



DIGITÁLIS IKER TECHNOLÓGIA HATÁSA A GYÁRTÓRENDSZEREKRE

BÁNYAI KRISTÓF

Miskolci Egyetem

Gépészmérnöki és Informatikai Kar

banyaikristof2003@gmail.com

KOVÁCS LÁSZLÓ

Miskolci Egyetem

Informatikai Intézet

Általános Informatikai Intézeti Tanszék

kovacs@iit.uni-miskolc.hu

Absztrakt. Ugyan a digitális iker technológia egy nagyon ígéretes lehetőség a termelő- és szolgáltatóvállalatok számára, de mindig nehéz megtalálni a módját annak, hogy kiszámítsuk a digitális iker bevezetésének pénzügyi vonatkozásait, különösen a beruházások megtérülése (ROI) szempontjából. A digitális iker megvalósításának megtérülése a munkaerőköltségen, a tárgyi és immateriális javakon egyaránt alapulhat. Ez a tanulmány egy olyan módszert javasol, amely elemzi a különböző azonosító rendszerek hatását a digitális iker telepítés hatékonyságára és megtérülésére a termelési rendszerekben. A javasolt módszer szimulációs elemzéssel végzi el a digitális iker nyújtotta teljesítménynövekedés meghatározását, melyből számíthatók azon pénzügyi mutatók, melyek alapján a megtérülés meghatározható.

Kulcsszavak: *digitális iker, vonalkód, rádiófrekvenciás azonosítás, beruházás megtérülése*

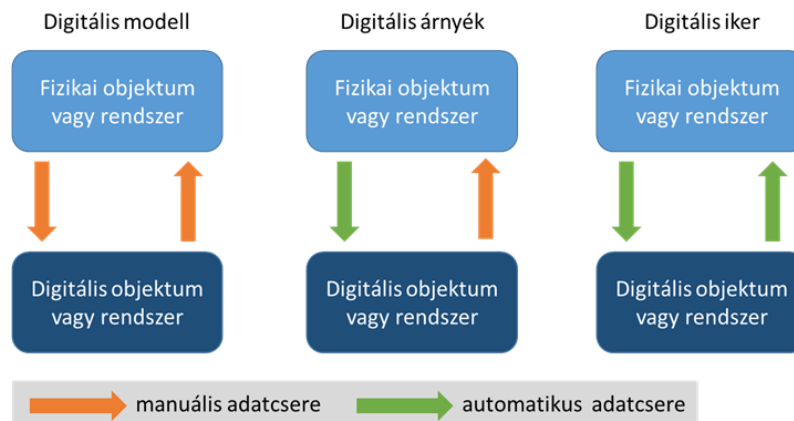
1. Bevezetés

A negyedik ipari forradalom, a digitalizálás, a COVID kitörése és elterjedése a digitális iker megoldások széles körű elterjedéséhez vezetett. A MarketsandMarkets portál előrejelzése szerint a digitális iker piaca 2027-re 73,5 milliárd USD-re fog növekedni. A digitális iker piac főbb szereplői jelenleg a következő nagyvállalatok: General Electric, Microsoft, Siemens, Amazon, Ansys, Dassault Systemes és PTC [1]. Ezen nagyvállalatok gyökeresen meg fogják változtatni az elkövetkezendő években az ipari, mezőgazdasági, szolgáltatási szektorok, az egészségügy és a civil élet folyamatait.

A digitális iker technológia egy valós, fizikailag létező tárgy vagy rendszer és egy virtuális, digitális tárgy vagy rendszer közötti integrációként írható le. Fuller [2] a digitális ikerre vonatkozóan számos definíciót gyűjtött össze, melyek közül a legelső a NASA által megfogalmazott, úrkutatásra fókuszáló definíció, mely szerint a digitális iker egy épített, fizikailag létező jármű vagy rendszer integrált szimulációja, mely a lehető legjobb rendelkezésre álló fizikai modelleket, szenzorokat és múltbeli adatokat használja annak érdekében, hogy tükrözze a valós jármű vagy rendszer életét. Egy másik fontos, paradigmaváltó hatású definíciója a digitális ikernek Mandi [3] megközelítése, mely szerint a digitális iker egy fontos tulajdonsága, hogy a modellezett termék vagy rendszer teljes életciklusát követni tudják. Ezt fogalmazza meg a következő definíció: a digitális iker egy fizikai rendszer virtuális példánya (virtual instance), mely folyamatosan frissül annak tevékenységével, karbantartásával és állapotával teljes életciklusa alatt.

A szakirodalmi forrásokban találunk számos olyan alkalmazást is, melyek ugyan kapcsolatot mutatnak egy valós tárgy és egy virtuális modell között, de ezek még nem tekinthetők digitális ikernek (1. ábra).

Ezen digitális ikernek nevezett megoldások a leggyakrabban azért nem tekinthetők digitális iker megoldásnak, mivel azokban az adatátvitel nem automatikusan történik meg. Az automatikus adattovábbítás hiányával bíró digitális ikerhez hasonló megoldásokat a szakirodalom inkább digitális modellnek vagy digitális árnyéknek nevezi. A digitális modell egy létező objektum vagy rendszer digitális változata, mely esetében nincs automatikus adatcsere megvalósítva a fizikai modell és a digitális modell között.



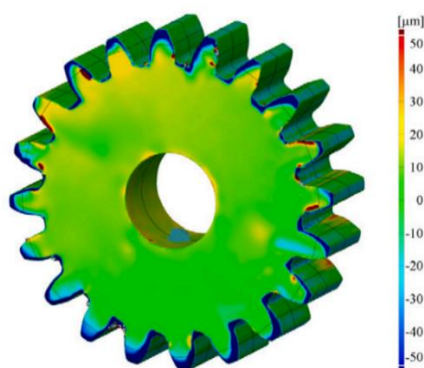
1. ábra. Adatcsere digitális modell, digitális árnyék és digitális iker esetében [4]

Digitális modellre lehet példa egy épület vagy egy termék digitális terve. Azért beszélünk ebben az esetben digitális modellről, mert a digitális modell elkészülte után ha a fizikai alkatrészben változás következik be, az nincs hatással a digitális modellre. Ugyanez igaz a másik irányba is, az alkatrész 3D-s modelljében bekövetkező változások nem eredményeznek közvetlen változást a modellezett alkatrészben. Lehetséges

kapcsolatot kiépíteni például egy alkatrész és annak 3D modellje között 3D metrológia (például GOM) alkalmazásával, azonban ezen kapcsolat létrejötte is csak digitális modellt jelent, hiszen nincs direkt kapcsolat (automatikus adatcsere) a fizikai és a virtuális modell között, hiszen a GOM-mérés által kapott eltérések nincsenek közvetlen hatással a fizikai termékre és annak gyártási folyamatára (2. ábra).

Digitális árnyék esetében az adatcsere automatikus a valós, fizikai tárgy vagy rendszer és a virtuális tárgy vagy rendszer között, azonban ez nem igaz a másik irányban, azaz a virtuális árnyék csak követi a valós tárgyban bekövetkező változásokat, de nincs arra hatással.

Az egyik legnagyobb kihívás a digitális iker megoldások megvalósítása során a technológiai problémák megoldása mellett annak a meghatározása, hogy a jelentős beruházási értékkel bíró digitális iker megoldás milyen pénzügyi előnyt fog biztosítani a jövőben. A szakirodalmi források a digitális iker alkalmazásoknak széles körét tárgyalják az autóipar [6], az élelmiszeripar [7], a mezőgazdaság [8], az egészségügy [9], a logisztika [10], a létesítménymenedzsment [11] területein, azonban ezen kutatások főként a technológiai kihívásokra és a digitális iker teljesítménynövelő indikátoraira (átfutási idő csökkenés, rendelkezésreállítás-növekedés, kapacitáskihasználtság-növekedés, rugalmasság-növekedés, termelékenység-fokozás) fókuszálnak és csak kevés kutatás foglalkozik a digitális iker pénzügyi hatásainak technológiai szempontú vizsgálatával.



