

Mesterséges intelligencia módszerek a gyártástechnológiában

Kalmár Zoltán

evosoft Hungary Számítástechnikai Kft., (Budapest, Magyarország)

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

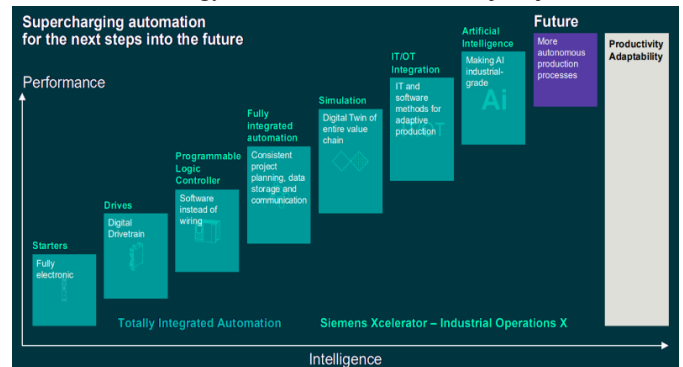
A gyártásautomatizálás története szorosan összefonódik az emberiség örökös törekvéssel az értékek felhalmozására. A neolitikus forradalom (Kr. e. 9500-8500 körül) megteremtette a mezőgazdaság és ezáltal az élelmiszer-felhalmozás alapjait, ami a népesség ugrásszerű növekedésével járt. Ez a növekedés szolgált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

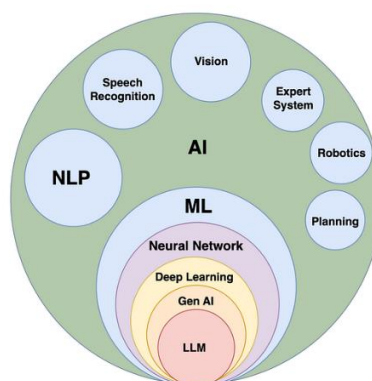
Az Oxford English Dictionary definíciója szerint, a mesterséges intelligencia a számítógépek vagy más eszközök olyan képessége, amikkel intelligens viselkedést mutatnak, vagy szimulálnak. Olyan szoftverek, amik olyan feladatokat hajtanak végre, vagy olyan eredményeket produkálnak, amikről korábban úgy 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 beszéd felismerés, 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].

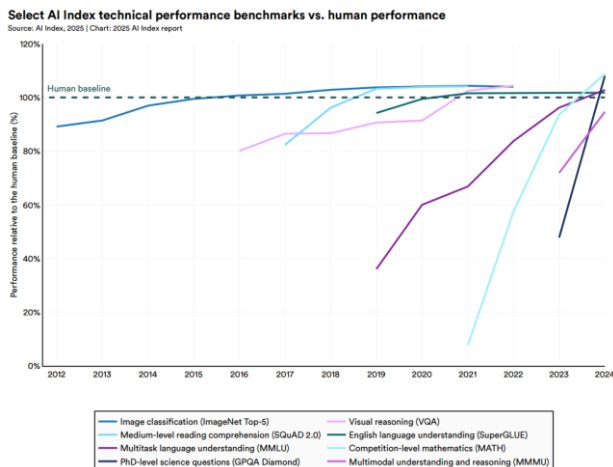


2. ábra: A mesterséges intelligencia terület nagyobb részei

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.

