetként való hatását. A vizsgálat során a *compute burst* típusú architektúrát alkalmaztuk, amelyben az adatok *on-premise* tárolókban maradtak, míg a feldolgozás felhőalapú erőforrásokkal történt. Az eredmények egyértelműen azt mutatják, hogy a fájlformátum kiválasztása kulcsfontosságú tényező, amely jelentős hatással van nemcsak a végrehajtási időre, hanem az adatátvitel mennyiségére és a CPU-kihasználtságra is. A Parquet és ORC formátumok – amelyek oszlopalapú tárolási szerkezetet, metaadat-alapú optimalizációkat (*predicate pushdown*, *column pruning*) és hatékony tárolási elvet alkalmaznak – több mint 88%-os gyorsulást eredményeztek CSV formátumhoz képest, miközben az átvitt adatmennyiség több mint 96%-kal csökkent.

A hálózati korlátozások hatását vizsgálva megállapítottuk, hogy egyes lekérdezések teljesítményét jelentősen befolyásolja a rendelkezésre álló sávszélesség. A hálózatintenzív lekérdezések – például query28 vagy query44 – érzékenyen reagáltak az 5 Gbit/s-ra való korlátozásra, míg a CPU-intenzív lekérdezések, mint a query65 vagy query93, gyakorlatilag változatlan teljesítményt mutattak. Ez megerősíti, hogy a hibrid felhőarchitektúrák teljesítménye nemcsak a számítási, hanem a tárolási és hálózati réteg tulajdonságaitól is függ. Fontos megjegyezni, hogy jelen munka nem tért ki a fájlformátumok által támogatott tömörítési algoritmusok (pl. Gzip, Snappy) teljesítményre gyakorolt hatásának részletes vizsgálatára. Ezt a kérdéskört egy különálló,



5 ábra. TPC-DS lekérdezések CPU- és hálózati sávszélesség igényének eloszlása 5 Gbit/s sávszélesség korlátozás mellett

jelenleg benyújtás alatt álló publikációban tárgyaljuk, amely kifejezetten azt elemzi, hogy a hálózatintenzív lekérdezések esetén különösen nagy adatmozgatást igénylő forgatókönyvekben mennyiben lehet javítani a teljesítményt a megfelelő tömörítési technika kiválasztásával. Jelen kutatás eredményei gyakorlati iránymutatást adhatnak a vállalati IT-stratégiák kialakításához, különösen olyan helyzetekben, amikor cél a meglévő adatközponti erőforrások felhőalapú számítási kapacitással történő kiegészítése. A jövőbeni munkák során olyan dinamikus döntéstámogató stratégiák kidolgozását tervezzük, amelyek képesek az alkalmazások vagy lekérdezések jellege alapján meghatározni, hogy az adott feladatot a felhőben célszerű végrehajtani, vagy inkább érdemes azt az adatközponti környezetben tartani.

#### KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A jelen munkát részben a Technológiai és Ipari Minisztérium (korábban Innovációs és Technológiai Minisztérium) Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatala támogatta az Autonóm Rendszerek Nemzeti Laboratórium Program keretében; valamint a TKP2021-NVA-01 számú magyar projekt, amely a Technológiai és Ipari Minisztérium (korábban Innovációs és Technológiai Minisztérium) támogatásával, a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból, a TKP2021-NVA finanszírozási program keretében valósult meg.

#### IRODALOMJEGYZÉK

- [1] K. Shvachko, H. Kuang, S. Radia, and R. Chansler, "The hadoop distributed file system", 2010 IEEE 26th Symposium on Mass Storage Systems and Technologies (MSST), pp. 1–10, 2010. [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:13925042>
- [2] Apache Parquet, Apache Software Foundation. [Online]. Available: <https://parquet.apache.org/> (accessed: 2025-05-18)
- [3] D. Vohra, "Apache parquet", in *Practical Hadoop Ecosystem: A Definitive Guide to Hadoop-Related Frameworks and Tools*. Springer, 2016, pp. 325–335.
- [4] Apache ORC, Apache Software Foundation. [Online]. Available: <https://orc.apache.org/> (accessed: 2025-05-18)
- [5] R. O. Nambiar and M. Pöss, "The making of tpc-ds," in *Very Large Data Bases Conference*, 2006. [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:5590663>
- [6] Apache Ozone, Apache Software Foundation. [Online]. Available: <https://ozone.apache.org/> (accessed: 2025-05-18)
- [7] Apache Parquet - Data Page Encodings, Apache Software Foundation. [Online]. Available: <https://parquet.apache.org/docs/file-format/data-pages/encodings> (accessed: 2025-05-18)
- [8] M. Pöss, R. O. Nambiar, and D. Walrath, "Why you should run tpc-ds: A workload analysis," in *Very Large Data Bases Conference*, 2007. [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:2199276>
- [9] TPC Benchmark DS Standard Specification, Version 4.0.0, Transaction Processing Performance Council (TPC). [Online]. Available: [https://www.tpc.org/TPC\\_Documents\\_Current\\_Versions/pdf/TPC-DS\\_v4.0.0.pdf](https://www.tpc.org/TPC_Documents_Current_Versions/pdf/TPC-DS_v4.0.0.pdf) (accessed: 2025-05-18)
- [10] T. Ivanov and M. Pergolesi, "The impact of columnar file formats on sql-on-hadoop engine performance: A study on orc and parquet," *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, vol. 32, 2019. [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:203159206>
- [11] A. Ghazal, T. Rabl, M. Hu, F. Raab, M. Poess, A. Crolotte, and H.-A. Jacobsen, "Bigbench: towards an industry standard benchmark for big data analytics," in *ACM SIGMOD Conference*, 2013. [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:207202897>
- [12] Linux IP Routing - ip-route(8), man7.org. [Online]. Available: <https://www.man7.org/linux/man-pages/man8/ip-route.8.html> (accessed: 2025-05-18)
- [13] M. Bosk, M. Gajić, S. Schwarzmann, S. Lange, and T. Zinner, "Htbqueue: A hierarchical token bucket implementation for the onnet++/inet framework," *ArXiv*, vol. abs/2109.12879, 2021. [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:237940283>
- [14] Linux Traffic Control: Hierarchy Token Bucket (HTB), man7.org. [Online]. Available: <https://man7.org/linux/man-pages/man8/tc-htb.8.html> (accessed: 2025-05-18)
- [15] Amazon EC2 Instance Types - General Purpose Instances, Amazon Web Services. [Online]. Available: <https://docs.aws.amazon.com/ec2/latest/instancetypes/> (accessed: 2025-05-18)
- [16] AWS Direct Connect, Amazon Web Services. [Online]. Available: <https://aws.amazon.com/directconnect/> (accessed: 2025-05-18)
- [17] TPC-DS Query 52, Cloudera. [Online]. Available: <https://github.com/cloudera/impala-tpcds-kit/blob/master/query-templates/query52.tpl> (accessed: 2025-05-18)
- [18] Apache Iceberg, Apache Software Foundation. [Online]. Available: <https://iceberg.apache.org/> (accessed: 2025-05-18)
- [19] Apache Hudi, Apache Software Foundation. [Online]. Available: <https://hudi.apache.org/> (accessed: 2025-05-18)
- [20] M. Armbrust et al., "Delta Lake," *Proceedings of the VLDB Endowment*, vol. 13, pp. 3411–3424, 2020. [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:221351108>

# Kompetenciaalapú munkahelyi alkalmasság vizsgálata

## Competency-based workplace assessment

Várad Zoltán\*

\*Óbudai Egyetem Biztonságtudományi Doktori Iskola, Budapest, Magyarország

[varadi.zoltan@kgk.uni-obuda.hu](mailto:varadi.zoltan@kgk.uni-obuda.hu)

**Összefoglalás** — A tanulmány egy fuzzy logikán alapuló modellt mutat be a dolgozók munkavégzési alkalmasságának objektív értékelésére. A módszer célja a kompetenciák szubjektív és bizonytalan értékelésének leküzdése egy automatizálható, szabályalapú rendszer segítségével. A dolgozók kompetenciáit trapezoid tagsági függvényekkel modellezzük, amelyek lehetővé teszik a „közel jó” vagy „részben hiányos” szintek rugalmas kezelését. A munkakörök követelményeit fuzzy halmazokkal írjuk le, és a két profil illeszkedését fuzzy szabályok alapján értékeljük. A modell segíti a műszakvezetőket a legalkalmasabb dolgozók kiválasztásában, csökkentve a szubjektív torzításokat, és javítva a dolgozói allokáció hatékonyságát.

**Kulcsszavak:** kompetenciamátrix, dolgozói alkalmasság, allokáció, teljesítményértékelés, fuzzy logika.

**Abstract** — This paper presents a model based on fuzzy logic for the objective assessment of workers' fitness for work. The objective of the method is to overcome the subjective and uncertain assessment of competences by using an automatable, rule-based system. Competences of the workers are modelled with trapezoidal membership functions, which allow flexible treatment of "near good" or "partially deficient" levels. The job requirements are described by fuzzy sets and the fit between the two profiles is evaluated by fuzzy rules. The model helps shift managers to select the most suitable workers, reducing subjective biases and improving the efficiency of worker allocation.

**Keywords:** competency matrix, employee suitability, performance suitability, allocation, performance appraisal, fuzzy logic.

### 1 BEVEZETÉS

Az egyik legelterjedtebben alkalmazott minőség-irányítási rendszer szabvány, az ISO 9001:2015 előírja a szervezetek számára [1, p. 7.2.], hogy a munkavállalók tudását, képességeit, készségeit és gyakorlottságát – ezeket együttesen kissé pontatlan, ám az iparban elterjedt szóhasználattal: a kompetenciákat [2, p. 37] –, rendszeresen vizsgálják, több szempontot figyelembe véve. A dolgozók kompetenciáinak összhangban kell lennie az általuk végzett munka által igényelt gyakorlottság- és tudáselemekkel. Ennek érdekében a szervezet már a dolgozók kiválasztása során is vizsgálhatja bizonyos kompetenciák, készségek, és végzettségek meglétét, valamint munkába állás után gondoskodik a munkavállalók rendszeres és célirányos

oktatásáról, képzéséről, melyek célja a munkavégzéshez szükséges kompetenciaprofilok kialakítása. A dolgozó egy munkahelyen akkor végezhet munkát önállóan, ha rendelkezik az ott szükséges tudással és gyakorlottsággal. A munkavégzésre alkalmasság megítélését segíti, ha a munkahelyen szükséges kompetenciákat előzetesen katalogizálják, osztályozzák, és meghatározzák a munkavégzéshez minimálisan szükséges tudásszinteket.









Annak vizsgálata, hogy egy munkavállaló képes-e egy kiválasztott munkakör betöltésére, a munkahelyre egy kiválasztott műszakban munkavégzésre allokálható, az ipari gyakorlatban a műszakvezetője belátására, tapasztalatára és emberismeretére hárul. A gyakorlatban a műszakvezető egy „igen” vagy „nem” válasszal eldönti, hogy a vizsgált dolgozója kompetenciái szerint végezhet-e munkát egy kiválasztott munkahelyen, ám ez a nagyon egyszerű, kétértékű logika a gyakorlatban túlzó egyszerűsítésnek bizonyul [3, pp. 11-13.] .

### 2 ANYAG ÉS MÓDSZER

Az iparban főként a minőségirányítási rendszerek fejlődésével elterjedt kompetenciamátrix [4] a dolgozók kompetenciaszintjét az iskolai osztályozási rendszerhez hasonlóan több, esetenként három, általában négy vagy öt, ritkábban tíz osztályba sorolja. Az 1. táblázat illusztrálja egy tipikus kompetenciamátrix tartalmi elemeit, a 2. táblázat értelmezi a használt szimbólumokat. A kiszínezett negyedkörök száma jelzi, milyen mértékig kompetens a dolgozó az adott területen.

1. táblázat. Egy kompetenciamátrix tipikus felépítése. A táblázatban szereplő nevek és kompetenciák csak illusztrációk. A szimbólumok magyarázatát a 2. táblázat tartalmazza

Forrás: saját szerkesztés

Névsor	Kompetenciák				
	Termék- ismeret	Munka- védelem	Karban- tartás	Munka- utasítás	...
Minta Miklós					
Próba Péter					
...					

2. táblázat. A kompetenciaszintek egy lehetséges jelölése ötfokozatú skálán. A jelek magyarázata a szerző választása

Szimbólum	Jelentés
○	A vizsgált kompetenciára fejleszhető
◐	Megkezdődött a képzése, felügyelet mellett munkát végezhet
◑	Rutin műveletekben önállóan dolgozhat, rendszeres felülvizsgálat mellett
◒	Önálló munkavégzésre képes és jogosult
●	Önálló munkavégzésre képes, oktatásra képes, a betanulók felügyeletét is elláthatja

A képességszintek meghatározása általában a dolgozó teljesítményének szubjektív értékelésére alapszik, melyben több más, gyakran bizonytalanul meghatározható faktor is szerepet játszik [5]. A fuzzy logika lehetővé teszi e nem túl szigorúan meghatározható és szubjektív információk kezelését, így az emberi gondolkodás és vezetői fogalomalkotás leírását. A modell célja, hogy a munkavállalók teljesítményét különböző szempontok – például technikai tudás, a munka minősége, mennyiségképesség, felelősség, attitűd, vezetői képességek és elkötelezettség – alapján, objektívebb módon értékelje, kezelje a hagyományos értékelési rendszerek szubjektivitását és bizonytalanságát. A technika alkalmazásával a rendszer képes a teljesítményértékelés során gyakran előforduló homályos, nyelvi (lingvisztikus) kifejezéseket – mint például „jó”, „átlagos”, „gyenge” – matematikailag kezelhető formába átültetni. A fuzzy szabálybázis és tagsági függvények révén a rendszer a különböző bemeneti paramétereket automatikusan értékeli, majd ezekből egy kategóriát és egy mértéket rendel az alkalmazottnak. A vezetők által alkotott szabályrendszer a dolgozó által megadott paraméterek alapján automatikusan el tudja készíteni a teljesítményértékelést, melyet az idézett tanulmányban szinkódolással rögzítettek és jeleztek vissza a dolgozónak.

A fuzzy módszerek a munkavégzési képesség egy igazságosabb és pontosabb meghatározását teszik lehetővé, és általános konklúzióként megállapítható, hogy többfaktoros esetekben a döntés minőségét javítja a fuzzy halmazok alkalmazása [6]. A módszer főbb lépései:

- Fuzzifikáció: A tényleges, numerikus vagy szöveges teljesítményadatokat fuzzy változókká alakítják, amelyek tagsági függvényekkel írhatók le.
- Szabályalapú következtetés: A rendszer előre definiált szabályok alapján értékeli a különböző teljesítménymutatók kombinációit.
- Defuzzifikáció: Az eredményeket egyetlen, konkrét (*crisp*) értéké alakítják, amely alapján a munkavállaló teljesítménye besorolható.

Az idézett műben a több befolyásoló tényező értékelési céljait trapezoid tagsági függvényekkel írták le, és figyelembe vették a tényezők fontosságát. A teljesítményértékelés eredményét többelemű sorrendi skálára képezték le, a skála elemeit például ilyen fogalmak jelentették: „magas”, „jó”, „közepes” és „alacsony”. A szerző hangsúlyozza, hogy a fuzzy megközelítés közelebb áll az emberi gondolkodáshoz, így a döntéshozatali folyamat is természetesebbé és igazságosabbá válik.

A fuzzy logika alapú teljesítményértékelő rendszert egy másik kutatásban a dolgozók tisztességesebbnek és átláthatóbbnak érezték, ez nagyobb mértékben hozzájárult a munkahelyi elégedettséghez és motivációhoz [7]. Bár a

módszer más területeken is alkalmazható, az eredményeit akkor nem használták fel az allokáció tökéletesítésében.

A teljesítményértékelés és a szervezet hatékonysága közti összefüggést többféle fuzzy modell felépítésével vizsgálták [8]. A szerzők kiindulópontja, hogy a hagyományos teljesítményértékelési módszerek nehezen kezelik az emberi teljesítményértékelés komplexitását és szubjektivitását, ezért a fuzzy logika rugalmasabb, árnyaltabb keretet kínál az ilyen típusú bizonytalanságok és pontatlanságok kezelésére. A szervezeti hatékonyságot pénzügyi, minőségi, működési mérőszámokkal, és a dolgozókat leíró tulajdonságokkal közelítették. A tanulmány két fuzzy modellt mutat be: az egyik közvetlenül értékeli a teljesítménymenedzsment paramétereket, a másik pedig egy kaszkádolt megközelítést alkalmaz, ahol az első szint az egyéni válaszokat, a második szint pedig ezek összegzését vizsgálja a szervezeti eredményesség szempontjából. Mind az egyszerű, mind a kaszkádolt fuzzy modell hasonló eredményre vezetett; a kaszkádolt modell magasabb magyarázóerővel és jobb prediktív értékkel bírt. Az eredményeket összehasonlítva azt találták, hogy a modellek szerint erős a korreláció a teljesítményértékelés és kompetencia-menedzsment, valamint a szervezeti hatékonyság között. A szerzők hangsúlyozzák, hogy a fuzzy logika alkalmazása a teljesítménymenedzsmentben nemcsak pontosabb és igazságosabb értékelést tesz lehetővé, hanem növeli a dolgozói elkötelezettséget és elégedettséget is. Az idézett mű teljesítményértékelő rendszerének négy vizsgált komponense közül a tréning, és kis részben a teljesítménymérés és jutalmazás kötődik az e tanulmányban vizsgált kompetenciaszint-alapú alkalmasságvizsgálathoz.