2. ábra. Példa egy fejlett digitális modellre: eltérés meghatározása GOM-alapú mérés segítségével a 3D modell és a valós alkatrész között [5]

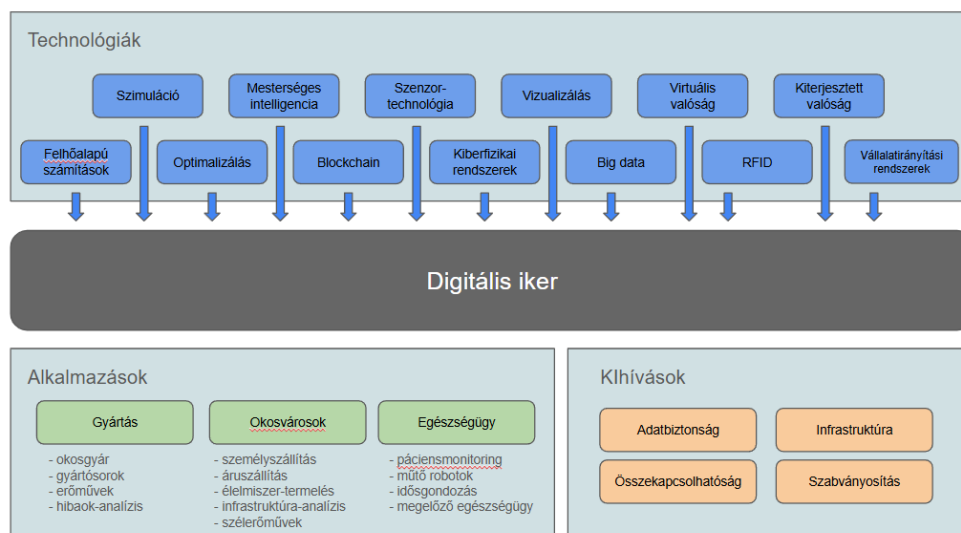
Ezek alapján a kutatómunkát összefoglaló jelen cikk a következő fő fejezetekből épül fel. A 2. fejezet egy rövid szakirodalmi áttekintés keretében azt mutatja be, hogy milyen széles körű a digitális iker megoldások alkalmazása és hogy mennyire sikerült a digitális iker alkalmazások esetében annak gazdaságosságát különböző pénzügyi mutatók (például befektetésarányos megtérülés, nettó jelenérték) segítségével becsülni. A 3. fejezetben egy olyan, ágensalapú szimuláció segítségével történő értékelési módszer kerül bemutatásra, mely segítségével elvégezhető különböző technológiai megoldásokon nyugvó digitális iker megoldások gazdasági hatásainak elemzése. Ezen módszer egyrészt tartalmazza a digitális iker gazdasági hatásainak mérésére szolgáló

mutatószámok leírását, egy job-shop-gyártórendszer szimulációs modelljét, mely alapján meghatározható különböző esettanulmányok segítségével az egyes digitális iker megoldások gazdaságossága. A cikk utolsó fejezete tartalmazza az összefoglalást és a jövőbeli potenciális kutatási irányokat.

2. Irodalmi háttér

A digitális iker alkalmazásának számos olyan területe van, ahol a korszerű Ipar 4.0 technológiák alkalmazása révén jelentős gazdasági előny érhető el. Ilyen alkalmazási terület például az épületmenedzsment, az egészségügy, a karbantartás, a terméktervezés, a rendszerfelügyelet és a termelés. A digitális iker megjelenésének egyik fontos állomása volt az automatizált rendszerek, az IoT-eszközök és a mobilalkalmazások elterjedése. Az épületmenedzsment területén ez kiegészült az épületautomatizálási rendszerek (BAS = Building Automation System) és az épületinformatikai modellezési rendszerek (BIM = Building Information Modeling) térnyerésével [12]. A digitális iker ezen túlmutatva biztosíthat korszerű létesítménymenedzsment-tevékenységet, hiszen a nagy mennyiségű összegyűjtött adat hatékony feldolgozása és hasznosítása révén jelentős gazdasági előny érhető el a létesítmények működésének már a korai fázisában is. Egy földgáztermelő üzemben egy digitális ikert használtak a kitermelés hatékonyságának növelésére, valamint az energiafogyasztás és a károsanyag-kibocsátás csökkentésére. Az ezen kutatásokat bemutató cikk ugyan kiemeli a digitális iker megoldás fő előnyeit, mint például az üzem valós leképezése, a különböző paraméterek nyomon követése, a berendezések hátralévő élettartamának előrejelzésére szolgáló gépi tanulási algoritmus, az energiafogyasztás dinamikus kiszámítása, azonban a digitális iker megoldás pontos pénzügyi hatását csupán a bevételek növekedésével és vonzó megtérüléssel (ROI) írja le [13]. Ugyanezeket az eredményeket tárgyalja a [14], ahol a digitális ikreket a 200 fűtőtornyot és 300 kutat magában foglaló olajmezők menedzsmentjének javítására használják. Ez a kutatás rávilágít a valós idejű big data megoldások fontosságára. A kőolaj-kitermelés területén a digitális iker technológia alkalmazását használták a fejlesztési folyamatok pénzügyi mutatókká alakítására [15]. A digitális iker technológia alkalmazása támogatja hidak állapotának felmérését. Ez különösen fontos pénzügyi szempontból, mivel a költségvetési döntésekhez olyan mennyiségű információra van szükség, amely a hidak szemrevételezésével nem mindig áll rendelkezésre. Amint azt egy felhőalapú IoT-platform kialakítása is mutatja, a hidak eszközgazdálkodásának és fenntartásának költségei jelentősen csökkenthetők a digitális iker segítségével. A digitális iker alkalmazásának pénzügyi elemzése azt mutatja, hogy az intelligens hidak magas megtérülést biztosíthatnak [16]. A digitális iker alkalmazásának a tipikus területei nem csupán az ipart, hanem a mezőgazdaságot is jelentős mértékben átalakították. A rizsföldeken a növénynövekedést és a növénytermesztést egy digitális iker nyomon követheti és befolyásolhatja az erőforrások, például műtrágyák, növényvédőszer, járművek és emberi erőforrások adaptív ütemezése révén [17]. Amint azt az élelmiszeriparban a digitális iker példája mutatja, a digitális iker alkalmazások egyik fő problémája, hogy nem alkalmazhatók az élelmiszer-feldolgozási technológiák működési szintjén, mivel

bonyolultságukból és sebességükből adódóan nem alkalmasak a valós idejű reagálásra, beavatkozásra. Ez a probléma megoldható az Ipar 4.0 technológiák integrált alkalmazásával, amikor például a gépi tanulási technológiákat integrálják a termékek online minőségi előrejelzéséhez. Ezen gépi tanulási technológiák általában a szenzoroktól edge computing által gyűjtött adatok feldolgozásán alapszanak. [18]. A félévezetőgyártás egy példája igazolja, hogy a digitális iker megoldások gazdaságosságát nagymértékben befolyásolja az, hogy milyen mértékben sikerül a különböző adattípusokat integrálni, strukturált adatokat létrehozni [19]. Az olyan technológiák, mint a felhőalapú számítások, szimuláció, optimalizálás, mesterséges intelligencia, blockchain, okosszenzorok, kiber-fizikai rendszerek, additív gyártás, robotizálás, vizualizálás, quantum computing, big data, virtuális és kiterjesztett valóság, dolgok internete, nanotechnológia, rádiófrekvenciás azonosítás, autonóm járművek, gépi tanulás, mind mint Ipar 4.0 technológiák definiálhatók, és ezen technológiák révén a technológiai, humán és logisztikai erőforrások egy felhőbe integrálhatók [20]. A városi logisztika területén az egyik legfontosabb kezdeményezés a fenntartható energiagazdálkodású városok kialakítása (SEC = sustainable smart energy cities). Ugyan egyedi fejlesztések és technológiák rendelkezésre állnak ezen célok megvalósításához, azonban ezek hatékonysága nagymértékben függ attól, hogy ezen technológiák milyen mértékben, milyen logika mentén, milyen architektúrába foghatók össze. Egy példa azt igazolja, hogy egy többszintes, mesterségesintelligencia-alapú architektúra alkalmas lehet ezen technológiák fizikai és virtuális szinten történő összekapcsolására [21]. Ezen technológiákat, alkalmazásokat és kihívásokat foglalja össze a 3. ábra.



