Ideiglenes tárolóhely kialakítása gyártórendszerek kiszolgálásához

Dr. Gubán Miklós
professzor emeritus
Budapesti Gazdaságtudományi Egyetem,
E-mail: miklos.guban@uni-bge.hu

Dr. Avornicului Mihai-Constantin
főiskolai docens
Babeș–Bolyai Tudományegyetem;
Budapesti Gazdaságtudományi Egyetem,
Pénzügyi és Számviteli Kar,
Informatika Tanszék
E-mail: mihai.avornicului@econ.ubbcluj.ro

Absztrakt

Egy multinacionális vállalat automatizált gyártóüzemében többféle termék összeszerelése zajlik. A gyártóberendezések folyamatos működésének biztosításához indokolt egy közbenső tárolóterület kialakítása, amely támogatja az alkatrészek előzetes komissiózását és rendszerezett elhelyezését. A tároló megfelelő tervezése – különös tekintettel a térbeli struktúrára, valamint a szükséges munkahely- és munkaerő-kapacitásra – alapvető a termelés folytonosságának fenntartásában. A rendszer kialakítását ugyanakkor korlátozza a rendelkezésre álló fizikai tér és munkaerő. További optimalizációs feladat a raktári robotok számának meghatározása, amelyek az anyagellátást és az anyagmozgatást végzik a tárolók és a gyártóegységek között. Ehhez kapcsolódóan definiálandók az optimális szállítási útvonalak, valamint a készletfeltöltés időzítése és gyakorisága. Az így kialakított rendszer lehetővé teszi az alkatrészellátás strukturált elemzését és a döntéstámogatást, elősegítve a hatékony logisztikai működés kiválasztását.

Abstract

In an automated manufacturing facility of a multinational company, the assembly of multiple product types is carried out. To ensure the continuous operation of production equipment, the establishment of an intermediate storage area is justified, enabling the pre-picking and systematic arrangement of components. The proper design of this storage area – particularly with regard to spatial layout, as well as the required number of workstations and workforce capacity – is essential for maintaining production continuity. At the same time, system design is constrained by the limited availability of physical space and labor resources. An additional optimization task involves determining the optimal number of warehouse robots responsible for supplying materials and handling material flows between storage areas and production units. In this context, optimal transportation routes, as well as the timing and frequency of inventory replenishment, must also be defined. The resulting system supports the structured analysis of component supply processes and facilitates decision-making, thereby enabling the selection of an efficient logistics operating mechanism.

Kulcsszavak:
automatikus gyártósor, gyártócella, gyártóeszköz, ideiglenes tároló, kiszolgálás, optimalizálás

Keywords:
automated production line, manufacturing cell, production equipment, temporary storage, servicing, optimization

DOI: 10.21405/logtrend.2026.07.1.38

1. Bevezetés

A globális ipari termelés az elmúlt évtizedben jelentős szerkezeti és technológiai átalakuláson ment keresztül az Ipar 4.0 koncepciójának elterjedésével. Az intelligens gyártórendszerek, az automatizálási megoldások és a digitalizáció integrált alkalmazása lehetővé tette olyan rugalmas, adaptív és adatvezérelt termelési rendszerek kialakulását, amelyek hatékonyan képesek reagálni a dinamikusan változó piaci igényekre (Kagermann et al., 2013). E fejlődési irány egyik kulcsfontosságú eleme a gyártási rugalmasság, amely lehetővé teszi, hogy a vállalatok különböző terméktípusokat párhuzamosan, rövid átfutási idő mellett és magas hatékonysággal állítsanak elő. Ennek egyik korszerű megvalósítási formája a mátrixrendszerű gyártás, amelyben a termelési folyamat moduláris szerkezetű gyártócellákban zajlik, és a gyártási feladatok dinamikus módon kerülnek elosztásra az egyes cellák között (Schuh et al., 2020).