A dolgozók kiválasztásának kritériumai és szempontrendszere jól fuzzifikálható feladatot alkotnak [9]. A bemutatott modell célja, hogy csökkentse a szubjektív emberi ítéletek és hagyományos értékelési módszerek korlátait, és a szervezet céljaival összehangolható hierarchiát hozzon létre. A négylépcsős folyamat az értékelési és kiválasztási szempontokkal kezdődik, melyben a szervezeti célok mellett a munkakörhöz szükséges készségek és az ezeket mérő indikátorok is fontos szerepet kapnak. Ezt követi a fuzzy nyelvi változók heurisztikus kiválasztása, majd a szabálybázis alapján történő kiértékelés. A fuzzy szabályrendszer kidolgozása és a következtetési rendszer felépítése után az eredmények értékelése és döntéshozatal következik, melyben a jelölteket rangsorolják. A modell csökkenti a szubjektivitást, ezáltal feltehetőleg csökkennek a véletlen emberi tévesztések is, ezzel lényegesen csökkennek a kiválasztás költségei is. A tanulmány egy ipari példán keresztül mutatja be, hogyan segíti a modellt a HR szakembereket az objektív kiválasztásban. A kutatás eredményei szerint a fuzzy alapú megközelítés nemcsak pontosabb és gyorsabb döntéseket tesz lehetővé, hanem javítja a szervezet teljesítményét is, mivel a kiválasztott dolgozók jobban illeszkednek a munkakör követelményeihez. A szerző hangsúlyozza a modell skálázhatóságát és alkalmazhatóságát különböző iparágakban, ahol a komplex kompetenciaértékelés kritikus szerepet játszik.

Az alkalmazottak kiválasztásának problémaköre az allokációs feladattal rokonítható, hiszen az is egyfajta kiválasztás: egy gyártósor mellett a műszakvezető gyakorlatában az elérhető dolgozók közül kell

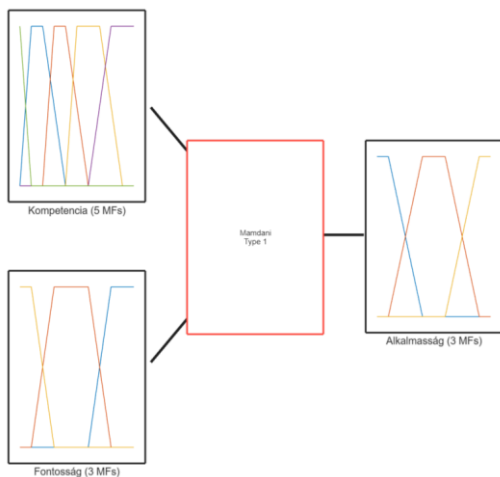
kiválasztania, melyik munkahelyre kit állít be az adott pillanatban. Ehhez elengedhetlen ismernie minden munkahelyhez a szükséges kompetenciák listáját és fontosságát, valamint a dolgozók kompetenciaszintjét. A műszakvezető célja, hogy minden munkahelyre legalább elégséges tudásszintű dolgozót tudjon állítani, és összességében a gyártósor a legmagasabb allokált tudásszinttel rendelkezzen, ez utóbbit “a legokosabb gyártósor” [10] néven illethetjük.

A dolgozók alkalmasságát leíró nyelvi minták, szókapcsolatok modellezéséhez lágy számítási módszerek alkalmazását javaslom, melyek segítségével számszerűen kifejezhető a dolgozó alkalmassága, így mérhetővé válik egy összetett gyártósori allokáció jósága. Az allokáció modellezésében két tényezőt vizsgállok:

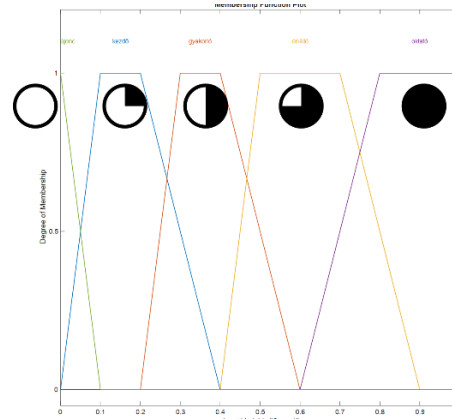
- a dolgozó kompetenciaszintjét egy 0 és 100% közötti relatív skálán, illetve
- az adott kompetencia fontosságát a munkahelyen végzendő tevékenységek szempontjából, hasonlóan 0 és 100% közötti relatív skálán ábrázolva.

A dolgozóra jellemző kompetenciákat és azoknak a munkahelyen lévő fontosságát figyelembe véve az 1. ábra fuzzy modellje segítségével állapítom meg a dolgozó egy kiválasztott munkapozícióhoz való alkalmazhatóságának mértékét. A fuzzy logikát alkalmazó modell felépítése során 4 fő fázison haladok végig, nem foglalkozva az ezt megelőző kompetenciaterképezéssel, adottságnak és előzetesen ismertnek feltételezem a kompetenciamátrix elemeit és az abban rögzített osztályozásokat, valamint a munkahelyek kompetenciaigényeit.

Első lépésként, a fuzziifikáció az inputok tagsági függvényekre leképezését jelenti a következő módon: A kompetenciaszintek fuzziifikálásához trapezoid függvényalakokat választottam, megjegyezvén, hogy a trapéz egy egyszerűsített esete a háromszög alakú függvény, mely jellemzően a tartományok szélein jelenik meg a vizsgált partíciókban. A kompetenciát a [0;1] zárt intervallumon modellezem, amely megfeleltethető például %-os teszteredményként egy képzés után, vagy munkavégzésben elért relatív teljesítmény- és minőségszint leképezéseként.



1. ábra. Az egy kompetenciát értékelő fuzzy döntési modell vázlata



2. ábra. A kompetenciamátrix jelölésrendszere és a tagsági függvények kapcsolata egy könnyebben hasznosítható kompetenciára.

A trapéz alakú  $\mu_A(x)$  függvényt leíró egyenlet az  $x \in [0; 1]$  intervallumon [6]:

$$\mu_A(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c}\right), 0\right). \quad (1)$$

Az egyenlet paraméterei,  $a, b, c,$  és  $d$  ugyanezen intervallumon a trapéz sarokpontjainak  $x$  koordinátái. A 2. ábra illusztrálja egy kompetenciához tartozó tagsági függvények partícióját, összekapcsolva a 2. táblázatban használt vizuális jelölésrendszerrel.

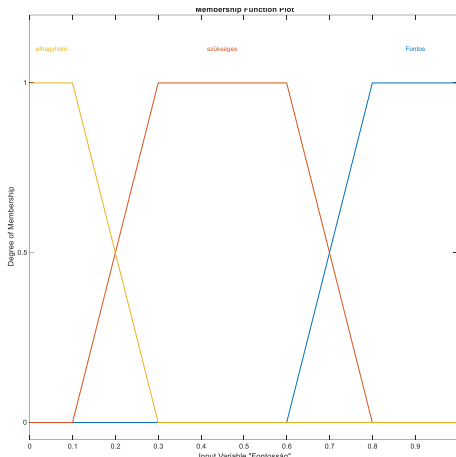
Könnyebben elsajátítható alapszintű ismeretek vagy gyakorlottság esetén a 2. ábra elrendezéséhez hasonló partícióval közelíthető: itt a skála alsó felében sűrűsödnek a tagsági függvények, ami azt jelenti, hogy alacsonyabb képzettségi szinttel is magasabb minősítést lehet szerezni. Ezzel szemben egy nagyobb kockázatot hordozó, nehezebben elsajátítható kompetencia esetén a tagsági függvények inkább az intervallum felső végéhez sűrűsödnek, az önálló munkavégzésre képesség magasabb relatív képességszint felé tolódik el. Óvatosságra intó sejtés, hogy a dolgozó kompetensségének osztályozását a műszakvezető preferenciális torzításai nagy mértékben és többnyire megismerhetetlen módon befolyásolhatják.

Általánosan, minden kompetenciához szükséges a 3. táblázathoz hasonló paraméterhalmaz meghatározása, amely lehetővé teszi a különféle kompetenciaszintek közti folytonos átmenetek leírását.

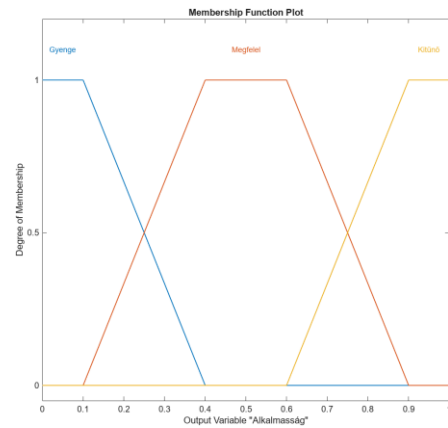
A kompetenciaterképezés egy szakértők által végzett, statikus feladat. Eközben lehetőség van a kiegyenlített átmenetekre törekedni az osztályok között, ezért a fontosság fuzziifikálása során a Ruspini-partíció kialakítását választottam.

3. táblázat. Egy kiválasztott kompetencia lehetséges értékelési szintjeihez tartozó trapezoid függvényekből álló partíció paraméterei

Szimbólum	a	b	c	d
○	0	0	0	0.15
◐	0	0.15	0.25	0.4
◑	0.25	0.4	0.5	0.6
◒	0.5	0.6	0.7	0.8
◓	0.8	0.9	1	1



3. ábra. Egy kompetencia fontossági osztályai



4. ábra. A kimeneti állapotok tagsági függvényeinek vizuális reprezentációja

Az előzőekhez hasonló tagsági függvény rendszerrel lehet jellemezni egy adott munkahelyen a kompetenciák fontosságát, és munkautasításokból kivonatolva a kompetenciamátrixhoz hasonló mátrixban lehet táblázatos formában rögzíteni. A fontosság kategorizálására három elemű szöveges értékelést választottam:

$$Y = \{\text{fontos; szükséges; elhagyható}\}. \quad (2)$$

A fontosságot kifejező kategóriákat szintén trapezoid tagsági függvényekkel képeztem le (3. ábra).

Elhagyható típusú kompetencia lehet például egy ritkán végzett munkatartalomhoz szükséges tudáselem, ha egyébként a nemciklikus munkatartalom elvégzésére alkálható helyettesítő erőforrás, azaz másik dolgozó. A fontos kompetenciákat nem birtokló dolgozóval a munkavégzés megkezdése is elképzelhetetlen, míg a szükséges kompetenciák egy másik része helyben, munka közben is elsajátítható.

A modell elkészítésének következő lépése a kiértékelési szabálybázis összeállítása. A választott szabályok kötik össze az input változókat a kimenettel, szakértői vagy heurisztikus elvek mentén. A szabálybázis megalkotása során egy tipikus allokációs feladatot és a műszakvezetői szempontrendszer képezem le. A műszakvezető célja a legjobb képességű gyártósort összeállítani, oly módon, hogy minden munkahelyen meglegyen az elégséges tudással rendelkező dolgozó.

4. táblázat. Kiértékelési szabályrendszer

Input 1: Kompetencia	Input 2: Fontosság	Output: Alkalmasság
○	(bármelyik)	Gyenge
◐	nem Elhagyható	Gyenge
◑	nem Fontos	Megfelel
◒	(bármelyik)	Megfelel
◓	nem Fontos	Kitűnő
◔	(bármelyik)	Kitűnő

Ehhez elsőként felméri, hogy a dolgozó a vizsgált munkahelyen való munkavégzésre milyen mértékben alkalmas. A szubjektivitást enyhíti a fuzzy modell. A műszakvezetői döntés leírására 6 allokációs szabályt határoztam meg, melyek alkalmazását a 5. ábra szemlélteti, és tetelesen a 4. táblázat foglalja össze. A szabályok szövegesen a (3) egyenlethez hasonló feltételekkel írhatók le:

$$\begin{aligned} \text{Ha } & \text{Kompetencia} = \text{gyakorló} \\ & \text{és } a \text{ Fontosság } \text{nem fontos} \\ \text{akkor } & \text{Alkalmasság} = \text{megfelel}. \end{aligned} \quad (3)$$

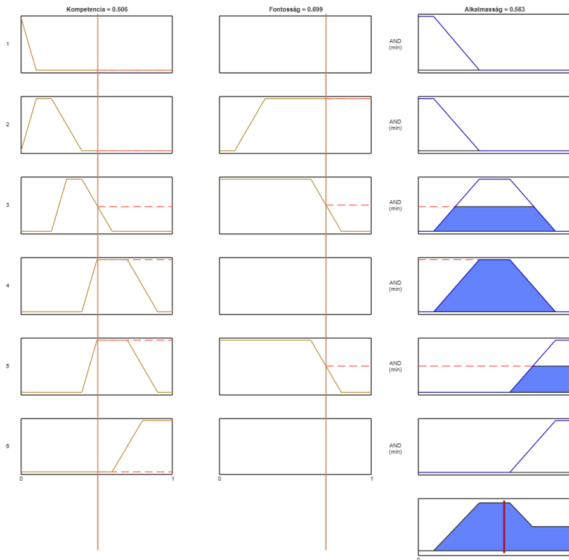
A modell kimenetén megjelenő szöveges értékelések szerint a dolgozó az adott munkakörre lehet „Kitűnő” választás, ha minden lényeges kompetenciaelemet kellő képzettséggel birtokolja. Ha nem minden szempontból szakértője a munkahelynek, munkavégzés szempontjából lehet „Megfelel”. „Gyenge” minősítést azok a dolgozók kapnak, akik nem rendelkeznek megfelelő szintű magabiztos tudással. A dolgozó megfelelőségét leíró nyelvi kifejezéseket szintén fuzzy halmazként lehet értelmezni, ahol az egyes tagsági függvényeket szintén trapéz alakú függvényekkel írtam fel, melyeket a 4. ábra mutat be.

A dolgozó egy pozícióban bevethetőségének mértékét a centroid módszerrel határoztam meg és fordítottam le egyetlen számértékre.

Egy kiválasztott munkatartalomhoz egy bizonyos kompetenciával rendelkező dolgozó alkalmassági indexét az 1. ábra modelljét felhasználva, a Matlab R2024b Fuzzy Logic Designer moduljával határoztam meg.

### 3 EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉSÜK

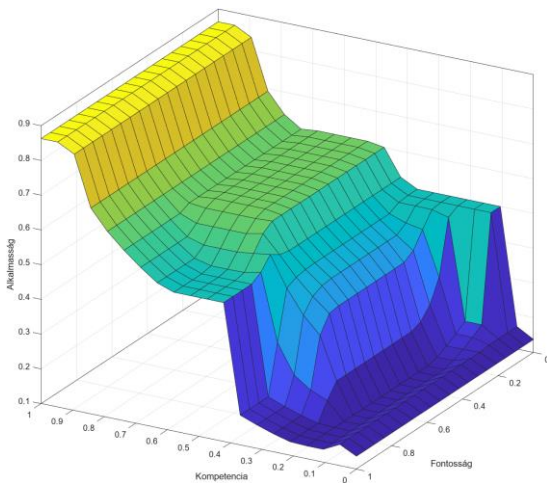
A modell segítségével tetszőleges mértékű kompetenciaszint esetén meghatározható a dolgozó adott munkahelyen való alkalmassága, azonban további finomhangolásokat igényelhet a tagsági függvények alakja és paraméterei által, mind az inputokon, mind az outputon. A módszer értéke, hogy egy konkrét számra, metrikára lefordíthatja a dolgozó alkalmasságát, ezáltal létrehoz egy alkalmassági indexet, amelyre célértéket és elvárási szinteket lehet kialakítani. Ezen index ismeretében a műszakvezető objektíven megítélheti a dolgozó bevethetőségét.



5. ábra. A döntési szabályok alkalmazása

Az indexértékek a teljes vizsgálható eseménytéren egy válaszfelület ábrával jeleníthetők meg, melyet a 6. ábra mutat be. Néhány konkrét számértékkel képviselve a dolgozó kompetenciaszintjét és azok fontosságát, kiszámoltam és bemutatom az index hasznosságát az 5. táblázatban.

Egy munkahelyen végzendő munka esetén gyakran nem csak egy-, hanem többféle kompetencia ismerete és elsajátítása szükséges. Ezért a dolgozók alkalmasságát több tényezőtől kiszámolt alkalmassági indexek eredője fogja meghatározni. Ebben a gyakorlatias esetben a dolgozó kompetenciáit egy vektorként, a munkakör követelményeit pedig egy másik vektorként lehet ábrázolni, ahol minden dimenzió egy-egy kompetenciát jelent. Mind a dolgozói, mind a munkaköri kompetenciaszintek fuzziifikált – például trapéz vagy háromszög alakú tagsági függvényekkel leírt – értékek. Az alkalmasság mértéke fuzzy mintázat-illesztéssel határozható meg, amely során a dolgozó kompetenciaprofilját hasonlítjuk a munkakör követelményprofiljához [11].



6. ábra. Egy kompetencia vizsgálata esetén a válaszfelület

5. táblázat. Konkrét számpéldák az alkalmasság meghatározására

Példa szituáció	Kompetencia szint	A kompetencia fontossága	Alkalmassági index
Kezdő dolgozó, mérsékelt fontosság	0,05	0,3	0,163
Kezdő dolgozó, fontos kompetencia	0,05	0,9	0,163
Gyakorló dolgozó, fontos kompetencia	0,45	0,8	0,500
Önálló dolgozó, szükséges kompetencia	0,65	0,9	0,529
Oktató dolgozó	0,95	0,95	0,863

A módszer előnye, hogy nemcsak a pontos egyezést, hanem a részleges megfelelést, a minimális vagy körülbelüli elvárásokat ("legalább közepes", "körülbelül jó") is képes kezelni, illetve a bizonytalanságokat is figyelembe veszi. Az értékelés aggregálható a kompetenciák fontossága szerint súlyozva, így globális alkalmassági mutató is képezhető. A szerzők példákkal szemléltetik, hogy a fuzzy logika alapú megközelítés sokkal rugalmasabb és robusztusabb értékelést ad, mint a hagyományos, éles (*crisp*) módszerek.