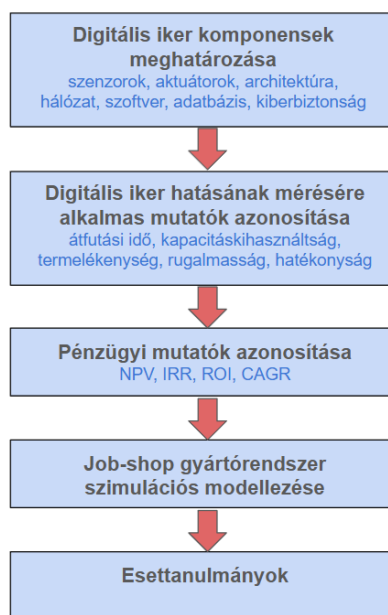
3. ábra. A digitális iker alkalmazásához kapcsolódó technológiák, alkalmazások és kihívások

A nemzetközi szakirodalmi források széles köre tárgyalja a digitális iker alkalmazásának főbb irányvonalait, így például a különböző digitális iker megoldások jellegét, a szabványosítás problémáit, a jellegzetes architektúrákat, az algoritmusokat és az integráció kérdéskörét, azonban csak kevés forrás próbálkozik meg a várható gazdasági haszon meghatározásával. Jelen kutatómunka keretében a szerzők egy olyan ágensalapú szimuláción alapuló módszert dolgoztak ki, mely alkalmas tetszőleges környezetben (jelen esetben job-shop-gyártórendszerben) a különböző típusú digitális iker megoldások befektetésarányos megtérülésének (ROI = Return on Investment) és nettó jelenértékének (NPV = Net Present Value) meghatározására.

Kutatómunkánk főbb pontjai a következőkben foglalhatók össze: (1) indikátorok megfogalmazása a digitális iker gazdasági hatásainak mérésére; (2) a digitális iker alkalmazás költségeit befolyásoló főbb tényezők azonosítása job-shop-gyártórendszerek esetében; (3) ágensalapú szimulációs modell job-shop-gyártórendszer modellezésére az AnyLogic szimulációs modellező szoftver segítségével; (4) a digitális iker gazdasági hatásainak vizsgálata esettanulmány segítségével különböző IoT-megoldások, például különböző azonosítástechnikai megoldások (vonalkód, RFID) esetében befektetés arányos megtérülés és nettó jelenérték segítségével.

3. Digitális iker hatásának szimulációval támogatott vizsgálata

Az általunk kidolgozott értékelési módszer az alábbi főbb lépésekből épül fel:



4. ábra. Értékelés folyamata

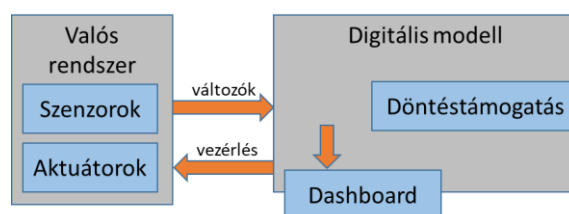
- a digitális iker megoldást felépítő főbb technológiák azonosítása a fontosabb költségkomponensek meghatározása céljából,

- a digitális iker teljesítményfokozó hatásának mérésére alkalmas mutatók meghatározása, mely révén elvégezhető a költségcsökkentésre gyakorolt hatás számítása,
- a főbb pénzügyi mutatószámok azonosítása,
- job-shop-gyártórendszer szimulációs modelljének elkészítése, mely segítségével elemezhető a korábban meghatározott teljesítménymutatók hagyományos és digitális ikerrel támogatott működés esetén,
- digitális iker gazdasági hatásának meghatározása az esettanulmányok kiértékelése segítségével.

Ezen javasolt folyamatot foglalja össze a 4. ábra

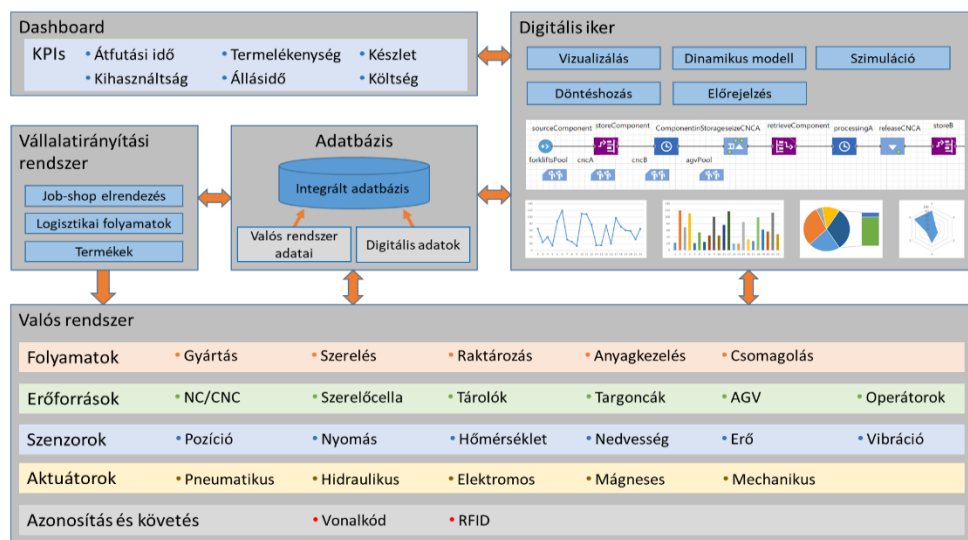
4. Digitális iker komponensek meghatározása

A digitális iker megoldások hardver- és szoftverkomponenseket tartalmaznak. A digitális iker egy fizikai rendszer vagy tárgy digitális reprezentációja, ahol a digitális és a valós rendszer vagy tárgy közötti adatáramlás teljesen automatizált. Egyszerű modellként úgy fogalmazhatunk, hogy a szenzorok állapotinformációkat gyűjtenek a valós rendszerben, és ezeket az adatokat továbbítják a digitális reprezentációba, ahol egy döntéstámogató rendszer döntéseket hoz a valós, fizikai rendszer működésével kapcsolatban, és ezeket a döntéseket vezérlési adatok formájában továbbítják a fizikai rendszer működtetőinek. A dashboard lehetővé teszi az ember-gép interakciót egy speciális grafikus felhasználói felületen (GUI) keresztül, amely a fizikai rendszer kulcsfontosságú teljesítménymutatóira (KPI) összpontosít (5. ábra).



5. ábra. Digitális iker egyszerű struktúrája

Ha elemezni akarjuk a digitális iker bevezetésének hatását a valós rendszer pénzügyi mutatóira, akkor meg kell határozni a digitális iker fő összetevőit, amelyek közé tartoznak a szenzorok, az aktuátorok, az architektúra, a hálózat, a szoftverek, az adatbázis és a kiberbiztonság. Ezek a technológiai egységek a 6. ábrán látható módon határozhatók meg.



6. ábra. A digitális iker koncepció job-shop gyártórendszerben

A valós rendszer magában foglalja az értéklánc folyamatait és a szükséges technológiai, logisztikai és emberi erőforrásokat. A valós rendszer és a digitális iker közötti kapcsolatot szenzorok és aktuátorok biztosítják. A szenzorok folyamatparamétereket töltenek fel az adatbázisba, a digitális iker által hozott döntéseket pedig a job-shop-gyártórendszer technológiai és logisztikai erőforrásaihoz kapcsolódó aktuátorok hajtják végre. A termékek és folyamatok azonosítása és nyomon követése különböző azonosítási technológiák, többek között vonalkód és RFID segítségével végezhető el. A job-shop-gyártórendszer elrendezését, a technológiai és logisztikai folyamatokat és a termékeket a vállalati erőforrás-tervezés (ERP) és a gyártás-végrehajtási rendszer (MES) határozza meg [22]. Az adatbázis integrálja mind a valós rendszerből, mind a digitális ikerből származó adatokat. A digitális iker egy dinamikus szimulációs modellt használ a valós rendszer működésének elemzésére és a valós rendszer lehetséges jövőbeli állapotainak előrejelzésére. A szimulációs modellt folyamatosan frissítik a valós rendszerből gyűjtött szenzoradatok, ezért a szimulációs modell tükrözi a job-shop aktuális állapotát, és ez az aktuális állapot átvihető az ERP- és a MES-rendszerbe is. A döntéshozatali folyamatot egy dashboard támogatja, amely egy olyan GUI, amely magában foglalja az ember-gép interakciós modult és a KPI-k, például az átfutási idő, a termelékenység, a készlet, a kapacitáskihasználás, a technológiai és logisztikai erőforrások üresjárat ideje és a működési költségek vizualizálását.