A gyártási rendszer teljesítményét azonban nem kizárólag a gyártócellák működési hatékonysága határozza meg, hanem a hozzájuk kapcsolódó logisztikai infrastruktúra működése is meghatározó szerepet játszik. Az automatizált anyagmozgatási rendszerek, a robotizált raktárkezelés, valamint a precízen időzített ellátási és kiszállítási folyamatok alapvető feltételei az alapanyag-ellátás folyamatosságának és a termelési átfutási idők csökkentésének. Ennek következtében az automatizált raktárak, illetve az ideiglenes lerakó- vagy pufferterületek kialakítása, valamint ezek optimális száma, kapacitása és térbeli elrendezése a gyártási rendszerek tervezésének egyik kritikus kérdéskörét jelenti.

A rendszer működtetése során több, egymással szoros kölcsönhatásban álló döntési probléma jelenik meg. Egyrészt meghatározandó az autonóm robotok vagy egyéb anyagmozgató egységek optimális száma, amelyek biztosítják a raktár és az ideiglenes lerakóhelyek közötti anyagáramlást, valamint a szükséges rakományok összeállítását és továbbítását. Másrészt optimalizálni szükséges az ideiglenes tárolóhelyek számát és kapacitását annak érdekében, hogy a gyártócellák kiszolgálása folyamatos és kiegyensúlyozott legyen. Emellett meghatározó jelentőségű a kiszállítási ciklusok időzítése is: rögzített periódusú ellátási rendszer esetén az optimális ellátási időközök meghatározása, míg dinamikus ellátási környezetben a kiszállítások esedékességé-

nek adaptív, keresletvezérelt meghatározása válik szükségessé.
A bemutatott problémák komplexitása indokolttá teszi a gyártási és logisztikai folyamatok integrált modellezését.