Az alkalmasság meghatározásánál egyaránt figyelembe veszem, hogy a kompetenciák eltérő fontosságúak a munkakör szempontjából, ezért egy súlyszámmal figyelembe veszem a munkakörhöz hozzájárulás mértékét – ez a súlyszám a korábban bemutatott fontosság-érték. Az összesített – eredő – alkalmasságot súlyozott fuzzy aggregációval határozom meg. Legyen  $w_i$  fontossági súlyszám az  $i$ -edik kompetencia súlya, és  $\mu_i$  a dolgozó tagsági értéke a vizsgált kompetenciában. Ekkor a dolgozó alkalmassága:

$$\text{Alkalmasság} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \mu_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (4)$$

A (4) formula alkalmazásával egy olyan esetben, ahol munkavégzéshez 4 kompetencia szükséges, egyenként és sorrendben 0,3 – 0,5 – 0,6 és 0,9 súlyszámmal, és a dolgozó kompetenciaszintje ugyanebben a sorrendben 0,7 – 0,2 – 0,3 és 0,9, az összesített alkalmassági index 0,565 lesz.

Ezzel a módszerrel nem csak az összesített alkalmasság, hanem kompetenciák szerinti hiányok is azonosíthatóak [11]. Ez lehetőséget ad célzott képzési, fejlesztési javaslatok megfogalmazására. Az idő múlásával a dolgozók kompetenciaszintjei változnak, képzés vagy tapasztalatszerzés hatására, így a modell dinamikus, időfüggő rendszerre kiterjeszhető.

Az alkalmasság vizsgálatát alokációs feladattá is át lehet fogalmazni [12], a célfüggvény a vállalati „humán potenciál” maximalizálása, miközben különböző korlátok is érvényesülnek, például a minimális kompetenciaszint egyes csoportokban, vagy a dolgozók csak egyetlen rögzített pozícióba való besorolása.

## 4 KÖVETKEZTETÉSEK, ÖSSZEZÉS

A tanulmányban bemutatott kompetencia-alapú, fuzzy logikát alkalmazó munkahelyi alkalmasságvizsgáló modell hatékony eszközt kínál a szervezetek számára a dolgozók és munkapozíciók közötti optimális megfelelés támogatására. A modell kiindulópontja, hogy a dolgozók kompetenciáit és a munkakörök elvárásait strukturáltan, mátrixszerűen rögzítjük, majd a kompetenciaszinteket fuzzy tagsági függvények segítségével értelmezzük. Ez a megközelítés lehetővé teszi a szubjektív, bizonytalan vagy részben ismert információk kezelését, és közelebb hozza a döntéstámogatást a vezetői gondolkodás természetes folyamataihoz.

A dolgozó kompetenciaszintjének vizsgálatára alapozva a vállalati kompetenciatérkép segítségével meg lehet határozni annak számszerűsíthető mértékét, hogy a dolgozó egy munkahelyen milyen szinten alkalmas a munkavégzésre, ezzel a műszakvezetők allokációs döntéseit lehet támogatni vagy pontosabbá tenni. A fuzzy modell precízen leképezheti a vezetői, emberi döntések potenciálfelületét, ugyanakkor egyidejűleg nagyon érzékeny lehet a tagsági függvények és döntési szabályok paraméterezésére. A partíciók meghatározásánál nagy hangsúlyt kell fektetni a tapasztalati döntések hű számszerű leképezésére.

A kutatás során igazolódott, hogy a trapezoid tagsági függvényekkel végzett fuzzifikáció és a szakértői szabálybázis alapján működő fuzzy következtetési rendszer képes árnyalt, differenciált értékelést adni a dolgozók munkavégzésre való alkalmasságáról. A modell előnye, hogy nem kizárólag éles határokkal dolgozik, hanem figyelembe veszi a részleges megfeleléseket, a kompetenciák eltérő fontosságát, valamint a munkakörök komplexitását is.

A munkavégzésre való alkalmasság általában nem egy kompetenciára alapul, a kompetenciatérkép több típusú kompetenciát is igényelhet egy munkatartalom eredményes elvégzéséhez. Gyártó munkahelyen például egyaránt fontosak az elméleti és gyakorlati ismeretek és készségek, beleértve a munkavédelmi előírások ismeretét és a felszerelés használatának készségét, az anyagismeretet és anyagkezelési előírásokat, ám míg például egy berendezés kezelése fontos készség, annak a karbantartási ismeretei a gépkezelő számára nem esszenciálisak mindaddig, amíg a karbantartás más erőforrást von be. A munkavégzésre való alkalmasság életszerűen egyidejűleg több kompetencia vizsgálatát igényli, amelynek leképezésére többszintű fuzzy modellt lehet alkalmazni [8] mintáját követve.

Összegzésként megállapítható, hogy a kompetencia-alapú fuzzy modell alkalmazása jelentősen csökkenti a szubjektivitást és a véletlen emberi tévedéseket a munkaerő-allokációban, miközben rugalmasan alkalmazkodik a szervezeti igényekhez és a valóságban tapasztalható bizonytalanságokhoz. A módszer továbbfejlesztése során érdemes lehet a dinamikus, időben változó kompetenciaprofilok, a csoportos alkalmasság, illetve a szervezeti szintű optimalizáció irányába is elmozdulni. A fuzzy logika integrációja a kompetenciamenedzsmentbe így hosszú távon hozzájárulhat a versenyképesség és a szervezeti rugalmasság erősítéséhez.

## 5 HIVATKOZÁSOK

- [1] ISO/TC 176/SC 2, *ISO 9001:2015 Quality management systems — Requirements*, Svájc: International Organisation for Standardization, 2015.
- [2] H. Hegyi, *Személy(iség) a kompetenciák mögött*, Pécs: Pécsi Tudományegyetem, 2012.
- [3] T. L. Kóczy és D. Tikk, *Fuzzy rendszerek*, Budapest: Typotex, 2000.
- [4] D. Race, „The Competency Matrix: The Ultimate Guide to Maximising Workforce Performance,” *ThinkEleven*, 24 01 2025. [Online]. Available: <https://www.thinkeleven.co.uk/Blog/Post/the-competency-matrix-the-ultimate-guide-to-maximising-workforce-performance>. [Hozzáférés dátuma: 2025.01.30.].
- [5] V. Anbarasu, A. Jenitha és J. Jerin Yulit, „Employee Performance Appraisal System Using Fuzzy Logic,” *International Journal of Innovative Research and Development*,. kötet6, szám3, pp. 1-5, 2017.
- [6] C. Ardil, „Applying Fuzzy Logic Theory to Performance Management,” *PressAcademia Procedia*, %1. kötet5, pp. 153-161, 2017.
- [7] H. Liu, H. Huang és J. Zhang, „Fuzzy logic-based performance management systems and employee motivation: An empirical study,” *International Journal of Human Resource Management*,. kötet31, szám12, pp. 1537-1557, 2020.
- [8] S. Nayak és M. Panda, „Impact of Performance Management System on Organizational Effectiveness: A Fuzzy Logic Approach,” *Journal of Propulsion Technology*, kötet45, szám2, pp. 4180-4192, 2024.
- [9] A. Golec és E. Kahya, „A fuzzy model for competency-based employee evaluation and selection,” *Computers & Industrial Engineering*, . kötet52, pp. 143-161, 2007.
- [10] L. Pokorádi, Interviewee, *Konzultáció*. [Interjú]. 2023.02.22.
- [11] R. Houé, B. Grabot és G. Tchuente, „Proceedings of the 7th conference of the European Society for Fuzzy Logic and Technology (EUSFLAT-11),” in *Atlantis Press*, Hollandia, 2011.
- [12] Z. Ciric, D. Stojic és O. Sedlak, „Multicriteria HR Allocation Based on Hesitant Fuzzy Sets and Possibilistic Programming,” *Acta Polytechnica Hungarica*, kötet12, szám3, pp. 185-197, 2015.

# 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)

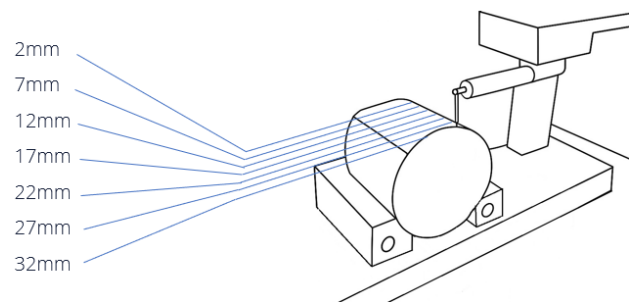
A vágósebesség ( $Vc$ ) paraméterek állandóak voltak a kísérlet során, hogy kizárólag az anyag és a szerszámváltozás hatását vizsgálhassuk a felületi minőségre. A fogankénti előtolás ( $fz$ ) négy szinten változott: 0,03; 0,05; 0,07 és 0,09 mm/fog, míg az axiális fogásmélység ( $ap$ ) minden esetben 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 szolgáltattak 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.

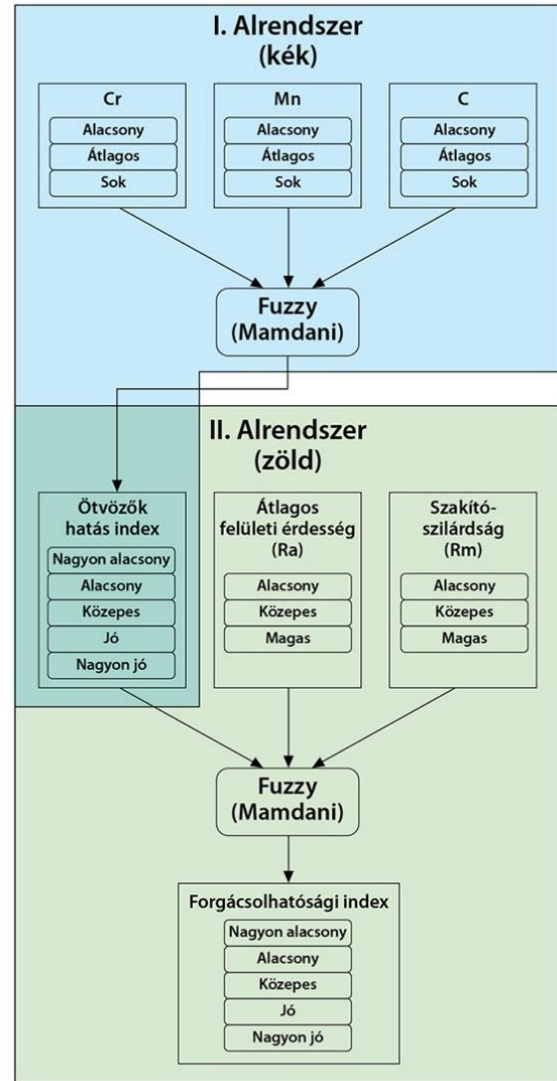
### 3 A JAVASOLT MODELL FELÉPÍTÉSE

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 valóságghú változását a bemenetek függvényében. A fuzzy modell az index előállításához emberi szakértői tudás alapján felépített szabálybázist használ.

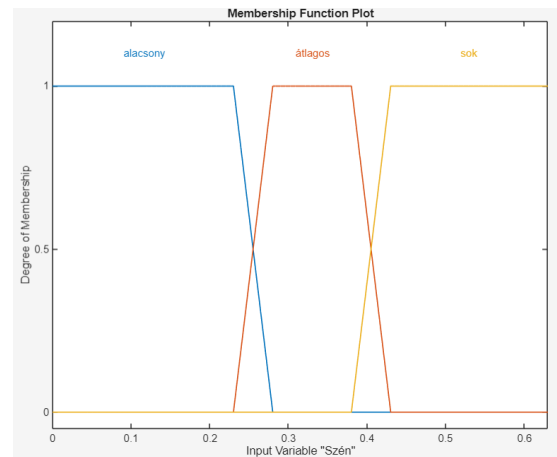
A javasolt modell két alrendszerből épül fel. Az I. alrendszer az alapanyag százalékos összetételének vizsgálatára szolgál (lásd 2. ábra, kék keret), ahol az egyes ötvözőelemek hatását (Ötvöző Hatás Index, ÖHI) értékeltük a forgácsolhatóság szempontjából. A II. alrendszer bemeneteként az I. alrendszer kimeneteként meghatározott ÖHI jelenik meg, amelyet kiegészít a kísérletek során mért átlagos felületi érdesség ( $R_a$ ), valamint a szakítószilárdság ( $R_m$ ). 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.

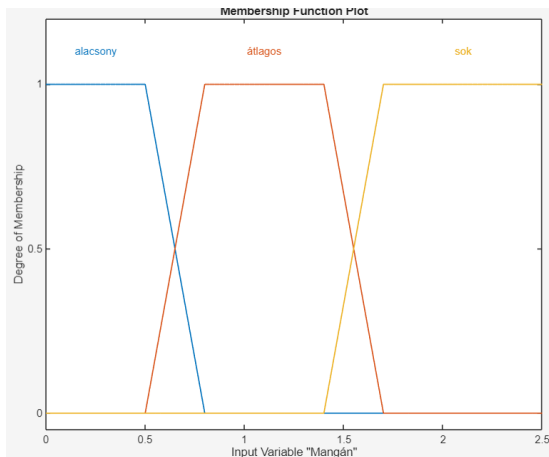
Az I. alrendszerben használt bemeneti tagsági függvényeket az 3–5. ábrák szemléltetik, amelyek részletesen bemutatják az egyes bemeneti tartományok fuzzy partícióit, a kimenetet pedig a 6. ábra illusztrálja.



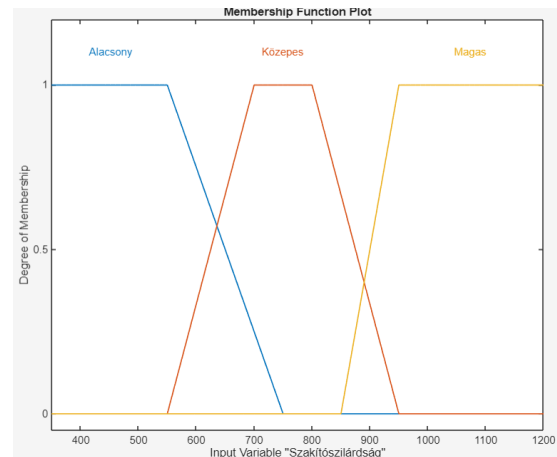
2.ábra. A javasolt modell felépítése



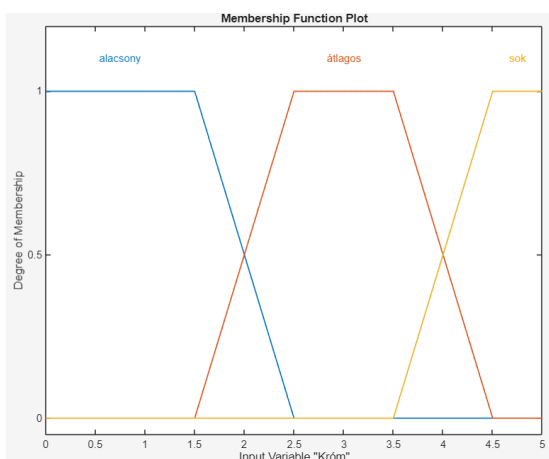
3. ábra: A szén bemeneti tagsági függvényei



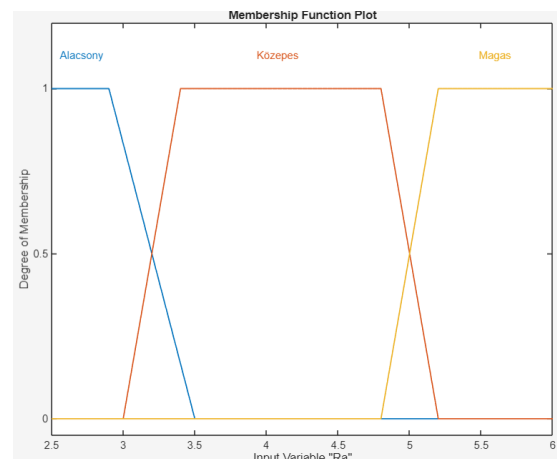
4. ábra. A mangán bemeneti tagsági függvényei



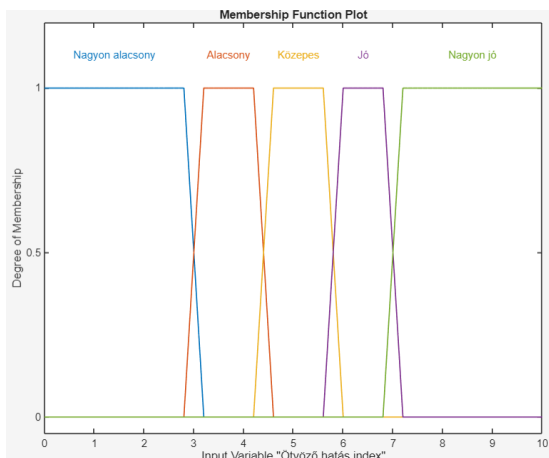
7. ábra. A Szakítészilárdság tagsági függvényei



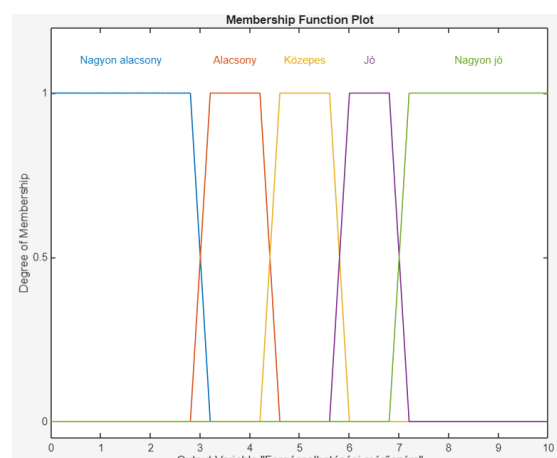
5. ábra. A króm bemeneti tagsági függvényei



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

# Fuzzy logikai alapú kapacitív szintmérő szenzorok széles hőmérséklet és nyomás tartományban működő állati hulladékfeldolgozó rendszerekhez

## Fuzzy logic based capacitive level sensor for animal waste processing systems with a wide range of temperature and pressure

Nagy Sándor

Óbudai Egyetem Biztonságtudományi Doktori Iskola,  
[nagy.sandor@phd.uni-obuda.hu](mailto:nagy.sandor@phd.uni-obuda.hu)

**Összefoglalás** — A tanulmány bemutatja az Integrated Sterilizer & Shredder (ISS) állati hulladékfeldolgozó rendszerben alkalmazott kapacitív szintmérő szenzorok fuzzy logikán alapuló optimalizálását. A 130 °C hőmérsékletű és 2,7 bar (abszolút) nyomású sterilizálási környezetben a hagyományos szintérzékelés pontatlan, mivel az anyaglerakódás, hőmérséklet-ingadozás és párasodás zavarják a mérést. A kifejlesztett fuzzy rendszer a dielektromos állandó, elektromágneses csillapítás és vezetőképesség paramétereinek együttes kiértékelésével 92%-os megbízhatóságot biztosít az extrém körülmények között.