A digitális megoldások beruházási költségei magukban foglalják a szenzorok, az aktuátorok, a hálózat, a szoftverek, az adatbázis és a kiberbiztonság telepítési költségeit. Az IoT-megoldásokban használt érzékelők (közelség, mozgás, foglaltság, fény, hőmérséklet, páratartalom stb.) egyre olcsóbbak [23]. Az olcsó érzékelők esetében darabonként 0,5 EUR alatti árakról beszélhetünk, de a nagy érzékenységű, nagy pontosságú professzionális érzékelők esetében az árak sokkal magasabbak.

Az aktuátorok a valós rendszerek drága részei, például gyártórendszerek NC- és CNC-gépeinek, valamint az automatizált anyagmozgató gépeknek az aktuátorai darabonként 10–3000 EUR között mozoghatnak, és ez az ár az aktuátor típusától függ (hidraulikus, pneumatikus, elektromos, termikus, mágneses, mechanikus stb.).

Az IoT-megoldás hálózati költségei a kapcsolat típusától függenek. A rövid hatótávolságú vezeték nélküli (wifi, Bluetooth, NFC), az alacsony energiaigényű, nagy hatótávolságú (LPWAN = low power wide area network) és a celluláris megoldások egyaránt alkalmazhatók. A celluláris hálózat esetében 0,04 EUR/MB hálózati költségről beszélhetünk, de a beágyazott szoftver költségét is figyelembe kell venni, amely 10 000–30 000 EUR költséget jelenthet a megoldás jellegétől függően [24].

Az adatbázis költségének becslése összetett probléma, mivel a költségek széles skáláját kell figyelembe venni, beleértve a tárolási költségeket, a használati költségeket, az olvasási és írási műveletek költségeit. Példaként [25] a Google Cloud Bigtable és az Amazon DynamoDB közötti költség-összehasonlítás jelentős különbséget mutat a kapacitás- és a használati költségek között (3164 USD havi összköltség a Google Cloud Bigtable és 11 353 USD havi összköltség az Amazon DynamoDB esetében).

A kiberbiztonsági megoldások általában a zsarolóprogramok, az adatlopások, az adathalász-támadások, a DNS-eltérítések, a kriptolopások, a belső fenyegetések és a túlterheléses támadások elleni védelemre összpontosítanak. A kiberbiztonság költségeit jelentősen befolyásolja a vállalat mérete, az adatok típusa és érzékenysége, a kapcsolódó szolgáltatások, és a következő költségtartományokban határozhatók meg [26]:

- tűzfalak professzionális konfigurációval és előfizetéssel: 1500–15 000 EUR,
- végpontészlelés és válaszadás: 5–8 EUR felhasználónként havonta és 9–18 EUR szerverenként havonta,
- vírusirtó szoftver: 3–5 EUR havonta felhasználónként és 5–8 EUR szerverenként havonta, felügyelet 100–2000 EUR havonta,
- e-mail-védelem: 3–6 EUR/felhasználó/hónap,
- kétfaktoros hitelesítés: < 10 EUR felhasználónként havonta,
- hardveres biztonsági kulcs: 30–60 EUR darabonként.

Amin az IoT-megoldás összetevőinek fent említett költségei mutatják, a digitális iker beruházási és üzemeltetési költségeinek becslése nagyon összetett probléma, mivel a költségbecslést jelentősen befolyásolják a felhasznált összetevők, az adatok mérete és típusa, a kapcsolódó szolgáltatások.

4.1 A digitális iker hatásának mérésére alkalmas mutatók meghatározása

A digitális iker job-shop-gyártórendszer teljesítményére gyakorolt hatásának mérésére számos mérőszámot lehet alkalmazni, melyek közül az alábbiakat szeretnénk kiemelni:

- legyártott termékek száma: ez a teljesítménymutató a vevői igények teljesítési arányának mérésére használható,
- munkaórák száma: ez a teljesítménymutató az erőforrások kihasználtságának mérésére használható,

- hibaarány vagy pontatlanság: ez a teljesítménymutató a gyártási folyamatok minőségének mérésére használható, például a különböző azonosítási megoldások használatával elkerülhetjük a téves azonosítás okozta pontatlanságokat,
- hibák a gyártórendszerben: ez a teljesítménymutató a gyártási folyamat és az erőforrások nyomon követésének minőségét tükrözheti, például a digitális iker telepítése lehetővé teszi a gyártórendszer valós idejű folyamatos nyomon követését és az erőforrások jövőbeli állapotának előrejelzését,
- le nem gyártott tételek száma: ez a teljesítménymutató a vevői igények teljesítési arányának mérésére használható,
- technológiai, anyagmozgatási és emberi erőforrások kihasználtsága: ez a teljesítménymutató a folyamatirányítás minőségét mutatja,
- készletszint és készletköltség: segítségével értékelhetők ki az anyagmozgatási műveletek, így a beszerzési, raktározási és elosztási folyamatok,
- gyártási költség: ez a teljesítménymutató a gyártási műveletek teljesítményét tükrözi,
- anyagmozgatási költség: ez a teljesítménymutató a logisztikai műveletek teljesítményét tükrözi.

Ezek a teljesítménymutatók lehetővé teszik a digitális iker job-shop gyártási rendszerre gyakorolt hatásának mérését.

3.1. Pénzügyi mérőszámok definiálása

Jelen tanulmány keretében a digitális iker job-shop-gyártórendszerre gyakorolt hatásainak gazdasági vonzatát az alábbi mutatókkal vizsgáljuk: befektetésarányos megtérülés ($ROI = \text{Return on Investment}$), nettó jelenérték ($NPV = \text{Net Present Value}$) belső megtérülési ráta ($IRR = \text{Internal Rate of Return}$) és összetett éves növekedési ráta ($CAGR = \text{Compound Annual Growth Rate}$).

Befektetésarányos megtérülés (ROI): A befektetésarányos megtérülés a befektetés jövedelmezőségét tükrözi a befektetés jelenlegi értékétől és a befektetés költségétől függően az alábbiak szerint [27]:

$$ROI = \frac{FVI - IVI}{KI}, \quad (1)$$

ahol ROI a befektetésarányos megtérülés, FVI a befektetés befejező értéke, IVI a beruházás kezdeti értéke és KI a befektetés költsége.

Nettó jelenérték (NPV): A nettó jelenérték a digitális iker létrehozásához befektetett költségek és a különböző időpontokban jelentkező megtérülések alapján alkalmas egy hosszú távú digitális iker alkalmazás megtérülésének jellemzésére a vizsgált időszakok számának, a diszkontrátának, a befektetés mértékének és a befektetés eredményeként jelentkező bevételeknek a függvényében [28]:

$$NPV = \sum_{t=0}^T \frac{CI - CO}{(1+\alpha)^t} - I, \quad (2)$$

ahol NPV a nettó jelenérték, CI nettó bevétel egy időszakban, CO nettó kiadás egy időszakban, α diszkontráta vagy kamatláb, melyet az határoz meg, hogy milyen költsége van a befektetett tőkének, vagy hogy milyen egyéb hozammal kecsegtethet a tőke más befektetés esetén, T a vizsgálat időtartama, I a kezdeti beruházás. Ha NPV pozitív, akkor a beruházás megvalósítható, míg ha NPV negatív, akkor a beruházás

vagyonvesztéssel jár, ezért nem célszerű gazdasági szempontból megvalósítani. Jelen esettanulmányban CI és CO értéke konstans.