2. Szakirodalom áttekintése

A szakirodalmi áttekintés keretében első lépésként áttekintjük a tématerületen elért legfontosabb tudományos eredményeket, azonosítjuk a fennálló kutatási hiányosságokat, valamint feltárjuk a gyártási rendszerek működésében jelentkező kritikus szűk keresztmetszeteket. A modern digitális technológiák integrációja lehetőséget teremt a hagyományosan hierarchikus és merev vállalati struktúrák, valamint irányítási architektúrák rugalmasabbá és adaptívabbá tételére. A jelenlegi kutatási és fejlesztési irányok középpontjában különösen a mesterséges intelligencia logisztikai szolgáltatásokban történő alkalmazása áll, amelynek célja az egyre növekvő számú termékváltozat és modell hatékony előállításának támogatása változó mennyiségi igények mellett (Schmidtke et al., 2021).
Ebben az összefüggésben a mátrixgyártás – más néven mátrixszerkezetű termelési rendszer – a rugalmas és moduláris gyártási architektúrák egyik meghatározó koncepciójaként jelenik meg. E megközelítés lehetővé teszi a gyártási folyamatok dinamikus adaptációját és a termelési erőforrások rugalmas allokációját. A szakirodalomban számos prototípus-alapú implementáció, modellezési kísérlet és kísérleti tesztkörnyezet szolgál a mátrixgyártás és a moduláris termelési rendszerek különböző változatainak vizsgálatára (Ranke & Bauernhansl, 2023). A mátrixgyártás előnyei különösen olyan gyártási környezetekben érvényesülnek, amelyekre a kereslet ingadozása, az előre nehezen jelezhető termelési struktúra és a nagy számú termékváltozat jellemző (Ranke et al., 2024) (Cronin et. al., 2019).
A gyakorlati megvalósítás során a mátrixgyártás rugalmasan összekapcsolt folyamatmodulokra épül, amelyek különböző gyártási műveletek végrehajtására képesek (Fries et al., 2021). Az ilyen rendszerek adaptív működést tesznek lehetővé, támogatva az új termékek és termékváltozatok gyors integrációját, miközben magas szintű erőforrás-kihasználást biztosítanak, és elősegítik a komplex termelési portfóliók kezelését (Ranke & Bauernhansl, 2021).
A vállalatok motivációja a mátrixgyártási rendszerek bevezetésére elsősorban a rugalmasság, az átalakíthatóság és a termelékenység növelésében ragadható meg. Ugyanakkor a szakirodalomban továbbra is élénk szakmai diskurzus zajlik a mátrixgyártási rendszerek tervezésének és irányításának optimális módszereiről, mivel a különböző megközelítések eltérően értelmezik a rendszer működésének alapvető feltételeit (Ranke et al., 2024).
A gyártócellák működése során a rendelési áramlások nagy száma egyes alkatrészek iránt átlag feletti keresletet generálhat, míg más komponensek iránt időszakosan nem jelentkezik igény. A mátrixgyártás rugalmas szállítási rendszere ezért kulcsszerepet játszik a munkacellák dinamikus anyagellátásának biztosításában. A gyártócellák hatékony irányításához olyan vezérlési módszerek alkalmazása szükséges, amelyek a megmunkálási folyamatokat képességalapú módon írják le, ezáltal lehetővé téve a gyors újrakonfigurálást és az új gyártási feladatokhoz való hatékony alkalmazkodást (Ihlenfeldt et al., 2021).
Az átkonfigurálás a termelési rendszer egyes elemeiben végrehajtott jelentős strukturális változásként értelmezhető, amely a rendszerelemek közötti kölcsönös függőségek miatt a teljes rendszer működésére hatással lehet (Alatise–Hancke, 2020). Minél gyorsabban történik a konfigurációs igény felismerése és annak végrehajtása, annál nagyobb gazdasági és működési előny realizálható. A sikeres implementáció ezért holisztikus megközelítést igényel, amely egyaránt figyelembe veszi a technológiai, szervezeti és irányítási dimenziókat, lehetővé téve a gyors és hatékony rendszeradaptációt (Trierweiler–Bauernhansl, 2022).
A mátrixszerkezetű gyártórendszerekben a kooperatív robotok és a kiberfizikai gyártócellák folyamatosan adatokat generálnak az egyes folyamatokról és azok kölcsönhatásairól. Ezen adatok elemzése lehetőséget biztosít a munkavállalók képességeinek célzott támogatására és fejlesztésére, valamint az ergonómiai feltételek és a gépek működési hatékonyságának optimalizálására. A digitális iker koncepciója ezzel összhangban képes előre jelezni és értékelni a különböző gyártásszabályozási stratégiák hatását a rendszer teljesítményére, figyelembe véve az emberi tényezők szerepét is. Esettanulmányok szerint a mátrixgyártás gyakorlati megvalósítása például automatizált vezetett járművek (AGV-k) és emberi felügyelet koordinációján alapuló rendszerekben történik (May et al., 2021).
A mátrixgyártás koncepciója az elmúlt 10–15 évben formálódott, azonban a fogalom pontos meghatározása továbbra sem egységes a szakirodalomban. Greschke (2015) a mátrixgyártást olyan, egymástól részben független gyártóállomások rendszerének írja le, amely rögzített periódusidő nélkül működik, pufferkészleteket alkalmaz, miközben az állomások elrendezése áramlásorientált logikát követ.
A raktári robotok szerepe az ellátási lánc hatékonyságának növelésében egyre meghatározóbb, különösen nagy volumenű és dinamikus működési környezetekben, ahol a hagyományos raktárkezelési módszerek már nem képesek kezelni a komplex logisztikai struktúrákat és a sürgős megrendelések kezelését (Zhen et al., 2025). A korszerű raktári műveletekben alkalmazott robotikai megoldások – beleértve az autonóm mobil robotokat (AMR), az automatizált vezetett járműveket (AGV), a goods-to-person (G2P) rendszereket, valamint a kooperatív manipulátorokat – az ellátási lánc digitalizációjának és intelligens automatizációjának kulcsfontosságú technológiai elemei.
E rendszerek valós idejű adatfeldolgozásra, szenzorfúzióra és dinamikus útvonaltervezési algoritmusokra támaszkodva növelik a raktári műveletek hatékonyságát, csökkentik a ciklusidőket, valamint optimalizálják a munkaerő és a gépi erőforrások kihasználását. Alkalmazásuk elsősorban a komissiózás, a belső anyagmozgatás, a készletfeltöltés és a raktári átrendezés támogatásában jelenik meg, különösen nagy volumenű, gyors ciklusú e-kereskedelmi környezetekben (Eisen et al., 2023).
Az autonóm mobil robotok a legnagyobb fokú rugalmasságot biztosító megoldások közé tartoznak, mivel előre rögzített útvonalak nélkül, adaptív térképezési eljárások és gépi látási technológiák segítségével navigálnak (Lee–Murray, 2019). Alkalmazásuk különösen előnyös dinamikusan változó raktári környezetekben, ahol a folyamatos szerkezeti átalakulás, a szezonális keresletingadozás vagy a termékdiverzifikáció megköveteli az autonóm döntéshozatalt és a valós idejű útvonaloptimalizálást (Kim et. al., 2017). A modern AMR-rendszerek képesek polcok, tárolóládák vagy teljes tárolómodulok mozgatására, valamint együttműködésre más robotokkal és emberi operátorokkal. Ez különösen hatékony a goods-to-person alapú komissiózási rendszerekben, ahol a robot a kívánt terméket a dolgozó munka-