**Kulcsszavak:** fuzzy logika, kapacitív szenzor, impedancia spektroszkópia, szintmérés, állati hulladékfeldolgozás

**Abstract** — This study presents a fuzzy logic-based optimization of capacitive level sensors used in the Integrated Sterilizer & Shredder (ISS) animal waste processing system. In the sterilization environment of 130°C temperature and 2.7 bar (absolute) pressure, conventional level sensing is inaccurate as material deposits, temperature fluctuations, and condensation interfere with measurements. The developed fuzzy system achieves 92% reliability under extreme conditions by simultaneously evaluating dielectric constant, electromagnetic attenuation, and conductivity parameters.

**Keywords:** fuzzy logic, capacitive sensor, impedance spectroscopy, level measurement, animal waste processing

### 1 BEVEZETÉS

A vágóhidak napi üzemideje alatt akár több tonna veszélyes hulladék is keletkezik, amelynek újrafeldolgozása napjainkban egyre elterjedtebb. Az állati hulladék újrahasznosítás folyamatának végeredménye fehérjeliszt és állati eredetű olaj. Előállításához kiemelt fontosságú szerepet tölt be az ISS (Integrated Sterilizer & Shredder), [1] mely a nevéből is következtethetően a befogadott terméket aprítja és sterilizálja. Ezen kémiai folyamat optimalizálásához kifejlesztett receptek

szükségesek mely a feldolgozandó, sterilizálandó terek összetételét és sűrűségét megadott határokon belül tartja, melyet a betáplálendő termékek, folyadékok folyamatos szabályozásával és szinten tartásával kivitelez. Ezen folyamat a 3000 literes térfogatú ISS tartályban történik, ahol a folyamat 20 °C-os kiindulási hőmérsékletéről akár 130 °C-ra emelkedik a sterilizálási fázisban, 1,7 bar abszolút nyomás mellett. Ebben a környezetben a hagyományosan egyszerűen beszerelt kapacitív szenzorok megbízhatatlanná válnak a következő tényezők miatt:

- Hőmérséklet-ingadozás: A fémkomponensek hőtágulása és a dielektromos állandók változása.
- Anyaglerakódás: A szenzor felületére tapadó zsír, fehérje vagy csontrészecskék.
- Összetétel-változás: A víz, csont, belsőség és hús arányának folyamatos változása.
- Turbulencia: A darálási folyamat során keletkező keverékáramlás és buborékképződés.

A kapacitív szintmérő működése alapvetően a dielektromos állandó változásának mérésén alapul<sup>[2]</sup>, ami a fenti körülmények között félvezető jeleket adhat. A hagyományos bináris (be/ki) jeladással működő rendszerek nem képesek megkülönböztetni a tényleges szintváltozást a környezeti hatásoktól.

A fuzzy logika ideális megoldást kínál erre a problémára, mivel képes:

1. Kezeleni a bizonytalan, pontatlan adatokat.
2. Több paramétert egyidejűleg értékelni.
3. Alkalmazkodni a változó üzemi körülményekhez.

Jelen tanulmány a kapacitív szintmérő szenzorok fuzzy logikán alapú optimalizálását mutatja be, amely lehetővé teszi a megbízható működést az ISS rendszer széles hőmérsékleti tartományában (20 °C-tól 130 °C-ig).

## 2 ANYAG ÉS MÓDSZER

### 2.1 Az ISS rendszer és a feldolgozási folyamat

A Celitron Agri ISS rendszer egy komplex hulladékfeldolgozó berendezés, amely az állati maradványokat értékes fehérjelisztté és olajjá alakítja. A feldolgozási folyamat főbb lépései, melyet a termelésre meghatározott feldolgozási receptben foglaltak alapján:

1. Előkészítés: 20 °C-os fogadó víz betöltése a 3000 literes tartályba.
2. Alapanyag adagolás: sterilizálandó állati hulladék (csont, belsőség, hús) recept szerinti bevitele, adagolása.
3. Homogenizálás: A feldolgozandó termék folyamatos keverése és aprítása 150 °C-os gőz hozzávetésével, a meghatározott hőmérséklet határig.
4. Előfőzés: 95 °C-ra fűtés, majd meghatározott időintervallumban a termék puhítása és a szemcseméret csökkentése (finomítása) történik.
5. Sterilizálás: 130 °C-on, 1,7 bar (relatív) nyomáson, telített gőz környezetben a sterilizálási szinthez szükséges időintervallumig.
6. Szeparálás és szárítás: A folyadék és szilárd fázisok elválasztása.

Az előzőekben ismertetett folyamat során a kapacitív szintmérő szenzorok kulcsszerepet töltenek be a töltöttségi szint folyamatos és pontos detektálásában, ezáltal támogatva a rendszer megbízható működését, mely alapján az automatika vezérli az adagolást. A pontatlan szintmérés túltöltéshez vagy alultöltéshez vezethet, ami rontja a végtermék minőségét és biztonsági kockázatot is jelent.

### 2.2 A kapacitív szintmérők működési elve [3],[5]

A kapacitív szenzor impedancia spektroszkópia elvén működik, amely 50-200 MHz frekvenciatartományban méri a közeg elektromos és mágneses tulajdonságait. A szenzor három fő paramétert érzékel:

1. Elektromágneses csillapítás ( $\alpha$ ): A közeg által elnyelt energia (dB/cm).
2. Elektromos vezetőképesség ( $\sigma$ ): A közeg áramvezetési képessége ( $\mu\text{S/cm}$ ).
3. Dielektromos állandó ( $\epsilon$ ): A közeg elektromos tér tárolási képessége.

A kapacitív mérés alapelve a következő egyenlettel írható le:

$$C = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{A}{d}, \quad (1)$$

ahol:

- $C$  - kapacitás (F)
- $\epsilon_r$  - relatív dielektromos állandó (-)
- $\epsilon_0$  - vákuum permittivitása ( $8,85 \cdot 10^{-12}$  F/m)
- $A$  - elektródafelület ( $\text{m}^2$ )
- $d$  - elektródák távolsága (m).

Az impedancia spektroszkópia a komplex impedancia ( $Z$ ) mérését végzi, amely a valós (rezisztív,  $Z'$ ) és képzetes (reaktív,  $Z''$ ) komponensekből áll:

$$Z = Z' + jZ'' \quad (2)$$

- $Z'$  (valós rész): Hatásos ellenállás ( $R$ ), amely az energia hővé alakulását jelenti (ohm,  $\Omega$ ).

- $jZ''$  (képzetes rész): Reaktancia ( $X$ ), amely a fáziseltolódást írja le (szintén  $\Omega$ ).
- $Z''$ : Reaktancia értéke.
- $j$ : Képzetes egység, amely a fáziseltolódást reprezentálja.

A rendszerben megjelenő különböző anyag típusok jellemző értékeit az 1. táblázat tartalmazza.

1. táblázat. Különböző anyagok elektromágneses tulajdonsága 200 MHz frekvencián

Feldolgozandó anyag (% felosztásban)	Elektro - mágneses csillapítás (dB/cm)	Dielektromos állandó (-)
Víz (100)	0.035	107.7
Csont (100)	0.433	16.6
Belsőség (100)	0.312	74.6
Marhahús (100)	0.260	80.1
Csont+víz (20/80)	0.114	89.5
Belsőség+víz (20/80)	0.090	101.1
Marhahús+víz (20/80)	0.080	102.2
Csont+víz (30/70)	0.154	80.4
Belsőség+víz (30/70)	0.118	97.8
Marhahús+víz (30/70)	0.102	99.4

A keverékek elektromágneses tulajdonságait az összetevők súlyozott számtani átlagaként számíthatjuk:

$$\alpha_{keverék} = \frac{w_{anyag} \cdot \alpha_{anyag} + w_{víz} \cdot \alpha_{víz}}{100}, \quad (3)$$

és

$$\epsilon_{keverék} = \frac{w_{anyag} \cdot \epsilon_{anyag} + w_{víz} \cdot \epsilon_{víz}}{100}, \quad (4)$$

ahol:

- $\alpha$  - elektromágneses csillapítás (dB/cm)
- $\epsilon$  - dielektromos állandó (-)
- $w_{anyag}$  - anyag százalékos aránya (%)
- $w_{víz}$  - víz százalékos aránya (%)

### 2.3 A Fuzzy logikai rendszer tervezése [3],[7]

A fuzzy rendszer döntéshozatali folyamata három szinten valósul meg, amelyek hierarchikus kapcsolatban állnak egymással. Az első szint felelős a nyers szenzor adatok előfeldolgozásáért, ahol a zajszűrés zajlik adaptív szűrő algoritmusok segítségével. A második szinten történik a paraméterek normalizálása és a tagsági függvényekhez való hozzárendelés, míg a harmadik szint a szabálybázis dinamikus optimalizálását végzi a rendszerállapot függvényében. Ez a többrétegű architektúra lehetővé teszi a valós idejű alkalmazkodást a sterilizáló kamra gyorsan változó körülményeihez.

### 2.4 A fuzzy logikai rendszer tervezése [4]

A fuzzy rendszer tervezéséhez a Mamdani-féle következtetési mechanizmust alkalmaztuk, amely három fő lépésből áll:

1. Fuzzifikáció: A bemeneti értékek fuzzy halmazokká alakítása.
2. Szabálykiértékelés: A fuzzy szabályok alkalmazása.

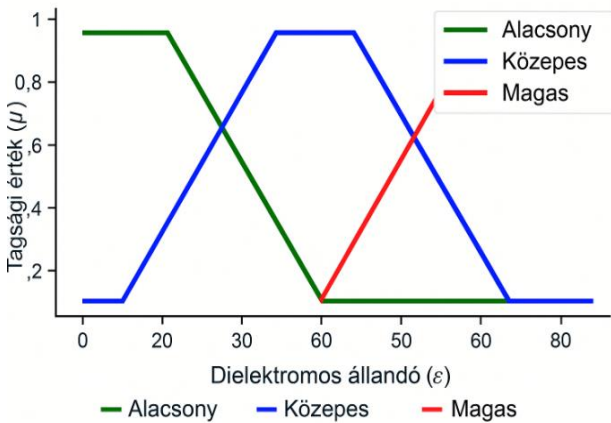
3. Defuzzifikáció: A fuzzy kimeneti halmazok éles értéké alakítása.

2.4.1 Bemeneti változók és tagsági függvények

A rendszer három bemeneti változót használ:

1. Dielektromos állandó ( $\epsilon$ ): Alacsony (0-30), Közepes (20-70), Magas (60-80)
2. Elektromágneses csillapítás ( $\alpha$ ): Alacsony (0-0,5), Közepes (0,4-1,5), Magas (1,4-3,0)
3. Hőmérséklet (T): Alacsony (20-60°C), Közepes (50-110°C), Magas (100-140°C)

Az 1. ábra a dielektromos állandó tagsági függvényeit mutatja be.



1. ábra. Dielektromos állandó tagsági függvényei

2.4.2 Kimenet és tagsági függvények

A rendszer kimenete a Szintjelzés megbízhatósága, amelynek tagsági függvényei:

- Alacsony (0-40%): Valószínűleg hamis jelzés (pl. anyaglerakódás)
- Közepes (30-70%): Bizonytalan, további megerősítés szükséges
- Magas (60-100%): Valós folyadékszint nagy valószínűséggel

2.4.3 Fuzzy szabályok

A fuzzy rendszer 27 szabályt tartalmaz, amelyek közül a legfontosabbak:

1. HA ( $\epsilon$  = Magas) ÉS ( $\alpha$  = Alacsony) ÉS (T = Alacsony) AKKOR (Megbízhatóság = Magas)
2. HA ( $\epsilon$  = Magas) ÉS ( $\alpha$  = Alacsony) ÉS (T = Magas) AKKOR (Megbízhatóság = Közepes)
3. HA ( $\epsilon$  = Alacsony) ÉS ( $\alpha$  = Magas) ÉS (T = Bármilyen) AKKOR (Megbízhatóság = Alacsony)

A fuzzy szabályozási részlet a (27 szabályból) a 2. táblázatban látható.

2. táblázat. Részlet a fuzzy szabálybázisból

#	Dielektromos állandó ( $\epsilon$ )	Elektromágneses csillapítás ( $\alpha$ )	Hőmérséklet (T)	Szintjelzés megbízhatósága (%)
1	Magas (60-80)	Alacsony (0-0,5 dB/cm)	Alacsony (20-60 °C)	Magas (85-100%)
2	Magas (60-80)	Alacsony (0-0,5 dB/cm)	Közepes (50-110 °C)	Magas (80-95%)
3	Magas (60-80)	Alacsony (0-0,5 dB/cm)	Magas (100-140 °C)	Közepes (60-80%)
4	Magas (60-80)	Közepes (0,4-1,5 dB/cm)	Alacsony (20-60 °C)	Közepes (60-80%)
5	Magas (60-80)	Közepes (0,4-1,5 dB/cm)	Közepes (50-110 °C)	Közepes (55-75%)
6	Magas (60-80)	Közepes (0,4-1,5 dB/cm)	Magas (100-140 °C)	Közepes (50-70%)
...	...	...	...	...
22	Alacsony (0-30)	Közepes (0,4-1,5 dB/cm)	Alacsony (20-60 °C)	Alacsony (20-40%)
23	Alacsony (0-30)	Közepes (0,4-1,5 dB/cm)	Közepes (50-110 °C)	Alacsony (15-35%)
24	Alacsony (0-30)	Közepes (0,4-1,5 dB/cm)	Magas (100-140 °C)	Alacsony (10-30%)
25	Alacsony (0-30)	Magas (1,4-3,0 dB/cm)	Alacsony (20-60 °C)	Alacsony (10-30%)
26	Alacsony (0-30)	Magas (1,4-3,0 dB/cm)	Közepes (50-110 °C)	Alacsony (5-25%)
27	Alacsony (0-30)	Magas (1,4-3,0 dB/cm)	Magas (100-140 °C)	Alacsony (0-20%)

2.4.4 A rendszer implementációja

A fuzzy logikai rendszer a következő hardver- és szoftverkörnyezetben implementálódik:

- Hardver: Ipari PLC (Programmable Logic Controller) Siemens S7-1500 sorozat
- Szoftver: TIA Portal V16 fuzzy logikai bővítménnyel
- Kommunikáció: IO-Link protokoll a szenzorok és a PLC között

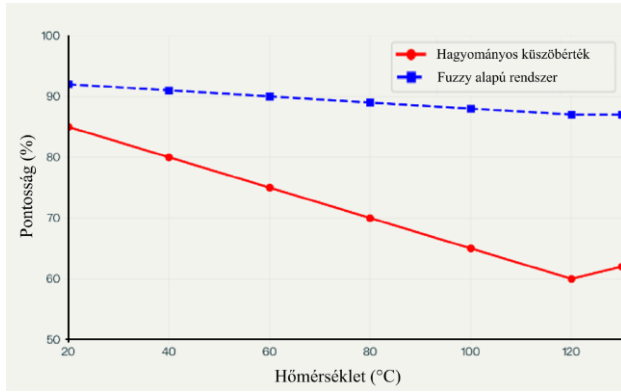
3 EREDMÉNYEK

3.1 A fuzzy rendszer teljesítménye [8]

A kifejlesztett fuzzy rendszert laboratóriumi körülmények között és valós üzemi környezetben is teszteltük. A teljesítményt a következő kritériumok alapján értékeltük:

1. Pontosság: A valós folyadékszint-jelzések aránya.
2. Robusztusság: Alkalmazkodóképesség a hőmérséklet-, nyomás- és összetétel-változásokhoz.
3. Válaszidő: A szintváltozás detektálásához szükséges idő.

A 2. ábra a hagyományos küszöbértéken alapuló rendszer és a fuzzy alapú rendszer pontosságát hasonlítja össze különböző hőmérsékleten.