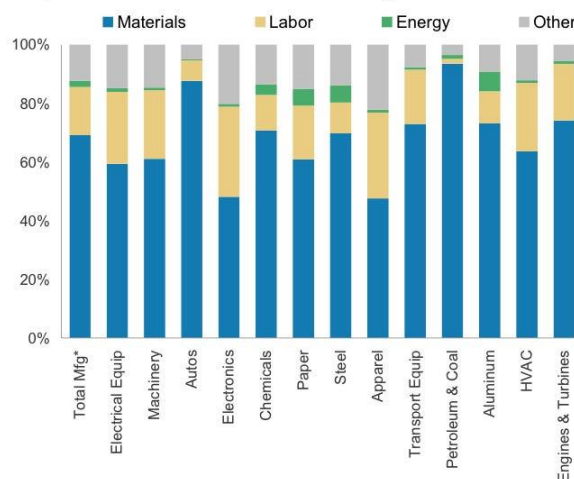
Szemben az explicit, meghatározott problémákör megoldására írt szoftveres megoldásokkal, a mesterséges intelligencia használata lehetőséget nyújt a problématerék tágabb definíciójára. Az így létrehozott rendszerek rugalmasabbak és a feladatok szélesebb spektrumját képesek ellátni anélkül, hogy minden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

Mindeztől 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

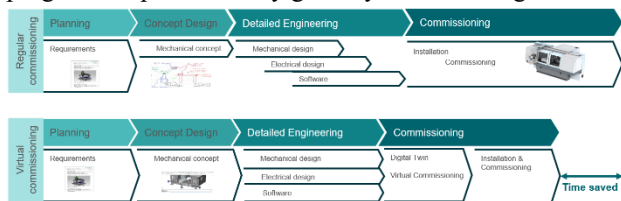
A gyártás optimalizálása napjainkban kulcsfontosságú szerepet tölt be az ipari vállalatok versenyképességének és hatékonyságának növelésében. Az optimalizált gyártási folyamatok révén csökkenthetők a költségek, javítható a termékminőség, valamint gyorsabb és rugalmasabb termelés válik lehetővé. Ugyanakkor 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 scenáriókat.

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 hibátlanúsága.

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 tehetőek, 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.

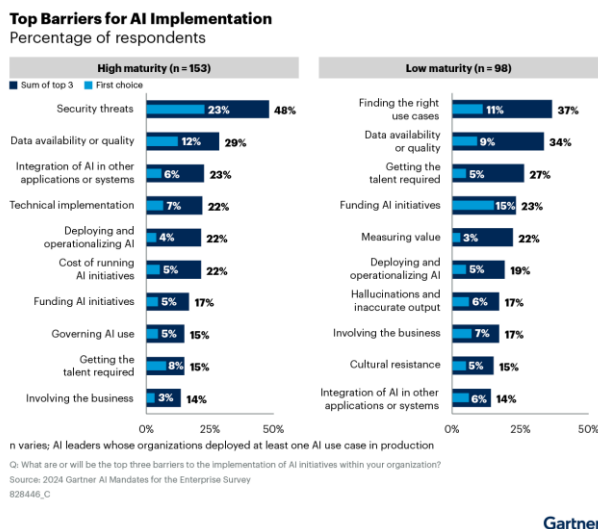
- Adathiány (*data scarcity*)

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 autóipari 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 futatókörnyezet jelentősen mérséklik 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 tudásfeltárásként 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].

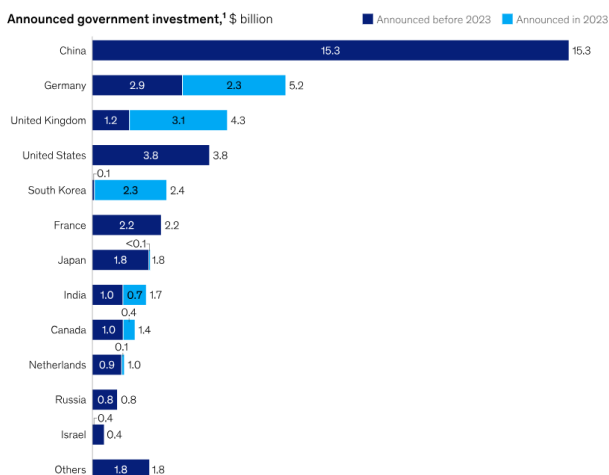
6.2.3. Kvantumszámítógépek

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 termelékenységét 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. [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. [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].