Belső megtérülési ráta (IRR): A belső megtérülési rátaérték az a kamatláb, amely mellett a befektetés nettó jelenértéke éppen nulla, azaz meghatározása az alábbi összefüggésből lehetséges [29]:

$$\sum_{t=0}^T \frac{CI-CO}{(1+\alpha)^t} - I = 0. \quad (3)$$

A belső megtérülési ráta segíthet a különböző technológiai megoldásokkal megvalósított digitális iker megoldások közül a gazdasági szempontból legjobb kiválasztásában, hiszen több változat közül azt érdemes választani, mely esetében a belső megtérülési ráta a legnagyobb. A belső megtérülési ráta egyszerűen számítható például az Excel BMR-függvényével.

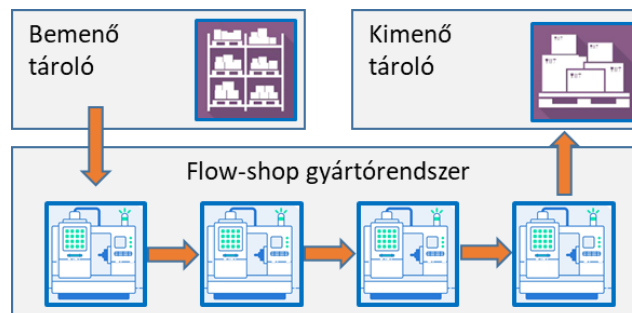
Összetett éves növekedési ráta ($CAGR$): Az összetett éves növekedési ráta egy befektetés több időszakon keresztül történő megtérülésének meghatározására alkalmas mérőszám, mely sokkal egyszerűbben meghatározható, mint például a belső megtérülési ráta [30]:

$$CAGR = \left(\frac{FV}{IV} \right)^{\frac{1}{T}} - 1, \quad (4)$$

ahol $CAGR$ az összetett éves növekedési ráta, FV a vizsgált rendszer végső értéke, IV a vizsgált rendszer kiinduló értéke és T a figyelembe vett időszakok, például évek száma.

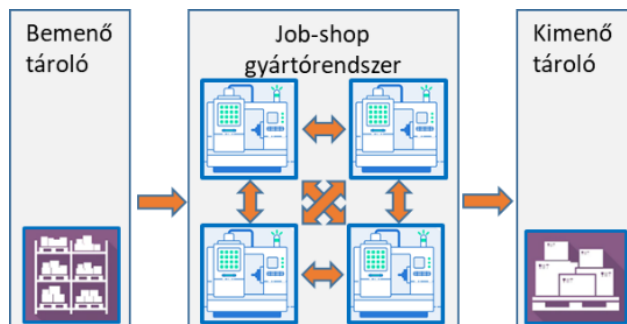
4.2 Job-shop gyártórendszer szimulációs modellje

A gyártórendszereknek számos típusa ismert, ezek közül ki szeretnénk emelni kettőt: a flow-shop- és a job-shop-gyártórendszereket. Flow-shop-gyártórendszer esetében a gyártási műveletek egy rögzített lineáris struktúrában vannak elrendezve (7. ábra).



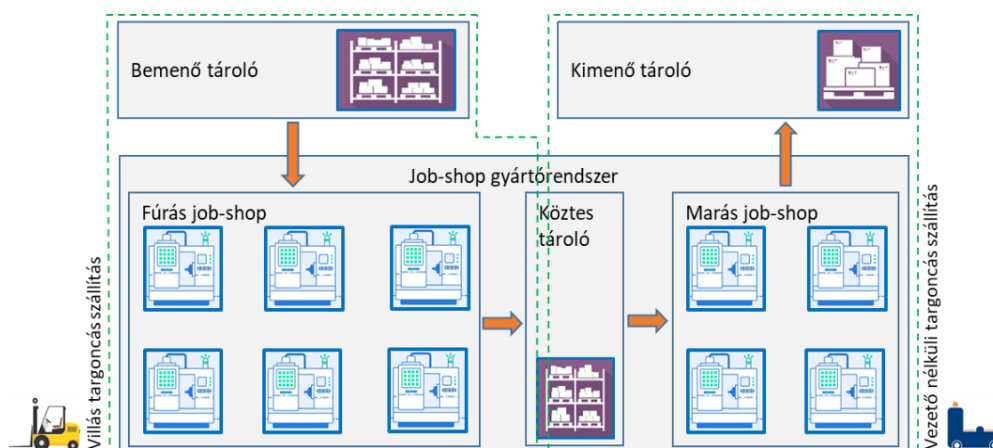
7. ábra. Flow-shop rögzített struktúrája

Job-shop gyártási rendszerben a különböző tételek műveleteinek útvonala rugalmas, és ez azt jelenti, hogy minden gyártandó terméknek egyéni gyártási útvonala lehet (8. ábra).



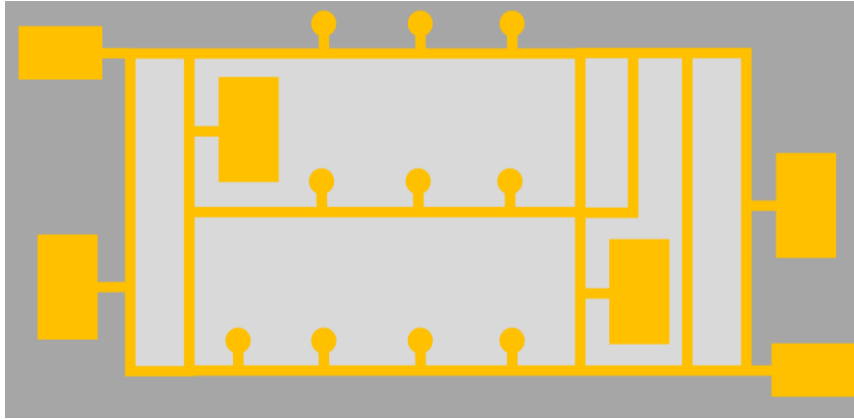
8. ábra. Job-shop rugalmas struktúrája

Kutatómunkánk keretében egy job-shop-gyártórendszer esetében vizsgáljuk meg különböző digitális iker megoldások gazdaságosságát. Az esettanulmányokban egy olyan job-shop-gyártórendszert elemzünk, amely 6 CNC fűrőgépet, 4 CNC marógépet, egy bemeneti tárolót, egy köztes tárolót a fűrési és marási műveletek között, valamint egy kimeneti tárolót tartalmaz (9. ábra).



9. ábra. A job-shop-gyártórendszer struktúrája az esettanulmányban

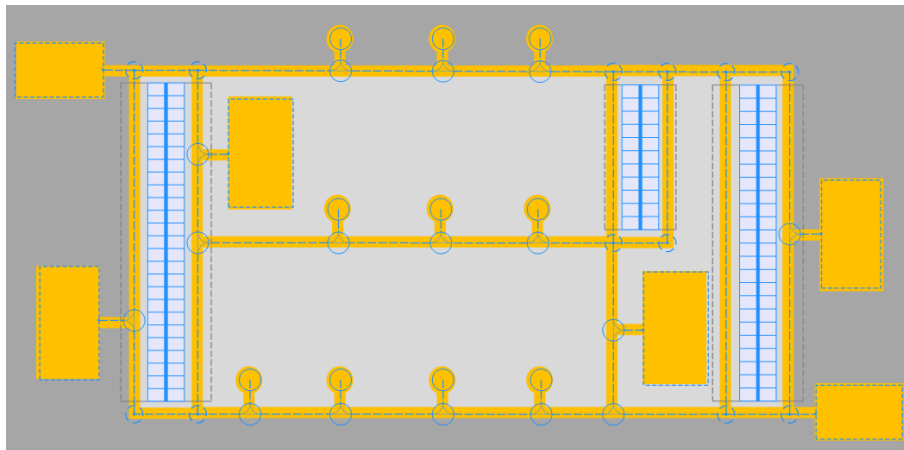
A modellépítés első fázisa a job-shop-gyártórendszer elrendezésének meghatározása, beleértve a maró- és fűrőgépek, raktárak, villás targoncák és vezető nélküli targoncák, valamint a szállítási útvonalak helyét (10. ábra). Az elrendezés bármilyen rajzolószoftver segítségével meghatározható és importálható a szimulációs szoftverbe.