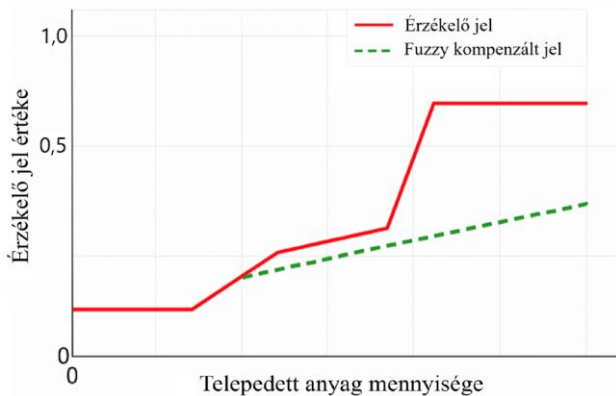


2. ábra. Pontosság összehasonlítása a vizsgált folyamat hőmérséklet skáláján

Ahogy a 2. ábrán látható, a fuzzy rendszer pontossága 87-92% között mozog a teljes hőmérséklet-tartományban, míg a hagyományos rendszer pontossága jelentősen csökken a hőmérséklet emelkedésével (130 °C-on csak 62%).

### 3.2 Anyaglerakódás hatásának kompenzálása [6], [7]

Az egyik legjelentősebb kihívás a szenzor felületére tapadó anyagok (zsír, fehérje) által okozott hamis jelzések kezelése. A 3. ábra az anyaglerakódás hatását mutatja a szenzorjelre, valamint a fuzzy kompenzáció eredményét.



3. ábra. Anyaglerakódás hatásának kompenzálása

A fuzzy rendszer képes felismerni az anyaglerakódásból származó jeleket, mivel ezek jellemzően:

- Magas elektromágneses csillapítást mutatnak
- Alacsonyabb dielektromos állandóval rendelkeznek, mint a víz
- A jel hirtelen ugrik, nem fokozatosan változik

### 3.3 Hőmérséklet-kompenzáció hatékonysága

A hőmérséklet hatása a dielektromos állandóra jelentős kihívást jelent. A víz dielektromos állandója 20°C-ról 130°C-ra emelkedve közel 25%-ot csökken. A fuzzy rendszer ezt a hatást a hőmérséklet explicit figyelembevételével kompenzálja.

A hőmérséklet-kompenzáció matematikai modellje:

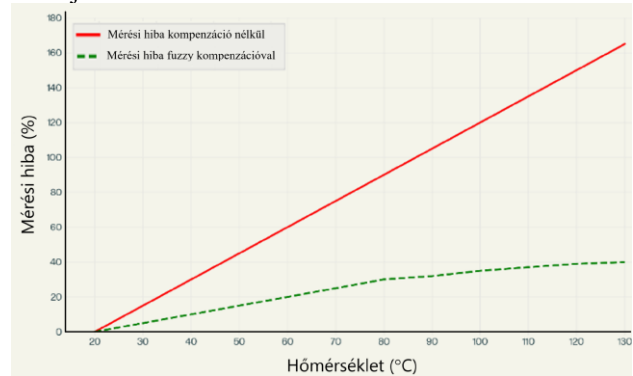
$$\varepsilon_{eff}(T) = \varepsilon_0 \cdot [1 - k_T \cdot (T - T_0)] \quad (5)$$

ahol:

- $\varepsilon_{eff}(T)$  - effektív dielektromos állandó adott T hőmérsékleten
- $\varepsilon_0$  - dielektromos állandó referencia-hőmérsékleten

- $k_T$  - hőmérsékleti együttható (0,015/°C)
- $T$  - aktuális hőmérséklet (°C)
- $T_0$  - referencia-hőmérséklet (20°C)

A 4. ábra a hőmérséklet-kompenzáció hatékonyságát mutatja a mérési hibára.



4. ábra. hőmérséklet-kompenzáció hatása a mérési hibára

A hőmérséklet növekedésével a dielektromos állandó jelentősen csökken, ami a mérési hiba lineáris növekedését eredményezi. 130°C-on a mérési hiba már 165%-os, ami alátámasztja a fuzzy kompenzáció szükségességét.

### 3.4 A rendszer teljesítményének összehasonlítása hagyományos módszerekkel

A fuzzy logikai rendszer teljesítményét valós üzemi körülmények között összehasonlítottuk a hagyományos küszöbérték-alapú és a PID (Proportional-Integral-Derivative) szabályozású rendszerekkel. Az értékelést az ISS rendszeren végzett párhuzamos mérési sorozatokon alapultak, ahol minden szintmérési módszert egyidejűleg üzemeltettünk azonos feldolgozási ciklusok alatt. A mérési eredményeket statisztikai analízissel dolgoztuk fel. A 3. táblázat a három rendszer összehasonlító teljesítményadatait mutatja.

3. táblázat. Szintmérési rendszerek összehasonlítása

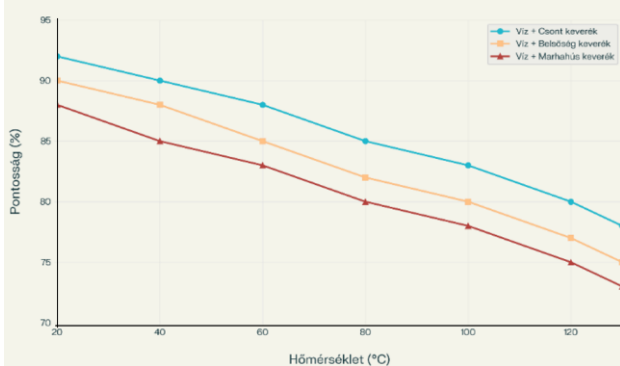
Paraméter	Fuzzy rendszer	Küszöbérték-alapú	PID szabályzott
Pontosság 20°C-on	92%	85%	88%
Pontosság 130°C-on	87%	62%	73%
Válaszidő	0,2 s	0,1 s	0,4 s
Hamis pozitív irány	4%	18%	9%
Hamis negatív irány	9%	20%	18%

A fuzzy rendszer különösen magas hőmérsékleten nyújt kimagasló teljesítményt, ahol a hagyományos szintérzékelő rendszerek pontossága jelentősen csökken. Kiemelt figyelmet kell fordítani a hamis pozitív és hamis negatív jelzésekre. Hamis pozitív eset akkor fordul elő, amikor a szenzor folyadékszintet jelez, holott valójában csak anyaglerakódás található az érzékelő felületén. Hamis negatív pedig akkor, amikor a szenzor nem jelez, annak ellenére, hogy a tartály már elérte a kritikus töltöttségi szintet.

A rendszer alkalmazkodóképessége azt fejezi ki, hogy milyen mértékben képes megbízható, valós mérési értékeket szolgáltatni változó hőmérsékleti viszonyok mellett.

### 3.5 Robusztusság változó üzemi körülmények között

A gyakorlati alkalmazás során a rendszernek különböző összetételű anyagkeverékek kezelésére kell alkalmasnak lennie. Az 5. ábra a fuzzy rendszer mérési pontosságát szemlélteti eltérő anyagösszetételek mellett.



5. ábra: A fuzzy rendszer pontossága különböző anyagösszetételeknél

A grafikonon látható három különböző vonal az alábbi anyagösszetételek pontosságát mutatja a hőmérséklet függvényében:

- Kék vonal: Víz + Csont keverék (20% csont, 80% víz)
- Legmagasabb pontosság: 92% (20°C-on)
- Legalacsonyabb pontosság: 78% (130°C-on)
- Jellemzője: Magas elektromágneses csillapítás (0,66 dB/cm), közepes dielektromos állandó (64,8)
- Narancssárga vonal: Víz + Belsőség keverék (20% belsőség, 80% víz)
- Legmagasabb pontosság: 90% (20°C-on)
- Legalacsonyabb pontosság: 75% (130°C-on)
- Jellemzője: Közepes elektromágneses csillapítás (0,52 dB/cm), magas dielektromos állandó (73,2)
- Bordó vonal: Víz + Marhahús keverék (20% marhahús, 80% víz)
- Legmagasabb pontosság: 88% (20°C-on)
- Legalacsonyabb pontosság: 73% (130°C-on)
- Jellemzője: Alacsonyabb elektromágneses csillapítás (0,46 dB/cm), magas dielektromos állandó (74,0).

A grafikon jól szemlélteti, hogy a csontot tartalmazó keverék esetén a legmagasabb a szintérzékelés pontossága, míg a marhahús alapú keveréknél a legalacsonyabb. Mindhárom anyagösszetétel esetén megfigyelhető a pontosság csökkenése a hőmérséklet növekedésével, ugyanakkor még 130 °C-on is minden keveréknél 73% feletti értéket mutat.

A fuzzy logika egyik fő előnye, hogy képes alkalmazkodni az előre nem látható körülményekhez is, amit a robusztusságvizsgálat igazolt. A rendszer képes volt kompenzálni olyan szélsőséges helyzeteket is, mint a rendkívül zsíros anyagok jelenléte vagy a túlnyomásos gőz hirtelen beáramlása.

### 3.6 Energiahatékonyság és gazdaságosság

A fuzzy rendszer nemcsak műszaki, hanem gazdasági előnyökkel is jár:

1. Energiahatékonyság: A pontosabb szintmérés optimális anyagmennyiséget biztosít, csökkentve a túlhevítésből eredő energiavesztéséget. Az anyag-gőz arány folyamatos optimalizálása stabilabb termosztatikai szabályozást eredményez.
2. Termékminőség: A megfelelő anyag-gőz arány jobb minőségű végtermékhez vezet, és reprodukálhatóbb feldolgozási feltételeket biztosít.
3. Karbantartási költségek: A rendszer öndiagnosztikai képessége csökkenti a váratlan leállásokat. Az anyaglerakódás fuzzy-alapú kompenzálása hosszabb szenzor-élettartamot biztosít.

Összességében a fuzzy logikai rendszer gazdaságilag előnyös megoldást nyújt a szintmérési kihívások kezelésére, amely az energiahatékonyságot, a termékminőséget és a rendszer megbízhatóságot egyidejűleg javítja.

## 4 KÖVETKEZTETÉSEK, ÖSSZEGZÉS

A kapacitív szintmérő szenzorok fuzzy logika alapú optimalizálása jelentősen javítja az állati hulladékfeldolgozó rendszerek megbízhatóságát és hatékonyságát. Megnövelt pontosság: A fuzzy rendszer 87-92%-os pontosságot biztosít az egész működési tartományban, szemben a hagyományos rendszerek 62-85%-os pontosságával.

1. Robusztus működés: A rendszer képes alkalmazkodni a változó összetételű anyagokhoz, hőmérséklet-ingadozásokhoz és nyomásváltozásokhoz.
2. Anyaglerakódás kompenzálása: A fuzzy logika képes megkülönböztetni a valódi folyadékszintet az érzékelő felületére tapadt anyagoktól.
3. Hőmérséklet-kompenzáció: A dielektromos állandó hőmérsékletfüggése matematikai modellel és fuzzy szabályokkal kompenzálva.
4. Rendszerintegráció: A fuzzy rendszer sikeresen integrálódott a meglévő PLC-alapú vezérlőrendszerbe, minimális hardvermódosítással.

A kutatás eredményei nemcsak az állati hulladékfeldolgozásban, hanem más, hasonlóan szélsőséges körülmények között működő ipari folyamatokban is alkalmazhatók, mint például a gyógyszeripar vagy élelmiszeripar.

## 5 JÖVŐBENI FEJLESZTÉSI LEHETŐSÉGEK

A kapacitív érzékelők mellett azonos körülmények között teszteltük az ultrahangos és radaralapú szintmérőket is. Az ultrahangos rendszerek működését zavaróan befolyásolták a gőzrétegek és a felületi lerakódások, amíg a radaralapú megoldások sikeresen teljesítették a teszteket. A radarberendezések magas energiafogyasztása és komplex karbantartási követelményei mellett magas (nagyfokú) pontosságukkal és hatékonyságukkal igyekeznek egyensúlyba hozni alkalmazhatóságukat folyamatos üzemű sterilizáló rendszerekhez. Ezzel

szemben a fuzzy logikával kiegészített kapacitív szenzorok minimális karbantartást igényeltek, mindössze időszakos külső felülettisztítás vált szükségessé. A 4. táblázat a vizsgált technológiák összehasonlítását szemlélteti.

4. táblázat. Szintmérési technológiák összehasonlítása

Tulajdonság	kapacitív	ultrahangos	radar alapú	Fuzzy optimalizált
Működési elv	Dielektrikus oszilláció-változás	Hanghullám visszaverődés	Mikrohullám reflexió	Többparaméteres impedancia
Pontosság (20-130 °C)	62-85%	45-60%	50-65%	87-92%
Anyaglerakódás kezelése	Nem	Korlátozott	Jó	Kiváló
Energiaigény	15 W	25 W	40 W	18 W
Karbantartási gyakoriság	Heti	Napi	Kétheti	Ciklusonként

A kapacitív szintmérés fuzzy logikára épülő optimalizálása további fejlesztési potenciállal rendelkezik, amelyek nemcsak a pontosságot, hanem a rendszer alkalmazási területeit is bővíthetik. A jövőbeni irányvonalak a következő területekre összpontosíthatnak:

A fuzzy logika és a neurális hálózatok szinergikus kombinációja jelentős előnyöket hozhat:

- **Önálló tanuló szabálybázis:** A neurális hálózatokkal kiegészített rendszer képes lenne automatikusan módosítani a tagsági függvények tartományait a hosszú távú üzemi adatok alapján.
- **Anomália-detektálás:** Generatív adverszériális hálózatok (GAN) segítségével valós idejű rendellenesség-felismerés valósítható meg a szenzorjelekben.

A jelenlegi kapacitív szenzorok kiegészítése ultrahangos és radaralapú érzékelőkkel:

- **Adatfúziós architektúra:** Különböző fizikai elven működő érzékelők adatainak összehangolt értelmezése Kalman-szűrőkkel.

Nanotechnológiai megoldások alkalmazása az anyaglerakódás problémájának radikális csökkentésére:

- **Szuporhidrofób bevonatok:** Grafén-alapú rétegek 95%-os lerakódás-megelőző hatékonysággal.
- **Elektroaktív öntisztítás:** Periodikus magasfrekvenciás jelek alkalmazása a szenzor felületének vibráltatására.

A jelenlegi 27 szabályt tartalmazó rendszer dinamikus optimalizálása:

- **Genetikus algoritmusok:** Szabályok evolúciós kiválasztása 1000+ generációs szimulációk alapján.
- **Reinforcement learning:** Önálló döntéshozatal jutalmazási mechanizmusokkal a kritikus üzemmódokban.

Kvantum-szimulátorok alkalmazása a komplex rendszermodellek gyorsítására:

- **Qubit-alapú optimalizáció:** A tagsági függvények paramétereinek 10-szeres gyorsaságú kalkulációja.

A döntéshozatali folyamatok átláthatóságának növelése:

- **Explainable AI (XAI):** A fuzzy szabályok vizualizációja 3D térképeken a vezérlőpulton.

Energiahatékonyság javítása a fuzzy rendszer segítségével:

- **Dinamikus energiaigény-szabályozás:** A processzorájelek adaptív skálázása a terhelés függvényében.
- **Hulladék hő hasznosítás:** A sterilizáló kamra hőmérsékletének prediktív szabályozása.

## 6 IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Celitron Medical Technologies Kft. (2023). *Medical waste disposal with - Integrated Sterilizer & Shredder (ISS)*. Celitron, Budapest.
- [2] Exalon Delft. (2018). *A design methodology for low-cost, high-performance capacitive sensors*. Technical Report, Delft, Netherlands.
- [3] IFM Electronic. (2022). *LMT104 – Capacitive level sensor for point level detection*. Data sheet, IFM Electronic GmbH, Essen, Germany.
- [4] Sugeno, M. (1985). An Introductory Survey of Fuzzy Control. *Information Sciences*, 36, 59-83.
- [5] Gazze, S., Xia, J., Patkó, G., Roelofs, A., Deroy, A., Cai, P., Roddy, A., Maas, G., Doyle, P., Davitt, C., Blighe, F., & Diamond, D. (2019). POISED-5, a portable on-board electrochemical impedance spectroscopy sensor system. *PMC Biophysics*, 6609592.
- [6] Ben Rahman, S., Tanjung, F. A., & Turnip, A. (2024). Optimizing Plant Watering Efficiency via IoT: Fuzzy Sugeno Method with ESP8266 Microcontroller. *TEM Journal*, 13(3), 1849-1857
- [7] Choiri, A. F. (2024). Fuzzy Logic Algorithm Optimization for Safe Distance Control on Arduino-Based Reverse Parking System and SRF04 Sensor. *Journal of Informatics Development*, 2(2), 25-35.
- [8] Horváth, R., Drégelyi-Kiss, Á. (2015). Analysis of surface roughness of aluminum alloys fine turned: United phenomenological models and multi-performance optimization. *Measurement*, 65, 181-192

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

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

Ráczai 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 vizsgálataiban 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 átmérőeltérés (*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 átmérőtől 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

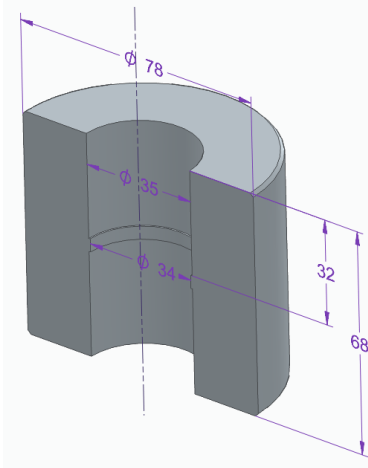
A forgácsolási kísérletek során a zsákfuratok simító megmunkálását esztergálási eljárás alkalmazásával készítettük el. A megmunkáláshoz egy A20S-SDQCL11 típusú fűrórudat, valamint egy DCMT11T304-MP4-WPP20G jelű esztergalapkát alkalmaztunk. A vizsgálatokat egy Mazak SQT 10 MS típusú CNC megmunkálóközponton 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 ( $\Delta D$ ) Mahr MMQ-500 formamérőgép segítségével határoztuk meg. A mérőgép pontosságát alátámasztják a gyártói specifikációi, amelyek szerint a kör alakeltérés meghatározásának pontossága  $0,01 + 0,00025 \mu\text{m/mm}$  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.