állomásához szállítja, jelentősen csökkentve a gyaloglási távolságot és a keresési időt (Keith–La, 2024).

A mátrixgyártási architektúrák gyártócelláinak alkatrészellátása olyan integrált logisztikai feladat, amelynek alapvető célja a cellaszintű átfutási idők és készletvolumen csökkentése, miközben biztosítja a termelési folyamat folytonosságát és a kapacitások kiegyensúlyozását. A szakirodalom konszenzusa szerint az anyagellátási rendszer akkor tekinthető optimálisnak, ha képes reagálni a gyártórendszer decentralizált és dinamikusan változó igényeire, vagyis ha a fizikai és az információs áramlások szorosan integrált módon működnek (Hopp–Spearman, 2011).

A húzóelvű ellátási rendszerek – különösen a kanban és a two-bin megoldások – ebben a környezetben kiemelkedő jelentőséggel bírnak (Diab et. al., 2020). A kanban alapú rendszerek a gyártócellák tényleges fogyási ütemét használják az utánpótlási műveletek vezérlésére, ezáltal csökkentve a készletszintek ingadozását és stabilizálva a cellák közötti anyagáramlást. Ezzel párhuzamosan a milk-run jellegű ciklikus anyagellátási struktúrák standardizálják a belső logisztikai folyamatokat, mérséklik az ad hoc szállítások számát, és kiszámítható ciklusidők mellett biztosítják a gyártócellák kiszolgálását (Ellithy et al., 2024).

A mátrixgyártás digitalizált környezete egyre inkább kedvez az autonóm mobil robotokkal történő anyagellátásnak, valamint a digitális ikerrel támogatott prediktív logisztikai tervezésnek. Az AMR-rendszerek képesek valós időben reagálni a gyártócellák prioritásváltozásaira, míg a digitális iker alapú prediktív algoritmusok előre jelezhetik az alkatrészigények időbeli alakulását. Ezáltal optimalizálható a belső logisztikai terhelés, és csökkenthetők a potenciális szűk keresztmetszetek (Monostori et al., 2016). E technológiák együttes alkalmazása lehetővé teszi a mátrixszerkezetű gyárak rendkívül rugalmas és adaptív működését.

A fent említett technológiák integrációja – a raktári működés digitális érettségének növekedésével párhuzamosan – egyre komplexebb és koherensebb automatizált ökoszisztémák kialakulását eredményezi. A robotok a raktárirányítási rendszerekkel (WMS) és a vállalatirányítási rendszerekkel (ERP) integrált módon kommunikálva lehetővé teszik a valós idejű készletpontosság biztosítását, a prediktív karbantartás alkalmazását, valamint a logisztikai szűk keresztmetszetek intelligens kezelését. Ennek következtében a raktári robotok már nem csupán operatív hatékonyságnövelő eszközöknek tekinthetők, hanem olyan stratégiai képességeknek, amelyek hosszú távon meghatározzák az ellátási lánc versenyképességét.

3. Anyag és módszertan

Egy összeszerelő üzem többféle termék párhuzamos gyártását végzi automatizált gyártócellák, gyártósorok alkalmazásával, a termelés szervezése pedig mátrixrendszerű gyártási architektúra szerint történik (Gubán, 2011). A termelési infrastruktúra több, funkcionálisan elkülönülő egységből áll. A továbbiakban, mivel az alkatrész, félkésztermékkel való ellátás szempontjából nem játszik szerepet, ezért a továbbiakban a gyártócellákat, gyártósorokat gyártóeszközöknek fogjuk nevezni.