10. ábra. A vizsgált job-shop gyártórendszer layoutja

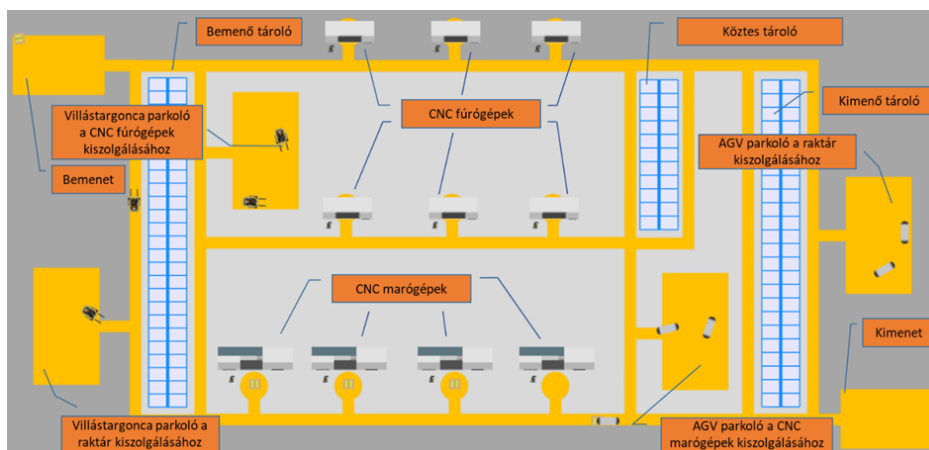
A modellépítés második fázisa a fő útvonalak meghatározása pont csomópontok, téglalap alakú csomópontok és poligonális csomópontok segítségével. A pont csomópontokat a fúró és maró CNC gépek be- és kirakodási helyeinek meghatározására használtuk.

A téglalap alakú és a poligonális csomópontokat a villás targoncák és a vezető nélküli targoncák parkolóinak, a gyártórendszer be- és kimeneti zónáinak, valamint a job-shop gyártórendszer forrásai és nyelői során alkalmaztuk. A pont, téglalap és poligonális csomópontok meghatározása után a következő lépés a szállítási útvonalak meghatározása a szimulációs szoftver útvonal funkciójának segítségével. Az útvonalak a gyártási és anyagmozgatási erőforrásoknak a szállítójához való kapcsolódási pontjait ábrázoló pont, téglalap és poligonális csomópontok között határozhatók meg (11. ábra).



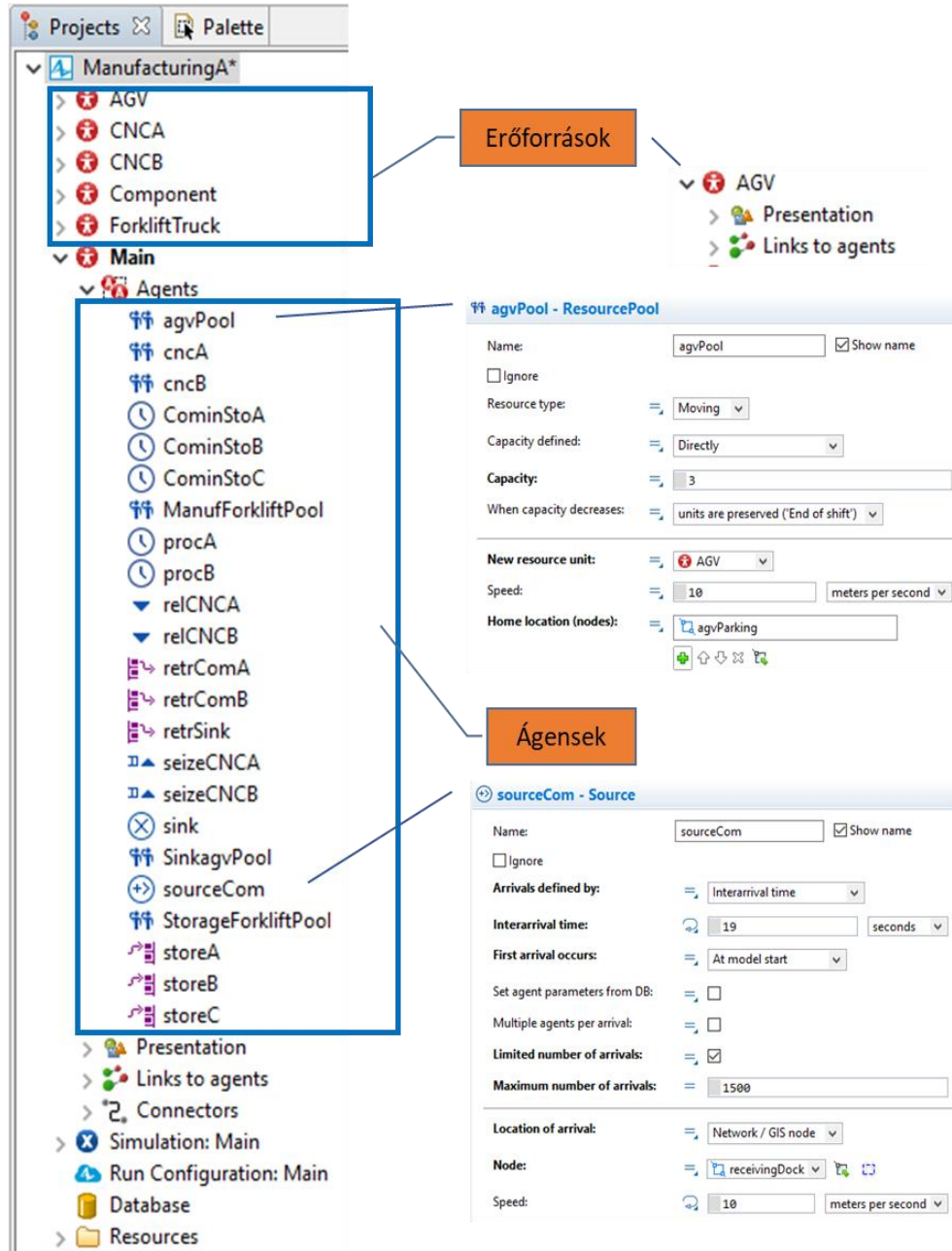
11. ábra. Csomópontok és útvonalak a job-shop-gyártórendszerben

A modellezés harmadik lépése a fizikai objektumok (erőforrások) definiálása. Az AnyLogic szimulációs és modellező szoftvert használtuk a modell elkészítéséhez (12. ábra). Az AnyLogic egy ágensalapú szimulációs szoftver, mely alkalmas nem csupán termelési rendszerek, hanem szinte bármilyen dinamikus folyamat vizsgálatára.



12. ábra. A job-shop gyártórendszer fizikai objektumai

Definiáltunk erőforrásokat a szállítási műveletekhez (AGV és *ForkliftTruck*), a technológiai műveletekhez (CNCA és CNCB) és a legyártandó alkatrészekhez (*Component*) (13. ábra).