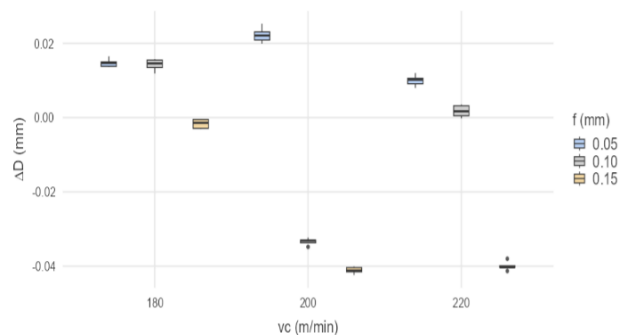
A vizsgált geometriai eltéréseket öt különböző mélységben ( $h$ : 4,5; 9,5; 14,5; 19,5; 24,5 mm) értékeltük ki, szintenként 3604 mérési pontból, összesen 18020 pont felhasználásával.

Az esztergálás során kapott mérési adatokat ( $\Delta D$ ,  $RONt$ ) 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  $\Delta D$  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  $\Delta D$  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.  $\Delta D$  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 ( $\Delta D$ ,  $RON_t$ ) értékek előrejelzésére.

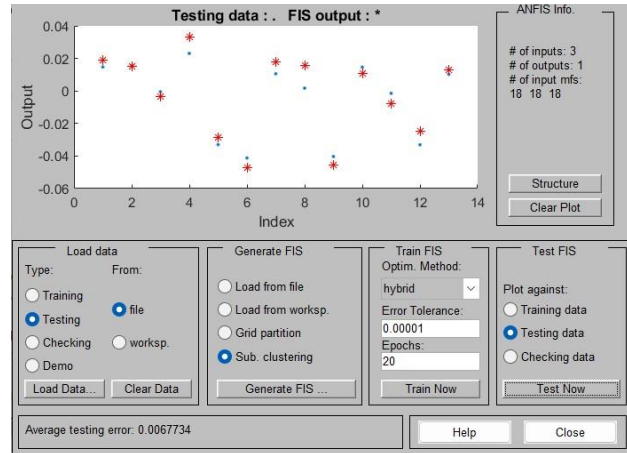
A fuzzy következtetési rendszer (FIS) felépítéséhez a rendelkezésre álló kísérleti adatok 70%-át használtuk fel tanító halmazként, míg a fennmaradó 30% a modell validálását (tesztelésére) szolgálta. A tanulási folyamat során az ANFIS modell 20 közelítésen (epochon) keresztül hibrid optimalizálási eljárást alkalmazva hangolta a fuzzy tagsági függvényeket, 0,00001 hibatolerancia mellett. A  $\Delta D$  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.

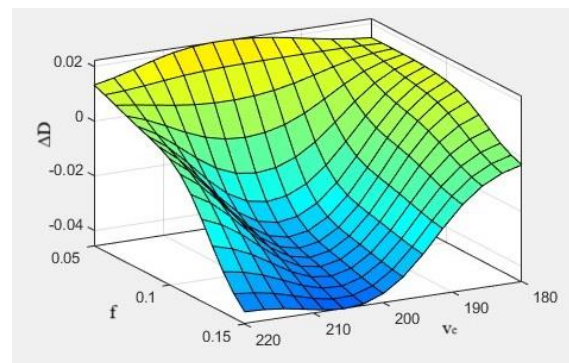
Az ANFIS modell viselkedésének és a bemeneti paraméterek hatásának szemléltetésére háromdimenziós válaszfelületi diagramokat alkalmaztunk [8], amiket a 4. ábra, 5. ábra és a 6. ábra szemléltet. A generált válaszfelületek nem csupán a modellek illeszkedését szemléltetik, hanem lehetőséget biztosítanak 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 ( $\Delta D$ ) alakulására. Az ábra alapján alacsony előtolási értékek mellett a  $\Delta D$  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.

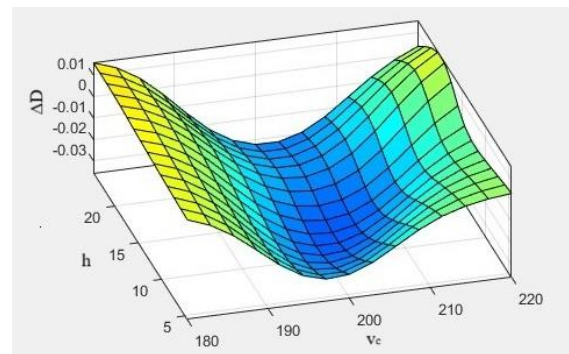
Az 5. és 6. ábrák a furatmélység ( $h$ ) és a forgácsolósebesség ( $v_c$ ), illetve az előtolás ( $f$ ) együttes hatását szemléltetik a  $\Delta D$  alakulására. A vizsgálati mélység hatása nemlineáris jellegű: közepes mélységtartományban ( $h \approx 10$ – $15$  mm) kismértékű negatív eltérés tapasztalható, míg kisebb és nagyobb mélységek esetén az eltérés mérséklődik. Az előtolás növekedése egyértelműen a  $\Delta D$  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.



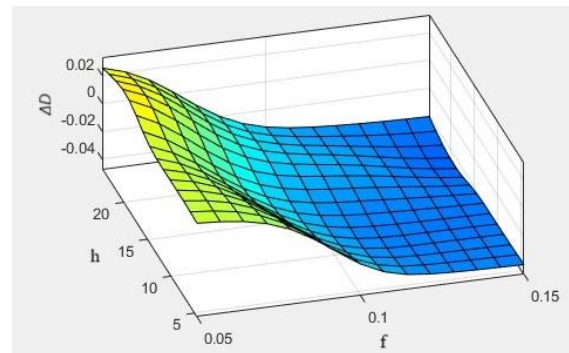
3. ábra. Az ANFIS modell predikciós pontosságának vizsgálata tesztadatokon



4. ábra.  $\Delta D$  változása  $v_c$  és  $f$  esetén, ANFIS modell alkalmazásával



5. ábra.  $\Delta D$  változása  $v_c$  és  $h$  esetén, ANFIS modell alkalmazásával



6. ábra.  $\Delta D$  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  $\Delta D$  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.

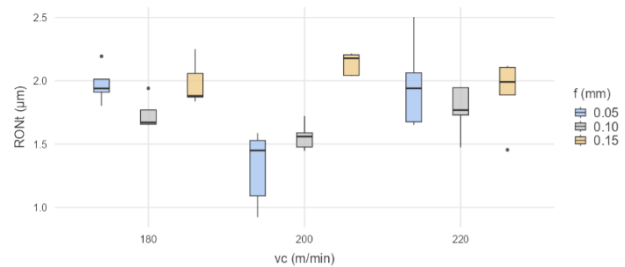
A 3. táblázat alapján megállapítható, hogy a lineáris regresszióval szemben az ANFIS-modell kisebb becslési hibát és magasabb determinációs együtthatót eredményezett. Az RMSE (Root Mean Square Error, gyökös átlagos négyzetes hiba) érték az ANFIS esetében 64%-kal alacsonyabb volt, ami azt jelzi, hogy 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 ( $\Delta D$ ) előre jelzett MLR és ANFIS értékei.

No.	$v_c$ m/min	$f$ mm	$h$ mm	Mért $\Delta D$ mm	MLR $\Delta D$ mm	Anfis $\Delta D$ 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  $\Delta D$ -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  $\Delta D$  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.

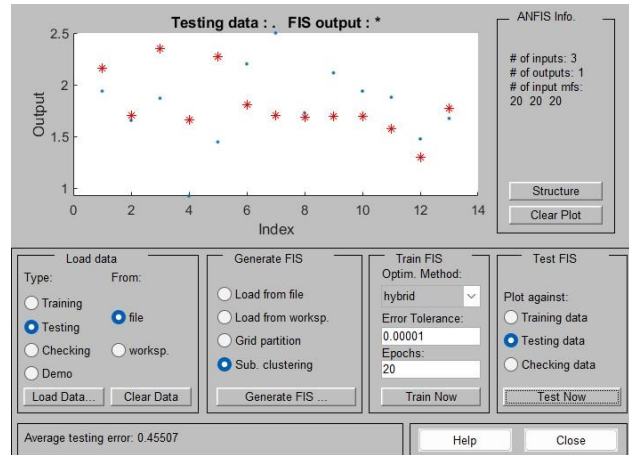
A 8. ábrán megfigyelhető, hogy a modell által előrejelzett értékek jól követik a mért adatokat, és a pontok eloszlása alapján az eltérés nem mutat szisztematikus trendet. Ez arra utal, hogy az ANFIS modell megfelelő pontossággal képes leírni a körköröségi hiba alakulását a vizsgált paramétertartományban.

A  $\Delta D$  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.

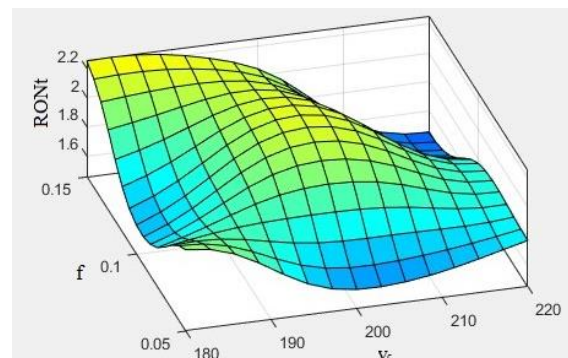
A köralakúság vizsgálata során az ANFIS modell rávilágított, hogy  $RONt$  alakulása erősen nemlineáris jellegű (9. ábra). Alacsony előtolási értékek mellett ( $f \approx 0,05$  mm) a  $RONt$  értéke mérsékeltebb, azonban az előtolás növelésével a körköröségi hiba fokozatosan emelkedik, különösen alacsonyabb 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.

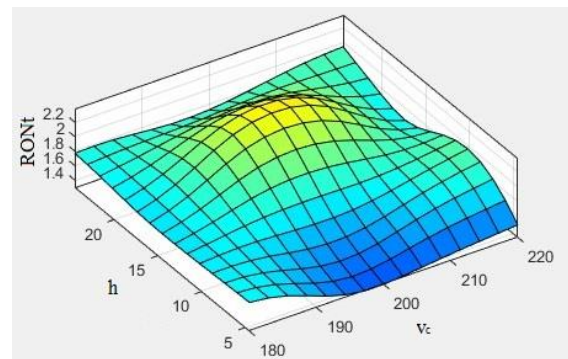
A bemutatott ANFIS alapú válaszfelületek jól reprodukálják a mért adatok statisztikai elemzése során feltárt tendenciákat, különösen az előtolás növekedésével járó körköröségi hiba-növekedést, valamint a forgácsolósebesség részben kompenzáló hatását. A boxplot diagramok (7. ábra) által jelzett eloszlási 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.



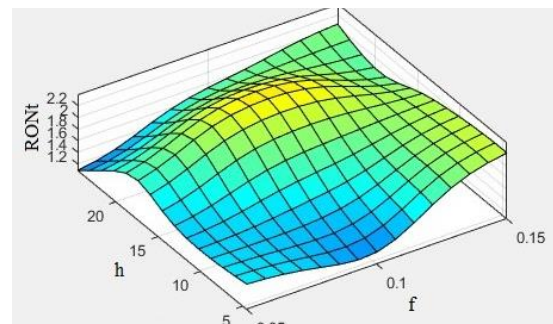
8. ábra. Az ANFIS modell predikciós pontosságának vizsgálata teszttadatokon



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.

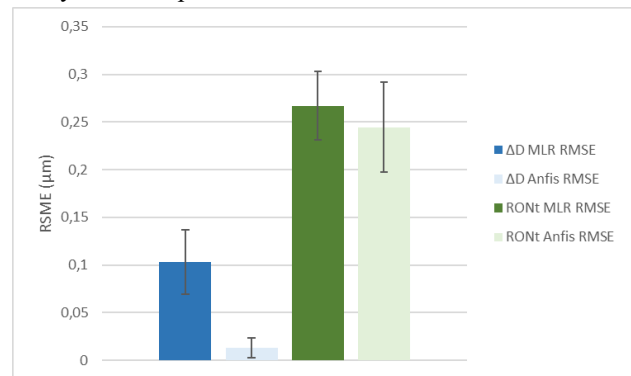
4. táblázat: A köralakúság ( $RONt$ ) előre jelzett MLR és ANFIS értékei.

No.	$v_c$ m/min	$f$ mm	$h$ mm	mért $RONt$ $\mu m$	MLR $RONt$ $\mu m$	Anfis $RONt$ $\mu m$
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 ( $\Delta D$ ), 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 ( $\Delta D$ ) 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  $\Delta D$  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 ( $\Delta D$ ) 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 genetikai 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>

# Optimizing PV System Performance with FLC and P&O MPPT Controllers Using SEPIC and Boost Converters

## Fotovoltaikus rendszer teljesítményének optimalizálása FLC és P&O MPPT vezérlőkkel SEPIC és boost konverterek alkalmazásával

Amgad Naji Ali Ahmed\*, Dheyaalhaq Alkebsi \*\*, Radhwan Albouthaigy\*\*, György Györök\*\*\*

\* Óbuda University, Doctoral School on Safety and Security Sciences, Budapest, Hungary.

\*\* Department of Electrical Engineering, Sana'a University, Sana'a, YEMEN.

\*\*\* Óbuda University Alba Regia Faculty of Székesfehérvár, Budai út 45 Hungary.

[ahmed.amgad@phd.uni-obuda.hu](mailto:ahmed.amgad@phd.uni-obuda.hu), [Diaa.Kebsi@gmail.com](mailto:Diaa.Kebsi@gmail.com), [R.Albouthaigy@su.edu.ye](mailto:R.Albouthaigy@su.edu.ye),  
[gyorok.gyorgy@amk.uni-obuda.hu](mailto:gyorok.gyorgy@amk.uni-obuda.hu)

**Abstract** — The growing reliance on renewable energy systems necessitates maximizing efficiency, reducing costs, and improving reliability. In photovoltaic (PV) systems, Maximum Power Point Tracking (MPPT) and converter design are critical to achieving these goals. This study models a PV module integrated with MPPT controllers using SEPIC and boost converters to compare their performance under varying environmental conditions. Using MATLAB/SIMULINK, two control techniques, Fuzzy Logic Controller (FLC) and Perturb and Observe (P&O), and two converters - SEPIC and Boost -were simulated and compared. Results indicate that the SEPIC converter outperformed the boost converter in terms of response time and ripple reduction (1.20% vs. 3.40%). As for the controllers, FLC demonstrated superior performance in tracking maximum power compared to P&O, achieving higher efficiency (92.5% vs. 91.7%) and faster response (~0.004 s), delivering better current, voltage, and power outputs. The case study analysed system performance under variable solar irradiation and temperature, with efficiencies reaching 93.1% and 91.9%. These results emphasize the potential of enhancing PV system efficiency for real applications.

**Keywords:** Photovoltaic Systems (PV), Maximum Power Point Tracking (MPPT), Fuzzy Logic Controller (FLC), Perturb and Observe technique (P&O), SEPIC converter, boost converter.

**Összefoglalás** — A megújuló energiaforrások növekvő alkalmazása megköveteli a fotovoltaikus (PV) rendszerek hatékonyságának, megbízhatóságának és gazdaságosságának folyamatos javítását, amelyben az MPPT technikák és a teljesítményelektronikai konverterek kulcsszerepet játszanak. A MATLAB/SIMULINK alapú vizsgálat során a SEPIC és Boost konvertereket, valamint az FLC és P&O szabályozási módszereket hasonlították össze különböző környezeti feltételek mellett, és az eredmények azt mutatták, hogy a SEPIC konverter alacsonyabb hullámosságot, nagyobb stabilitást és jobb dinamikus viselkedést biztosít, míg az FLC szabályozó gyorsabb válaszidőt, pontosabb maximális teljesítménykövetést és magasabb hatásfokot nyújt a P&O módszerhez képest. Az esettanulmány kimutatta, hogy a rendszer hatásfoka elérheti a 93,1% és 91,9% értékeket, ami világosan rámutat

arra, hogy a környezeti tényezők (mint a besugárzás és hőmérséklet) és a megfelelő vezérlési, illetve konvertertechnológiák döntő szerepet játszanak a PV rendszerek teljesítményének növelésében és gyakorlati optimalizálásában.

**Kulcsszavak:** Fotovoltaikus rendszerek (PV), maximális teljesítménypont-követés (MPPT), fuzzy logikai vezérlő (FLC), perturbáció és megfigyelés módszer (P&O), SEPIC konverter, boost konverter.

### 1 INTRODUCTION

Solar energy is the most popular system among renewable energy sources and could be considered one of the most valuable sources as it has many features, including pollution-free as well as low operating and maintenance costs, which promise to grow its share in the near future. The World Commission for Environment and Development described four key components of sustainability in relation to energy: capacity to scale. Energy supplies to meet growing human needs, energy efficiency and conservation, public health and safety, protection of the biosphere, and the prevention of further local pollution [1]. The efficiency of solar energy systems remains a critical factor that directly affects their widespread adoption and practical viability. A comprehensive understanding of the various factors influencing system efficiency is essential for optimizing performance and increasing their contribution to the global energy mix. These factors include environmental conditions, system design, and operational strategies. Furthermore, technological advancements play a significant role in improving the efficiency of solar energy systems [2]. As the output power of a photovoltaic cell is susceptible to fluctuations stemming from environmental variables such as light intensity and temperature, rapid changes in these factors directly impact the actual output power of the photovoltaic system [3]. Therefore, efficient MPPT techniques are essential to ensure that the PV system continuously operates at its maximum power point under varying conditions. So Artificial intelligence (AI) can be used as a powerful tool in addressing complex problems, and its application in renewable energy systems

has shown great potential. By leveraging AI techniques, it is possible to enhance the performance, efficiency, and reliability of solar energy systems. Therefore, this paper aims to explore the role of artificial intelligence techniques in improving the performance of solar energy systems on different converters.