A rendszer első eleme a termelési terület, ahol a különböző gyártóeszközök helyezkednek el, és ahol az összeszerelési műveletek tényleges végrehajtása történik. Ehhez kapcsolódik a termeléshez szükséges alapanyagok, alkatrészek és félkész termékek tárolását biztosító automatikus raktár. A raktári infrastruktúra részét képezik továbbá azok az ideiglenes lerakóhelyek, amelyek a komissiózási műveletek végrehajtására szolgálnak. A rendszer negyedik meghatározó eleme a gyártóeszközök kiszolgálását biztosító ideiglenes tárolók rendszere, amelyekből a gyártóeszközök közvetlenül kapják a gyártási folyamat során felhasznált alapanyagokat, alkatrészeket és félkész termékeket.

Az egyes gyártóeszközök kiszolgálása a hozzájuk rendelt ideiglenes lerakóhelyekről történik. A gyártóeszközök meghatározott tárolóhelyekről kapják meg az alkatrészeket előre definiált időszakokban, ugyanakkor alapvető követelmény, hogy az összeszerelési műveletek megkezdésének időpontjára minden szükséges komponens rendelkezésre álljon. A lerakóhelyek száma nem függ közvetlenül a gyártóeszközök számától, ezért ezek mennyisége kisebb vagy nagyobb is lehet a gyártóeszközök számánál. A lerakóhelyek és a gyártóeszközök közötti hozzárendelés a rendszerben előre rögzített, így a vizsgált probléma megoldásában a gyártóeszközök száma közvetlen döntési változóként nem jelenik meg. A modell szempontjából elegendő a gyártóeszközök alkatrészigényeinek és azok időbeli jelentkezésének ismerete, amely információ a vállalatirányítási rendszerből (SAP), valamint a napi gyártási terv és a termékstruktúra (termékfa) alapján meghatározható.

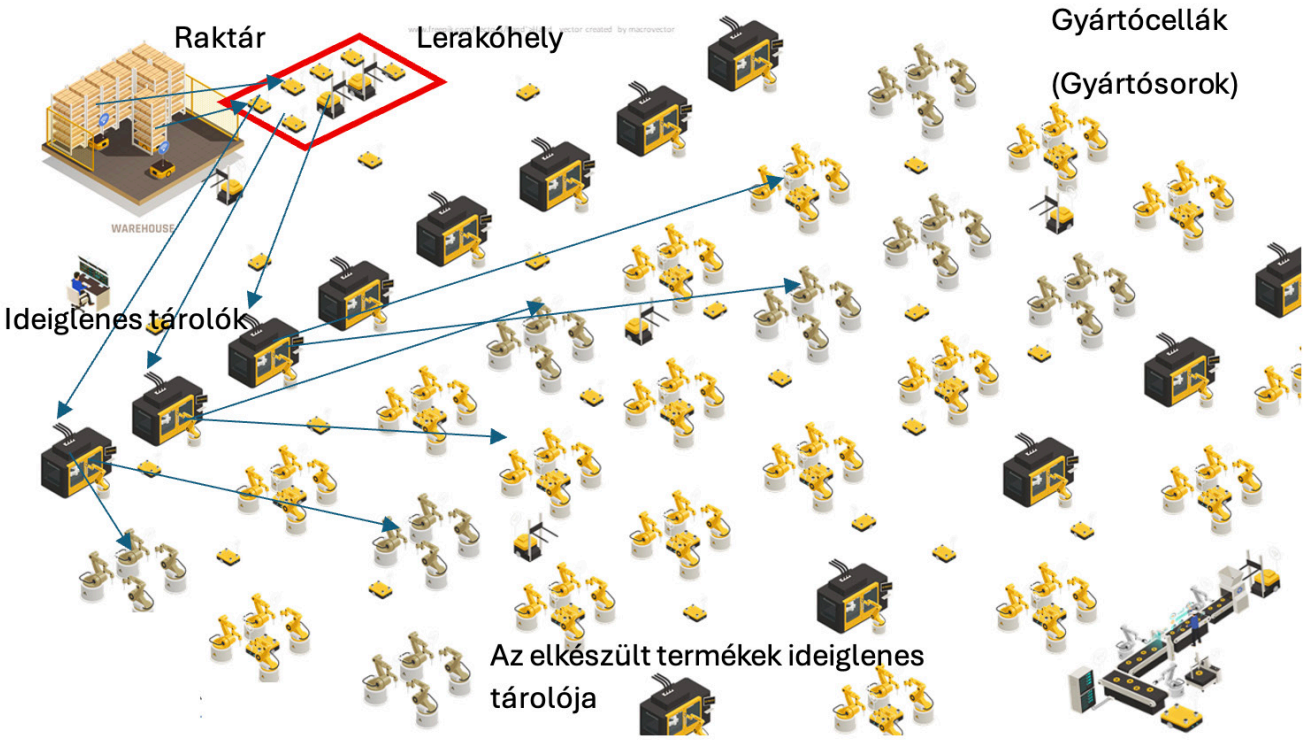
Az alkatrészek egy automatizált raktári rendszerből kerülnek kiszállításra. A raktárból történő komissiózási és kiszállítási műveleteket robotok végzik, amelyek száma adott (12 darab), és teljesítményparamétereik ismertek. A későbbiekben az általánosíthatóság érdekében a robotok számát a modellben nem fogjuk rögzített értéknek tekinteni. A robotok az alkatrészeket egységládákba helyezik el; az alkatrészek a ládákba heterogén módon kerülnek betöltésre. A feltöltött ládák ezt követően a lerakóhelyekre kerülnek, ahol a munkavállalók végzik az egyes ideiglenes tárolók igényeinek megfelelő rakományok összeállítását.