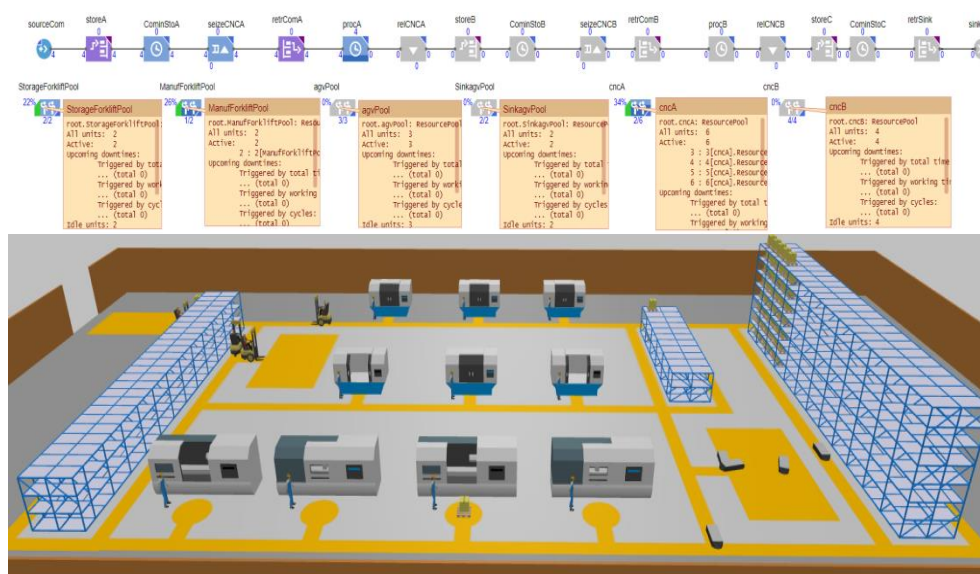


13. ábra. Ágensek listája az elkészült job-shop-modellben

Az erőforrások definiálása során mindazok grafikus reprezentációját, mind azok saját ágenshez való kapcsolódását meg kell adni, úgy ahogy azt a 13. ábra mutatja AGV esetén. A modellezés negyedik lépése az ágensek definiálása. Az ágensek fizikai és

logikai dolgokat egyaránt reprezentálhatnak. Az ágensek megadásakor paramétereket és eseményeket kell definiálni. A modellépítés ezen fázisában definiáltunk ágenseket a szállítási műveletekhez (*agvPool*, *ManufForkliftPool*, *SinkagvPool* és *StorageForkliftPool*), a tárolókhoz (*storeA*, *storeB* és *storeC*), a technológiai erőforrásokhoz (*cncA* és *cncB*), a folyamat inicializálásához és lezárásához (*sourceCom* és *sink*), a tárolási folyamatokhoz (*CominStoA*, *CominStoB* és *CominStoC*), a CNC gépek fűrési és marási műveleteihez (*procA* és *proc B*), a CNC gépek lefoglalásához (*seizeCNCA* és *seizeCNCB*) és a CNC gépek műveletek utáni felszabadításához (*relCNCA* és *relCNCB*). Két példa látható az ágensek meghatározására a 13. ábrán. Ez a szimulációs modell alkalmas különböző digitális iker alkalmazások job-shop-gyártórendszerre gyakorolt hatásának elemzésére a teljesítménymutatók szempontjából.

A szimuláció futtatása közben lehetőség van az ágensek működésének elemzésére (lásd a 14. ábra felső részét), az erőforrások statisztikáinak, így a kapacitáskihasználtságnak, az aktuálisan aktív erőforrásoknak, az összes legyártott termék mennyiségének megtekintésére (lásd a 14. ábra középső részét) és a teljes fizikai folyamat 3D-s vizualizációjára (lásd a 14. ábra alsó részét).



14. ábra. Job-shop-gyártórendszer ágensei és 3D animációja

4.3 Esettanulmányok és eredmények

Az elemzés keretében három különböző esetet hasonlítottunk össze, hogy bemutassuk a különböző digitális iker megoldások pénzügyi hatását. Az első eset egy hagyományos, digitális iker bevezetése nélküli job-shop gyártási rendszer költségeit mutatja

be. Ebben az esetben a következő paraméterek adottak (lásd az 1. táblázatban a nem kiemelt számokat):

- n : naponta gyártandó termékek mennyisége [darab/nap],
- w : éves munkanapok száma [nap/év],
- c^I : termékenkénti belső költség [EUR/darab], mely a termék előállításának önköltségét fejezi ki,
- c^R : termékenkénti pótlási költség [EUR/darab],
- c^P : termékenkénti büntetés [EUR/darab],
- c^S : termékenkénti szállítási költség [EUR/darab], mely a gyártórendszer hibája miatt nem előállított termékek utólagos szállítására vonatkozik,
- c^W : termékenkénti tárolási költség [EUR/darab], mely a gyártórendszer hibája miatt nem előállított termékek utólagos tárolására vonatkozik,
- c^M : átlagos fajlagos karbantartási költség [EUR/karbantartás],
- I : tervezett éves bevétel [EUR/év].

Ezen hagyományos megoldás esetében a gyártórendszer pontatlansága $\alpha_1 = 2,50\%$, ami azt jelenti, hogy a legyártott termékek 2.50%-a hibás, vagy nem található a rendszerben (például egy nem megfelelően kialakított azonosítási és termékkövetési rendszer miatt), míg a gyártórendszer meghibásodásának valószínűsége $\beta_1 = 3,75\%$ (lásd a kék színnel kiemelt számokat az 1. táblázatban). Ezen bemenő paraméterek alapján a következő paraméterek határozhatók meg a job-shop gyártórendszer esetében (lásd a sárga színnel kiemelt számokat az 1. táblázatban):

- évente gyártandó termékek mennyisége:

$$N = n \cdot w, \quad (5)$$

- évente nem legyártott termékek mennyisége:

$$N^{NOT} = n \cdot \beta_1 + (1 - \beta_1) \cdot n \cdot \alpha_1, \quad (6)$$

- évente elvesztett termékérték:

$$v^{LOST} = N^{NOT} \cdot c^I, \quad (7)$$

- éves szintű pótlási költség:

$$C^R = N^{NOT} \cdot c^R, \quad (8)$$

- éves szintű büntetés a nem, későn, vagy hibásan legyártott termékek miatt:

$$C^P = N^{NOT} \cdot c^P, \quad (9)$$

- a pótlandó termékek miatti többlettárolási és szállítási költség éves szinten:

$$C^W = N^{NOT} \cdot c^W, \text{ és } C^S = N^{NOT} \cdot c^S \quad (10)$$

- éves karbantartások száma, mely a meghibásodások százalékos aránya alapján becsülhető:

$$n^M = \beta_1 \cdot 1000, \quad (11)$$

- éves karbantartási költség:

$$C^M = c^M \cdot n^M. \quad (12)$$

A fent említett paraméterek alapján a hagyományos job-shop gyártási rendszer éves nyereségét a következőképpen lehet kiszámítani (lásd az 1. táblázat zölddel kiemelt számait):

$$P_1 = I - v^{LOST} - C^R - C^P - C^W - C^S - C^M. \quad (13)$$

1. táblázat

Hagyományos, digitális iker nélküli job-shop-gyártórendszer vizsgálata

Job-shop gyártórendszer digitális iker nélkül		
Napi gyártandó mennyiség	[darab/nap]	1220,00
Éves munkanapok száma	[darab/év]	260,00
Éves gyártandó termékmennyiség	[darab/év]	317200,00
Pontatlanság	[%]	2,50%
Gyártórendszer hibaarány	[%]	3,75%
Nem legyártott termékek	[darab/év]	19527,63
Belső költség	[EUR/darab]	2,45
Elveszett termékérték	[EUR/év]	47842,68
Fajlagos pótlási költség	[EUR/darab]	2,82
Pótlási költség	[EUR/év]	55067,90
Fajlagos szállítási költség	[EUR/darab]	0,95
Szállítási költség	[EUR/év]	18551,24
Büntetés	[EUR/év]	4784,27
Fajlagos tárolási költség	[EUR/darab]	0,35
Tárolási költség	[EUR/év]	6834,67
Karbantartások száma	[karbantartás/év]	37,50
Átlagos karbantartási költség	[EUR/karbantartás]	2000,0
Éves karbantartási költség	[EUR/év]	75000,0
Bevétel	[EUR/év]	500000,00
Teljes költség	[EUR/év]	208080,76
Nyereség	[EUR/év]	291919,24

A második esettanulmány azt mutatja be, hogy a digitális iker bevezetése, amely a vonalkód-technológiát használja a termékek azonosítására és nyomon követésére a job-shop-gyártórendszerben, milyen hatással van a pénzügyi mutatókra. Ebben az esetben a gyártórendszer pontatlansága csökkenthető a vonalkód technológia használatával. Amint a 2. táblázat mutatja, ebben az esetben a gyártási rendszer pontatlansága

1,20%, míg a gyártási rendszerben a hiba körülbelül 2,20%. A bemeneti paramétereket, a gyártással és logisztikával kapcsolatos paramétereket, a teljes költséget és a nyereséget szintén a 2. táblázat mutatja be az (5–13) egyenletek alapján kiszámítva.