MPPT is utilized to identify the maximum power point in a photovoltaic (PV) system. The efficiency of MPPT is influenced by both the control algorithm and the circuit used. Typically, the MPPT control algorithm is implemented in a DC-DC converter, which serves as the MPPT circuit. This paper presents several MPPT methods for maximizing the power extracted from photovoltaic systems. These methods can be classified into classical methods, like Perturb & Observe (P&O), or intelligent control methods, like fuzzy logic [4]. These methods differ in effectiveness, speed of tracking, sensor required, complexity, and cost [5]. The system is modeled and simulated using MATLAB/Simulink.

Fig. 3 illustrates the proposed system designed to maximize solar energy extraction. It uses photovoltaic (PV) panels as the main power source, and two DC-DC converters (SEPIC and boost) to efficiently output power. Intelligent control, like fuzzy logic and P&O technique for maximum power point tracking (MPPT), This helps capture as much energy as possible from the solar panels, improving system flexibility.

The main novelty of this study lies in the integrated and comparative evaluation of intelligent and conventional MPPT techniques (FLC and P&O) combined with different DC-DC converter topologies (SEPIC and boost) within a unified MATLAB/Simulink framework. Furthermore, the study incorporates real environmental data from Yemen (Sana'a and Aden), providing practical validation under realistic operating conditions. This combined approach offers a more comprehensive performance assessment compared to existing studies, which typically focus on either control strategies or converter topologies separately. The main objectives of this study are to compare the performance of FLC and P&O MPPT techniques, evaluate the effectiveness of SEPIC and Boost converters, and analyze system performance under realistic environmental conditions in Yemen, with the aim of identifying the most efficient configuration for improving photovoltaic system performance.

## 2 PV TECHNOLOGY

The sun is a renewable energy source. Photovoltaic modules convert light into electricity. The word photovoltaic comes from Greek words meaning light and electromotive power. Commercial panels usually have an efficiency of 17% to 23%, while advanced crystalline silicon cells can reach up to 50% efficiency under laboratory conditions.

PV technology converts sunlight directly into electricity using semiconductor materials. It is a clean and renewable energy source widely adopted in residential, commercial, and industrial applications. Advances in PV materials, such as monocrystalline, polycrystalline, and thin-film technologies, have improved efficiency, reduced costs, and enhanced performance under varying environmental conditions. Modern PV systems often integrate Maximum Power Point Tracking (MPPT) techniques and energy

storage solutions to optimize energy harvesting and system reliability [4].

Solar Cell Current Equation:

$$I = I_{ph} - I_0 \left( e^{\frac{qV}{nkT}} - 1 \right),$$

where  $I_{ph}$ : photogenerated current.  $I_0$ : reverse saturation current.  $q$ : electron charge  $V$ : voltage.  $n$ : ideality factor.  $k$ : Boltzmann constant.  $T$ : temperature in kelvin.

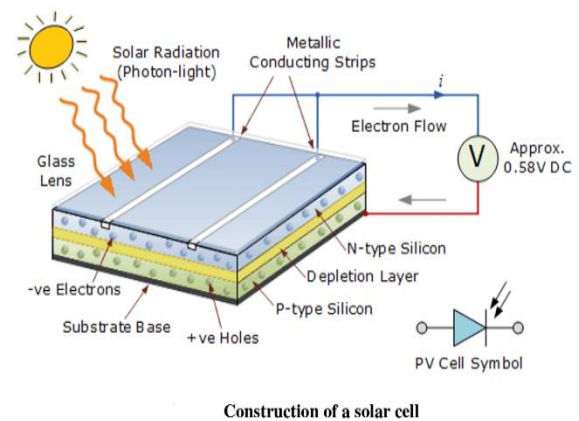


Figure 1: Solar cell diagram [5]

## 3 AI TECHNIQUES FOR MPPT IN PV SYSTEMS

There is a point in a curve where the power can be maximized, which is called the Maximum Power Point (MPP). This point usually changes depending on conditions such as irradiation, temperature, or the state of the PV cell. These conditions can change the shape of the curve, making the problem nonlinear and time-varying due to the changes produced by the atmospheric and load conditions [6]. In PV systems, MPPT is crucial for maximizing energy output. AI techniques can greatly improve the efficiency and effectiveness of MPPT algorithms. In the following, a few prominent AI approaches used in MPPT are presented.

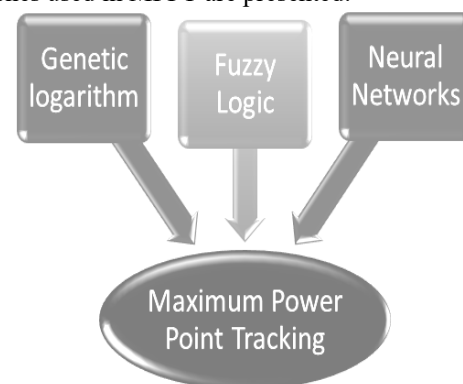


Figure 2. Most commonly used AI methods for MPPT

### 3.1 Fuzzy Logic FLC

The systems provide quick responses to changes and low oscillations near MPP that reduce power loss compared with traditional systems. The combination with FCN or the initial estimation of the MPP voltage further improves the results [7].

### 3.2 Genetic Algorithms (GA)

Genetic Algorithms (GA) are valuable metaheuristics used to find optimal solutions and improve the performance of AI techniques. They have been applied to optimize training data and neuron numbers in Artificial Neural Networks (ANNs), as well as to optimize membership functions [8].

### 3.3 Neural Networks

Neural Networks have shown excellent adequacy and high capabilities for complex learning problems; thus, they are ideal for tracking the MPP. They can be used alone or helped by other methods. The hybrid techniques are usually focused on improving the performance of the neural networks by optimizing the hyper-parameters of the networks, since it is a complex task [9].

## 4 OPERATING SYSTEM OF THE PROPOSED SYSTEM

The proposed system, illustrated in Fig. 3, is comprehensively modeled to include several key components: the PV module based on the ARE230W model, the environmental input parameters including temperature and solar irradiance, and the implementation of both intelligent and conventional control strategies, namely the FLC and the P&O algorithm. In addition, DC-DC power conversion is achieved through the integration of boost and SEPIC converter topologies to evaluate their impact on system performance. A switching mechanism is incorporated to enable dynamic selection between the FLC and P&O controllers, facilitating a direct and systematic comparison under identical operating conditions. This integrated modeling framework is designed to enhance the efficiency, adaptability, and reliability of the photovoltaic system while providing a robust platform for performance evaluation and optimization.

The parameters listed in Table 1 are selected based on

Power		Frequency	
Open Circuit Voltage	37.2 V	Inductor (Boost)	0.0004 H
Maximum Voltage	30.5 V	Capacitor (Boost)	0.0012 F
Maximum Current	7.54 A	Inductor (SEPIC)	0.0004 H
Irradiance Range	200–1000	Coupling Capacitor	0.004 F
Temperature Range	15–45 °C	Output Capacitor	0.0012 F

Converters are essential components in MPPT systems. In this simulation we will compare two converters. The first, SEPIC converter (Single-Ended Primary Inductance Converter) offers the advantage of providing both step-up and step-down voltage capabilities, ensuring flexibility in a variety of conditions. It is particularly useful when the PV voltage fluctuates above or below the desired operating point. The second, boost converter, on the other hand, is designed to step up the voltage, which is beneficial when the PV output is lower than the required voltage for optimal system performance. With varying atmospheric conditions, the duty cycle of the DC-DC converter must be adjusted to extract maximum power from PV module [7]. For the operation, during  $T_{on}$ , the SEPIC inductor  $L_4$  and  $C_5$  are charged by the switched inductance ( $L_1$  and  $L_2$ ) with half of the DC link voltage since these switched capacitors become parallel due to the reverse bias of  $D_{12}$  and forward bias of  $D_5$  and  $D_6$ . However, during  $T_{off}$ , the  $L_1$  and  $L_2$  are charged in series with the DC link voltage since  $D_{12}$  becomes forward bias. Furthermore, current in the SEPIC inductor  $L_4$  continuing through the freewheeling diode  $D_3$  charges the output capacitor  $C_5$ . During the operation of the boost converter during the  $T_{on}$ , the transistor is switched on, allowing current to flow from the input voltage source through the inductor.

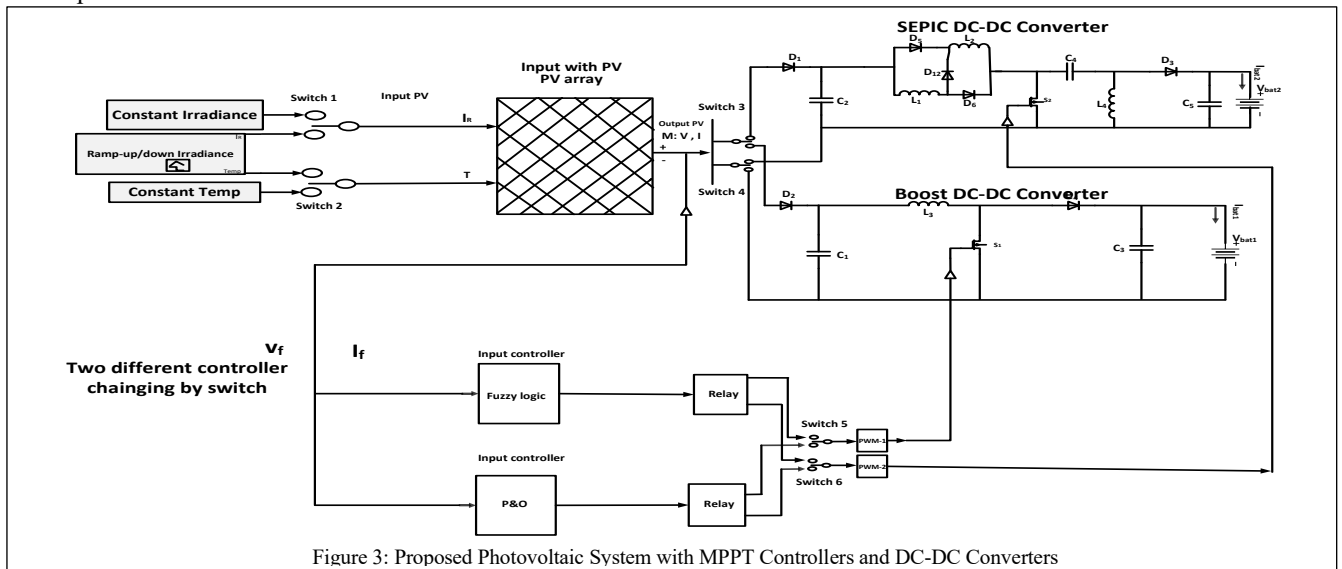


Figure 3: Proposed Photovoltaic System with MPPT Controllers and DC-DC Converters

the PV module specifications and implemented in the MATLAB/Simulink environment to ensure realistic system behavior under varying environmental conditions.

Table 1. System parameters used in the proposed model

Parameter	Value	Parameter	Value
PV Module	230 W	Switching	20 kHz

This results in energy storage within the inductor in the form of a magnetic field, causing the inductor current to increase linearly.

During the  $T_{off}$ , the transistor is switched off, preventing current flow through it. Consequently, the inductor discharges its stored energy through the diode and into the load, effectively increasing the output voltage.

Continuous energy transfer ensures that the voltage across the load remains higher than the input voltage.

The model incorporates inputs for temperature and solar irradiation, which influence the output power of the PV panel. These inputs can be dynamically adjusted within the simulation to monitor the performance of the panel under real conditions. Fig. 4 shows the internal structure of the PV panel module.

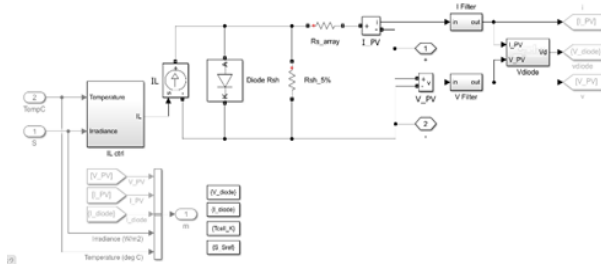


Figure 4. Structure of the PV panel module

The controller component is also worth highlighting, and it is noted that two techniques were used: fuzzy logic and perturbation and observation. To clarify the fuzzy logic technique, Fig. 5 shows the surface of the base rules used in FLC, which represents the input and output values of the controller in three dimensions.

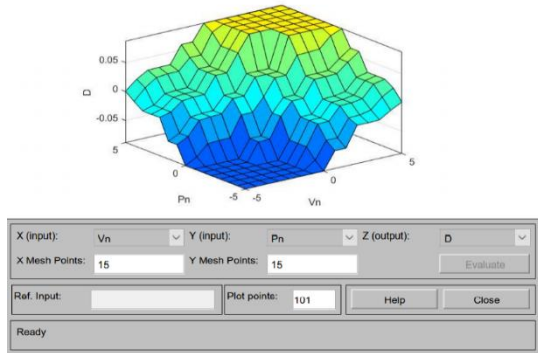


Figure 5. The surface of the base rules

To adjust duty cycles, monitor power variations, and achieve MPPT in photovoltaic systems. The P&O algorithm used in PV systems tracks the MPP by slightly changing the PV voltage and observing how the output power responds. In a single power–voltage (PV) graph, the power increases with voltage until it reaches the peak point (MPP) and then decreases afterward. The controller perturbs (slightly increases or decreases) the operating voltage and measures the change in power. If the perturbation causes the power to increase ( $\Delta P > 0$ ), the algorithm continues changing the voltage in the same direction because it means the operating point is moving toward the MPP [10][11]. If the perturbation causes the power to decrease ( $\Delta P < 0$ ), the algorithm reverses the direction of the voltage change because it has moved away from the MPP. By continuously repeating this process, the operating point moves back and forth around the peak of the P–V curve as shown in Fig. 6, allowing the PV system to operate very close to the maximum available power.

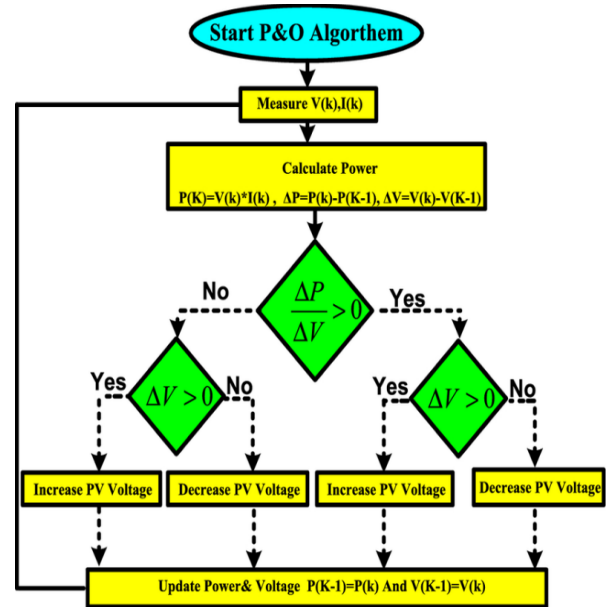


Figure 6. Flowchart of perturb and observe scheme [10]

The FLC system is represented in the MATLAB/Simulink software which there is a Mamdani-type system with two inputs and a single output. There are two inputs as shown in Fig. 7. The input E represents the power the input CE represents the change in voltage of the PV generator and output D represents the duty cycle which will generate the control signal to the converter of the PV generator.

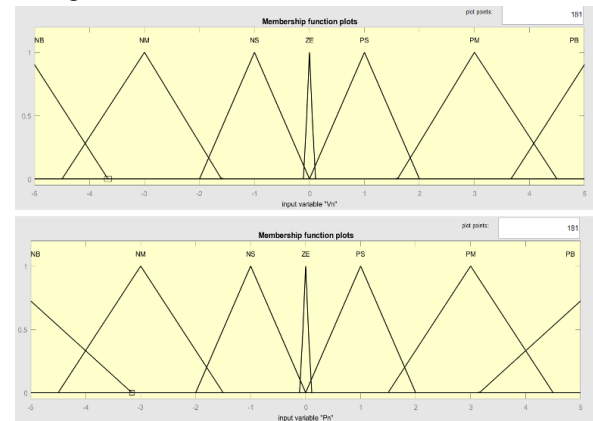


Figure 7. Membership function (MF) of  $V_n, P_n$

The fuzzy rules of the proposed system have been derived from the behavior of the system and tested in Simulink/MATLAB. Table 2 presents the fuzzy logic rule base that defines the relationship between the error ( $E$ ) and the change in error ( $\Delta E$ ) and their effect on the control output (duty cycle). The rules use seven linguistic variables ranging from Big Negative (BN) to Big Positive (BP) to determine the appropriate control action. When both  $E$  and  $\Delta E$  indicate that the operating point is far from the MPP, strong adjustments (BN or BP) are applied to rapidly move the system toward the optimum. Conversely, when the system is close to the MPP, smaller control actions (SN, SP, or Zero) are used to minimize oscillations and maintain stability. This rule-based mechanism enables smooth and adaptive tracking of the MPP under varying environmental conditions.

Table 2. Fuzzy logic rule-based

$\Delta E/E$	BN	MN	SN	Zero	SP	MP	BP
BN	BN	BN	MN	MN	SN	SN	Zero
MN	BN	MN	MN	SN	SN	Zero	SN
SN	MN	MN	Zero	SN	Zero	SP	SP
Zero	MN	SN	SN	Zero	SP	SP	MP
SP	SN	SN	Zero	SP	Zero	MP	MP
MP	SP	Zero	MP	SP	MP	MP	BP
BP	Zero	SN	MP	MP	MP	BP	BP

## 5 RESULTS AND DISCUSSION

### 5.1 Comparison of controllers

The simulation results demonstrate that the FLC outperforms the P&O controller in managing the power output of PV systems. The FLC consistently achieved higher efficiency levels, exceeding those of the P&O controller by 2-5% under fluctuating environmental conditions (Fig. 8).