Az összeállított rakományok – amelyek gyakran egy további gyűjtőládába kerülnek – szállítóeszközök segítségével jutnak el a gyártóeszközökhöz tartozó ideiglenes lerakóhelyekhez. Az anyagmozgatási folyamat során alkalmazott szállítási útvonalak előre meghatározottak és állandóak, ezért azok optimalizálása a jelen vizsgálat keretein belül nem képezi a modell részét.

A raktári infrastruktúra hagyományos polcrendszerű kialakítású, egységes méretű rekeszekkel, amelyekben az egyes alkatrészek találhatók. A rekeszek közvetlen elérést biztosítanak, így a robotok a megfelelő alkatrészmennyiséget egyszerűen és hatékonyan ki tudják venni. A készletek folyamatosan figyeltek és rendszeresen feltöltöttek, ezért a modell szempontjából mindig feltételezhető, hogy minden alkatrészből elegendő mennyiség áll rendelkezésre. Minden rekesz kizárólag egyféle alkatrészt tartalmaz.

A raktári robotok szabadon mozognak a polcrendszerben, útvonalukat úgy tervezték, hogy a gyűjtési folyamat során ne akadályozzák egymást. A gyűjtési ciklus a robotok kezdőpontjáról indul, és a ládák lerakóhelyre történő szállítása után a kezdőpontra való visszatéréssel zárul. A robotok a rekeszekből a maximálisan lehetséges alkatrészmennyiséget gyűjtik ki. Alapvetően egy robot egyszerre egy ládát képes szállítani, azonban a rendszer képes kezelni olyan robotokat is, amelyek egyszerre több ládát tudnak mozgatni, ezért a modell több láda kezelésére is felkészített.

Amennyiben egy láda megtelik, de további alkatrészmennyiség gyűjtése szükséges, a robot az addig összegyűjtött alkatrészt a lerakóhelyre szállítja, majd visszatér a raktárba a folyamatban lévő rekeszhez, és befejezi a szükséges mennyiség kigyűjtését. A



1. ábra. Az üzem felépítése
Forrás: Saját szerkesztés, (Hardai et al., 2025) alapján

műveletet addig ismétli az adott rekesz esetében, amíg az összes igényelt alkatrészt ki nem gyűjti. Ezt követően a robot a következő szükséges rekeszhez lép, és a folyamatot ismétli, amíg az összes, általa kigyűjtendő alkatrész a megfelelő lerakóhelyre, a munkavállalók által könnyen elérhető gyűjtőpontokra nem kerül.