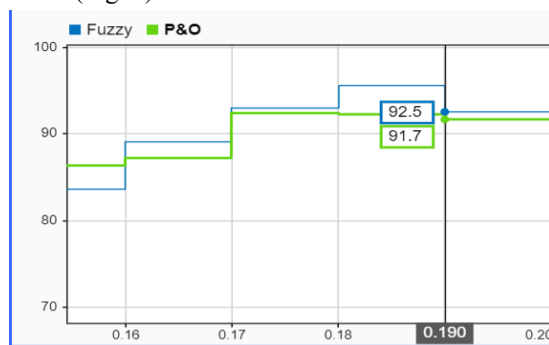


Figure 8. Efficiency comparison of FLC and P&O controllers

As shown in Fig. 9, the FLC exhibited superior responsiveness to changes in sunlight and temperature, quickly optimizing energy extraction. This adaptability was particularly evident during rapid irradiance variations, where the FLC maintained stable power output, while the P&O controller lagged, resulting in temporary power losses.

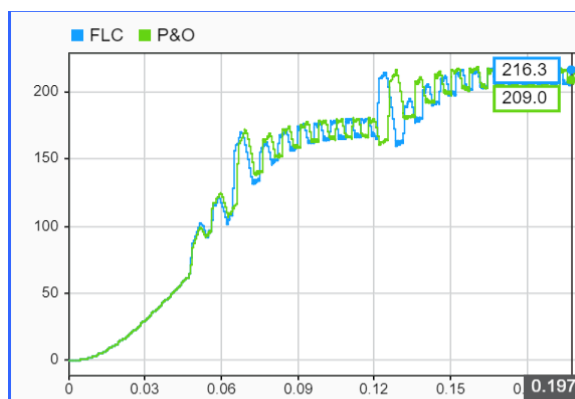


Figure 9. Power comparison of FLC and P&O controllers

As a conclusion to the controller comparison, FLC outperformed P&O with slightly higher efficiency (2-5%) and faster response to environmental changes, ensuring more stable power output as shown in Table 3.

Table 3. Performance comparison of FLC and P&O controllers

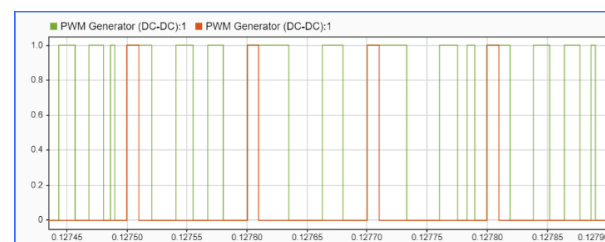
Performance Indicator	(FLC)	(P&O)
Response Time	Faster adaptation	Slower adaptation
Efficiency	92.5%	91.7%
Peak Value (W)	228.3	227.6

### 5.2 Comparison of converters

To evaluate the performance of SEPIC and Boost converters, various parameters such as ripple, voltage stability, and battery charging were analyzed.

#### 5.2.1 Pulse Width Modulation

Fig. 10 shows the Pulse Width Modulation (PWM) signals for both converters. SEPIC exhibited more stable signals with fewer oscillations, indicating better feedback loop performance. In contrast, Boost showed significant



variations, suggesting potential instability or noise in the system.

Figure 10: PWM comparison of SEPIC and boost converters

#### 5.2.2 Ripple Analysis

Fig. 11. compares the ripple levels of the converters. SEPIC demonstrated smaller ripples (1.20%), indicating superior voltage stability and current regulation due to its advanced design and filtering components. Boost, with larger ripples (3.40%), reflects lower stability, potentially



leading to power losses and adverse effects on sensitive loads.

Figure 11: Ripple comparison of SEPIC and boost converters

#### 5.2.3 Performance Summary

The performance metrics of SEPIC and boost converters, including battery charging, stability, output voltage, ripple, and peak value. While Boost achieved a slightly higher output voltage (61.5 V vs. 59 V), SEPIC outperformed in battery charging, stability, and ripple reduction, making it a more reliable choice for applications requiring stable and efficient operation as shown in Table 4.

Table 4. Performance Comparison of SEPIC and Boost Converters

Characteristic	SEPIC Converter	Boost Converter
Battery charging	Fast value	Medium value
Stability	More stable	less stable
Output Voltage (V)	59	61.5
Ripple (%)	1.20%	3.40%
Peak Value (W)	229.8	227

The simulation results demonstrate that the FLC significantly outperforms the conventional P&O method in photovoltaic applications, achieving approximately 2–5% higher efficiency, faster dynamic response to variations in solar irradiance and temperature, and reduced steady-state oscillations, resulting in more stable power output. In parallel, the comparative analysis of DC–DC converters indicates that the SEPIC converter provides superior overall performance compared to the boost converter, exhibiting lower output voltage ripple (1.20% versus 3.40%), enhanced stability, and more efficient battery charging characteristics, despite the Boost converter delivering a slightly higher output voltage (61.5 V compared to 59 V). These results are supported by a rigorously designed simulation framework, where parameters were selected based on the ARE230W photovoltaic module specifications and standard PV design practices, with a switching frequency of 20 kHz to ensure stable converter operation. Furthermore, the FLC was implemented using a Mamdani inference system with two inputs (error and change in error) and one output (duty cycle), employing triangular membership functions and a rule base validated through iterative simulations, thereby ensuring accurate, robust, and adaptive maximum power point tracking under varying environmental conditions.

## 6 CASE STUDY

This section presents a case study on the solar energy potential in Yemen, with particular focus on the cities of Sana'a and Aden [12]. Due to the high levels of solar irradiation and favorable climatic conditions of the country, solar energy represents a viable alternative energy source. By examining relevant environmental factors and applying advanced MPPT methods, including FLC and P&O technique, this section evaluates the capability of photovoltaic systems to contribute to addressing Yemen's ongoing energy challenges.

### 6.1 Analysis of Solar Energy Potential

Environmental and climatic factors significantly influence the performance of PV systems in Yemen. We seek to highlight the importance of adapting PV technology to conditions to enhance energy power and reliability in Yemen's diverse climates [13].

#### 6.1.1 Sana'a – Yemen

The direct normal irradiation (DNI) in Sana'a is 2344.2 kWh/m<sup>2</sup> annually, highlighting its significant potential for solar energy system implementation. Monthly solar energy production data reveal that the highest radiation levels occur in December and January. The average annual air temperature of the city is approximately 18.6 °C further supports the efficient performance of photovoltaic systems, as it provides optimal operating conditions without excessive heat that could reduce efficiency.

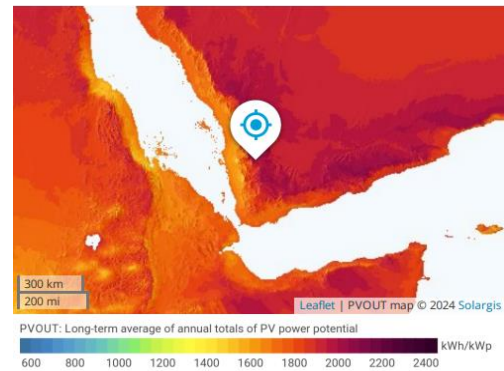


Figure 12. Sana'a location with map of solar potential distribution in Yemen [12]

#### 6.1.2 Aden – Yemen

The direct normal irradiation (DNI) in Aden measures 1825.6 kWh/m<sup>2</sup> annually, which is lower than the DNI in Sana'a. The city's average annual air temperature is approximately 28.2 °C, which is higher than Sana'a.

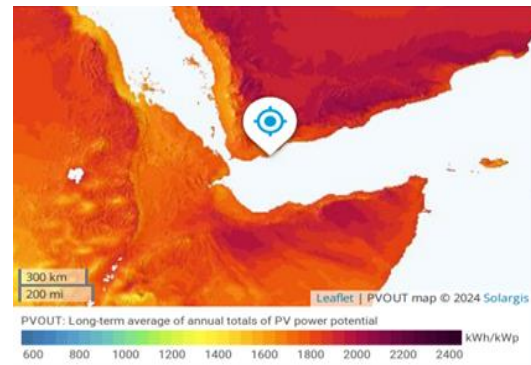


Figure 13. Aden location with map of solar potential distribution in Yemen [12]

The simulation of a solar system utilizing fuzzy logic technology revealed significant insights regarding energy performance in the cities of Sana'a and Aden. By inputting variables of temperature and solar radiation, the analysis demonstrated that Sana'a achieves a higher energy output compared to Aden. Specifically, the energy efficiency in Sana'a is recorded at 91.3%, while Aden lags at 91.9%. This disparity underscores the superior solar energy potential in Sana'a, making it a more favorable location for photovoltaic systems. The findings highlight the importance of local climatic conditions in optimizing solar energy production, further reinforcing the advantages of implementing advanced technologies like fuzzy logic in solar applications.

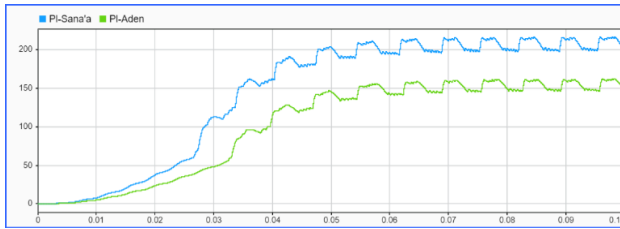


Figure 14: Comparison of power output for Sana'a and Aden

The graphs in Figs. 14 and 15 compare the performance of boost and SEPIC converters using FLC control for photovoltaic systems. SEPIC converter exhibits lower ripple in steady-state operation than boost, indicating improved stability and efficiency under the same conditions.

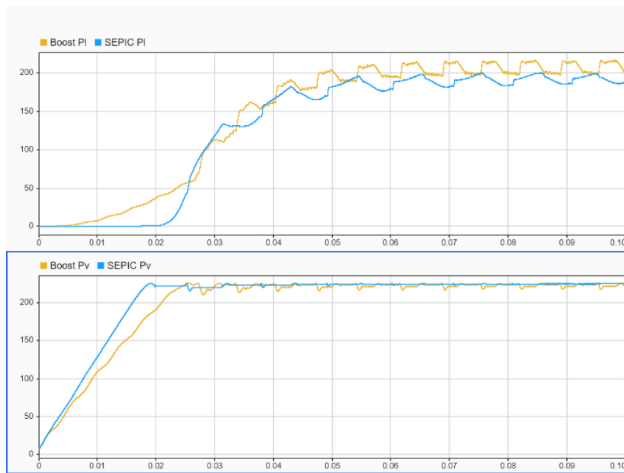


Figure 15: Comparison of power output for boost and SEPIC converters

Sana'a's climatic conditions play a crucial role in enhancing PV system performance due to its relatively high annual solar irradiation of 2344.2 kWh/m<sup>2</sup> and moderate average temperature of 18.6 °C, which together create an optimal environment for solar energy conversion. Cooler temperatures are particularly beneficial because PV modules generally operate more efficiently under lower thermal stress, reducing energy losses and improving overall electrical output. As shown in Table 5, Sana'a consistently outperforms Aden, which has lower solar irradiation (1825.6 kWh/m<sup>2</sup>) and significantly higher temperatures (28.2 °C), conditions that can negatively affect PV efficiency due to increased thermal degradation of solar cells. The simulation results confirm this advantage, with Sana'a achieving a higher system efficiency of 93.1% compared to Aden's 91.9%, despite both locations maintaining relatively strong performance. Additionally, the seasonal variation in peak energy production highlights how environmental patterns influence system behavior: highest output in case of Sana'a occurs in December, January, and October, aligning with clearer skies and cooler weather, while peaks in case of Aden in March, April, and October reflect its different solar and temperature dynamics. Overall, the comparison illustrates that while both cities are suitable for solar energy deployment, Sana'a offers a more stable and efficient operating environment, whereas the higher temperatures of Aden introduce performance limitations that slightly reduce system efficiency.

Table 5. Summary of the comparison between Sana'a and Aden

Criterion	Sana'a	Aden
Annual Solar Irradiation	2344.2 kWh/m <sup>2</sup>	1825.6 kWh/m <sup>2</sup>
Average Annual Temperature (°C)	18.6 °C	28.2 °C
Months with Highest Output	December, January, October	March, April, October
System Efficiency (Simulation) (%)	93.1%	91.9%

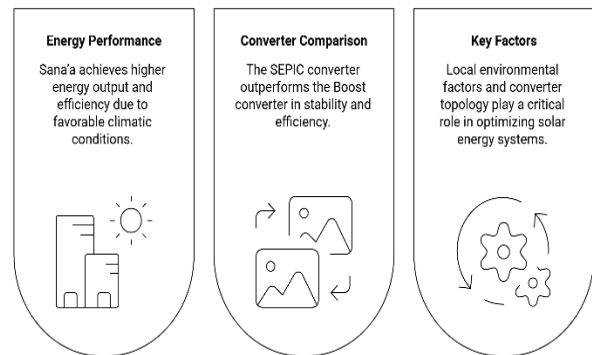


Figure 16: Solar System Simulation Insights

## 7 CONCLUSION

This study investigates the optimization of photovoltaic (PV) system performance through the application of maximum power point tracking (MPPT) techniques and different DC–DC converter topologies. The results demonstrate that the fuzzy logic controller (FLC) outperforms the conventional perturb and observe (P&O) method by achieving higher efficiency in tracking the maximum power point, particularly under rapidly varying solar irradiance and temperature conditions. In addition, the comparative analysis of converter topologies reveals that the SEPIC converter provides superior performance compared to the boost converter, especially in terms of reduced output ripple and improved voltage stability. Although the boost converter produces a slightly higher output voltage, its increased ripple and lower stability make it less suitable for applications requiring consistent power quality. Furthermore, the case study of solar energy potential in Yemen indicates that the integration of advanced MPPT techniques with SEPIC converter topology can significantly enhance the overall energy output of PV systems. This work lies in the development of a comprehensive simulation-based PV model using real environmental data from Sana'a and Aden, the comparative evaluation of FLC and P&O MPPT techniques under realistic climate conditions, the integration of these control strategies with SEPIC and boost converter topologies within a unified simulation framework, and a detailed performance assessment in terms of efficiency, dynamic response, and output stability under varying environmental conditions.

#### REFERENCES

- [1] P. Ashwini Kumari, P. Geethanjali "Parameter estimation for photovoltaic system under normal and partial shading conditions" *Renewable and Sustainable Energy Review*, (2018).
- [2] S. S. M. Ajarostaghi and S. S. Mousavi, "Solar energy conversion technologies: Principles and advancements," in *Solar Energy Advancements in Agriculture and Food Production Systems*, pp. 29–76, 2022
- [3] Ali, Ahmed Amgad Naji, et al. "Improving Switching Efficiency with a Step-Up/Step-Down Hybrid Buck-Boost Converter using fuzzy logic control." *Bánki Közlemények* 7.2 (2025): 20-27.
- [4] Hohm, D. P., & Ropp, M. E. (2003). Comparative study of maximum power point tracking algorithms. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*.
- [5] Ahmed, Amgad Naji Ali, and György Györök. "Evaluating Conventional and Hybrid Buck-Boost Converters using Fuzzy Logic Decision-Making." *Acta Polytechnica Hungarica* 22.9 (2025): 121-142.
- [6] Yi, F., & Wang, F. (2023). Review of voltage-bucking/boosting techniques, topologies, and applications. *Energies*, 16(2), 842.
- [7] El-Barbary, Zakaria & Cheema, Khalid & Al-Gahtani, Saad & El-Sehiemy, Ragab. (2022). High Gain Chopper Supplied from PV System to Fed Synchronous Reluctance Motor Drive for Pumping Water Application. *Scientific Reports*.
- [8] K. Y. Yap, C. R. Sarimuthu, and J. M. Y. Lim, 2020 "Artificial Intelligence based MPPT techniques for solar power system: A review," *J. Mod. Power Syst. Clean Energy*, vol. 8, no. 6, pp. 1043-1059.
- [9] A. M. A. Mahmoud, H. M. Mashaly, S. A. Kandil, H. E. Khashab, and M. N. F. Nashed, Nagoya, Japan, 2000 "Fuzzy logic implementation for photovoltaic maximum power tracking," in 2000 26th Annual Conference of the IEEE Industrial2000 IEEE International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation. 21st Century Technologies,.
- [10] Udumula, R. R., Hanumandla, D., & Bellapu, V. (2020). Closed loop voltage mode controlled high step-down/step-up positive output buck–boost converter. *Journal of Power Technologies*, 100(3), 255.
- [11] Bakeer, A., Chub, A., & Vinnikov, D. (2020). Step-up series resonant DC–DC converter with bidirectional-switch-based boost rectifier for wide input voltage range photovoltaic applications. *Energies*, 13(14), 3747.
- [12] Dawud Ansari & Claudia Kemfert & Hashem al-Kuhlani,. "Yemen's Solar Revolution: Developments, Challenges, Opportunities; Report with Policy Recommendations Based on Results from Research Projects Financed by the Federal Ministry of Education and Research," DIW Berlin: Politikberatung kompakt, DIW Berlin, German Institute for Economic Research, 2019.
- [13] D. T. Alkebsi and R. Albouthigy, "Environmental Condition Impacts On PV Systems In Yemen Based On Fuzzy Logic Technique: A Case Study," 2025 5th International Conference on Emerging Smart Technologies and Applications (eSmarTA), Ibb, Yemen, 2025, pp. 1-7, doi: 10.1109/eSmarTA66764.2025.11132235