4. Következtetések

A tervezett modell alkalmazása lehetővé teszi az anyagellátási folyamatok strukturált és kvantitatív elemzését, valamint a különböző működési stratégiák összehasonlítását és optimalizálását.

A vizsgált megoldási eljárások között lágy számítási technikák – úgymint genetikus algoritmusok és sztochasztikus keresési módszerek – szerepelnek, amelyek alkalmasak a nagyméretű keresési térrel és többcélú optimalizálási kritériumokkal jellemezhető problémák kezelésére.

A kutatás következő szakaszában a kiválasztott megoldási módszer hatékonyságát valós ipari környezetet reprezentáló szimulációs modell alkalmazásával kívánjuk ellenőrizni. A szimuláció célja a modell gyakorlati alkalmazhatóságának vizsgálata, valamint annak értékelése, hogy a javasolt megközelítés milyen mértékben képes növelni az automatizált gyártórendszerek teljesítményét és rugalmasságát. A jövőbeli kutatások során tervezett a modell kiterjesztése dinamikus keresletváltozásokra, továbbá többtermékes és párhuzamos gyártási struktúrákra, amelyek a valós ipari működés komplexitását még pontosabban tükrözik.

A kutatás eredményei hosszú távon hozzájárulhatnak az Ipar 4.0 alapelveire épülő, intelligens logisztikai rendszerek fejlesztéséhez, valamint a gyártási és raktározási folyamatok szoros integrációjához. Eredményei elősegíthetik az automatizált gyártórendszerek hatékonyságának növelését, továbbá a logisztikai erőforrások rugalmas és költséghatékony allokációját.

Felhasznált irodalom

- Alatise, M.B., & Hancke, G.P. (2020). A review on challenges of autonomous mobile robot and sensor fusion methods. *IEEE Access 8:39*, 830–846. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2975643
- Cronin, C., Conway, A., & Walsh, J. (2019). State-of-the-art review of autonomous intelligent vehicles (AIV) technologies for the automotive and manufacturing industry. In: *2019 30th Irish Signals and Systems Conference (ISSC)*, 1–6, https://doi.org/10.1109/ISSC.2019.8904920
- Diab, M. K., Ammar, H. H., & Shalaby, R. E. (2020). Self-driving car lane-keeping assist using PID and pure pursuit control. *2020 International Conference on Innovation and Intelligence for Informatics. Comput Technol (3ICT)* 1–6, https://doi.org/10.1109/3ICT51146.2020.9311987
- Eisen, M., Sudhakaran, S., Mageshkumar, V., Baxi, A., & Cavalcanti, D. (2023). Joint resource scheduling for AMR navigation over wireless edge networks. *IEEE Open Journal of Vehicular Technology*, 36–47. https://doi.org/10.1109/OJVT.2022.3218460
- Ellithy, K., Salah, M., Fahim, I. S., & Shalaby, R. (2024). AGV and Industry 4.0 in warehouses: A comprehensive analysis of existing literature and an innovative framework for flexible automation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 134*, 15–38. https://doi.org/10.1007/s00170-024-14127-0
- Fries, C., Fechter, M., Ranke, D., Trierweiler, M., Assadi, A. A., Foith-Förster, P., Wiendahl, H.-H., & Bauernhansl, T. (2021). Fluid manufacturing systems (FLMS). In P. Weißgraeber, F. Heieck, & C. Ackermann (Eds.), *Advances in au-*

tomotive production technology – Theory and application (pp. 37–44). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-62962-8_5
- Gong, Y., & de Koster, R. (2008). A review on stochastic models and analysis of warehouse operations. *Logistics Research, 1*(1), 79–96. https://doi.org/10.1007/s12159-011-0057-6
- Greschke, P. (2015). *Matrix-Produktion als Konzept einer taktunabhängigen Fließfertigung* (Doctoral dissertation, Technische Universität Braunschweig). ISBN 978-3-7526-3802-8.
- Gubán, M. (2011). Non-linear programming model and solution method of ordering controlled virtual assembly plants. In M. G. Ozerova, V. F. Lukinikh, A. N. Reznikova, & N. A. Tod (Eds.), *Logistics – The Eurasian Bridge: Materials of the V International scientifically-practical conference*, Krasnoyarsk State Agricultural University, 49–58.
- Hardai, I., Illés, B., Besse, Z., & Bányai, Á. (2025). Optimization opportunities in matrix production. *Acta Logistica*. (In press)
- Hopp, W. J., & Spearman, M. L. (2011). *Factory physics* (3rd ed.). Waveland Press.
- Ihlenfeldt, S., Wunderlich, T., Süsse, M., Hellmich, A., Schenke, C.-C., Wenzel, K., & Mater, S. (2021). Increasing resilience of production systems by integrated design. *Applied Sciences, 11*(18), Article 8457. https://doi.org/10.3390/app11188457
- Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). *Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0*. – National Academy of Science and Engineering. https://www.din.de/resource/blob/76902/e8cac883f42bf28536e7e8165993f1fd/recommendations-for-implementing-industry-4-0-data.pdf
- Keith, R., & La, H. M. (2024). Review of autonomous mobile robots for the warehouse environment. 1–25. https://doi.org/10.48550/arXiv.2406.08333
- Kim, Y., Chun, W, & Chen, K. (2017). Thermal-flow analysis of a simple ltd heat engine. *Energies 10(4)*. https://doi.org/10.3390/en10040567
- Lee, H.Y., & Murray, C. C. (2019). Robotics in order picking: evaluating warehouse layouts for pick, place, and transport vehicle routing systems. *Intl J Prod Res 57(18)*, 5821–5841. https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1552031
- Lu, Z., Tan, Z., de Koster, R., He, X., Wang, S., & Wang, H. (2025). Optimizing warehouse operations with autonomous mobile robots. *Transportation Science, 59*(5), 689–882. https://doi.org/10.1287/trsc.2024.0800
- May, M. C., Overbeck, L., Wurster, M., Kuhnle, A., & Lanza, G. (2021). Foresighted digital twin for situational agent selection in production control. *Procedia CIRP, 99*, 27–32. https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.03.005
- Monostori, L, Kádár, B., Bauernhansl, T., Kondoh, S., Kumara, S., Reinhart, G., Sauer, O., Schuh, G., Sihn, W., & Ueda, K. (2016). Cyber-physical systems in manufacturing. *CIRP Annals, 65*(2). 621–641. https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.005
- Ranke, D., & Bauernhansl, T. (2021). Evaluation of material supply strategies in matrix manufacturing systems. In P. Weißgraeber, F. Heieck, & C. Ackermann (Eds.), *Advances in automotive production technology – Theory and application* (pp. 80–88). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-62962-8_10
- Ranke, D., & Bauernhansl, T. (2023). Cost-minimal selection of material supply strategies in matrix production systems. In K.-Y. Kim, L. Monplaisir, & J. Rickli (Eds.), *Flexible automation and intelligent manufacturing: The human–data–technology nexus* (pp. 217–226). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-18326-3_22
- Ranke, D., Trierweiler, M., Berkhan, P., Münnich, M., & Bauernhansl, T. (2024). Definition and description of matrix production systems. *Procedia CIRP, 130*, 1875–1880. https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.10.331
- Schmidtke, N., Rettmann, A., & Behrendt, F. (2021). Matrix production systems: Requirements and influences on logistics planning for decentralized production structures. In T. Bui (Ed.), *Proceedings of the 54th Hawaii International Conference on System Sciences* (pp. 1665–1674). Hawaii International Conference on System Sciences. https://doi.org/10.24251/HICSS.2021.201
- Schuh, G., Anderl, R., Gausemeier, J., ten Hompel, M., & Wahlster, W. (2020). *Industrie 4.0 maturity index: Managing the digital transformation of companies* (Update 2020). ISBN 978-3-96834-002-9
- Trierweiler, M., & Bauernhansl, T. (2022). Reconfiguration process for matrix manufacturing systems. *Procedia CIRP, 107*, 699–704. https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.05.048