A második esettanulmány esetében a digitális iker telepítésének költsége 200 000 EUR, a vizsgálati idő 4 év, a vonalkódos azonosítás és nyomon követés éves címke-költsége 15 000 EUR, a kamatláb pedig 7%. A vonalkódos azonosítást és nyomon követést tartalmazó digitális iker megoldás telepítési és üzemeltetési költségei alapján a fent leírt beruházási mutatókat a következőképpen használhatjuk.

2. táblázat

*Digitális ikerrel támogatott job-shop-gyártórendszer vizsgálata
vonalkódos termékazonosítási és termékkövetési rendszer alkalmazásával*

Job-shop gyártórendszer digitális ikerrel (vonalkódos azonosítás)		
Napi gyártandó mennyiség	[darab/nap]	1220,00
Éves munkanapok száma	[darab/év]	260,00
Éves gyártandó termékmennyiség	[darab/év]	317200,00
Pontatlanság	[%]	1,20%
Gyártórendszer hibaarány	[%]	2,20%
Nem legyártott termékek	[darab/év]	10701,06
Belső költség	[EUR/darab]	2,45
Elveszett termékérték	[EUR/év]	26217,60
Fajlagos pótlási költség	[EUR/darab]	2,82
Pótlási költség	[EUR/év]	30176,99
Fajlagos szállítási költség	[EUR/darab]	0,95
Szállítási költség	[EUR/év]	10166,02
Büntetés	[EUR/év]	2621,76
Fajlagos tárolási költség	[EUR/darab]	0,35
Tárolási költség	[EUR/év]	3745,37
Karbantartások száma	[karbantartás/év]	22,00
Átlagos karbantartási költség	[EUR/karbantartás]	2000,0
Éves karbantartási költség	[EUR/év]	44000,0
Bevétel	[EUR/év]	500000,00
Teljes költség	[EUR/év]	116927,72
Nyeresség	[EUR/év]	383072,28

A digitális iker megtérülésének kiszámítása esetén a kiindulási értéket a digitális iker használata által eredményezett többletnyeresség jelenti. A beruházás költsége magában foglalja a telepítés költségét és az éves üzemeltetési költséget. A vonalkód- és RFID-megoldások elemzése esetén ez az éves üzemeltetési költség magában foglalja az éves címke- vagy RFID-tag költséget.

A digitális iker NPV-értékének kiszámításakor a nettó pénzbevétele a digitális iker alkalmazása által eredményezett extraprofit jelenti, a nettó pénzkidadás az éves

címke- vagy RFID-tag költség, míg a digitális iker telepítésének költsége beruházási költségként vehető figyelembe:

$$NPV = \sum_{t=0}^T \frac{CI-CO}{(1+\alpha)^t} - I, \quad (14)$$

ahol I a vizsgált digitális iker megoldás beruházási költsége.

A digitális iker alkalmazás IRR -értéke az alábbi egyenletből számítható:

$$\sum_{t=0}^T \frac{CI-CO}{(1+IRR)^t} - I = 0. \quad (15)$$

Az egyenlet megoldásához az Excel BMR függvényét használtuk, amely a belső megtérülési rátát adja vissza pénzáramlások sorozatára. E pénzügyi mutatók kiszámított értékeit a 3. táblázat tartalmazza.

3. táblázat

A pénzügyi mutatók értékei vonalkódos termékazonosítással és termékkövetéssel támogatott digitális iker megoldás esetén

Gazdasági indikátor		Érték
Nettó jelenérték (NPV)	[EUR]	37623
Befektetésarányos megtérülés (ROI)	[EUR]	40%
Belső megtérülési ráta (IRR)	[%]	19%
Összetett éves növekedési ráta (CAGR)	[%]	7,03%

A harmadik eset a digitális iker bevezetésének azt a változatát mutatja be, amikor RFID-technológiát használunk a termékek azonosítására és nyomon követésére a job-shop-gyártórendszerben. Ebben az esetben a gyártórendszer pontatlansága jelentősen csökkenthető az RFID-technológia használatával. Amint azt a 4. táblázat mutatja, ebben az esetben a gyártórendszer pontatlansága 0,50%, míg a gyártási rendszerben a hiba körülbelül 1,80%. A bemeneti paraméterek, a gyártással és a logisztikával kapcsolatos paraméterek, a teljes költség és a nyereség szintén a 4. táblázatban láthatóak, amelyeket az (5–13) egyenletek alapján számoltunk ki.

4. táblázat

Digitális ikerrel támogatott job-shop gyártórendszer vizsgálata RFID termékazonosítási és termékkövetési rendszer alkalmazásával

Job-shop gyártórendszer digitális ikerrel (RFID azonosítás)		
Napi gyártandó mennyiség	[darab/nap]	1220,00
Éves munkanapok száma	[darab/év]	260,00
Éves gyártandó termékmenyiség	[darab/év]	317200,00
Pontatlanság	[%]	0,50%
Gyártórendszer hibaarány	[%]	1,80%
Nem legyártott termékek	[darab/év]	7267,05
Belső költség	[EUR/darab]	2,45
Elveszett termékérték	[EUR/év]	17804,28
Fajlagos pótlási költség	[EUR/darab]	2,82

Pótlási költség	[EUR/év]	20493,09
Fajlagos szállítási költség	[EUR/darab]	0,95
Szállítási költség	[EUR/év]	6903,70
Büntetés	[EUR/év]	1780,49
Fajlagos tárolási költség	[EUR/darab]	0,35
Tárolási költség	[EUR/év]	2543,47
Karbantartások száma	[karbantartás/év]	18,00
Átlagos karbantartási költség	[EUR/karbantartás]	2000,0
Éves karbantartási költség	[EUR/év]	36000,0
Bevétel	[EUR/év]	500000,00
Teljes költség	[EUR/év]	85524,96
Nyereség	[EUR/év]	414475,04

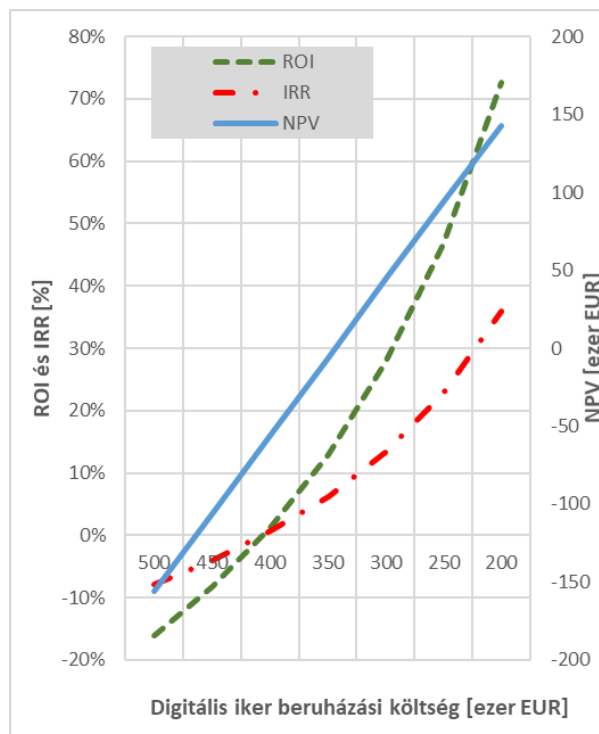
A harmadik esettanulmány esetében a digitális iker telepítésének költsége 220 000 EUR, a vizsgálati idő 4 év, az RFID alapú azonosítás és nyomonkövetés éves költsége 21 000 EUR, a kamatláb pedig 7%. A számított pénzügyi mutatókat az 5. táblázat foglalja össze.

5. táblázat

A pénzügyi mutatók értékei RFID alapú termékazonosítással és termékkövetéssel támogatott digitális iker megoldás esetén

Gazdasági indikátor		Érték
Nettó jelenérték (NPV)	[EUR]	123991
Befektetésarányos megtérülés (ROI)	[EUR]	61%
Belső megtérülési ráta (IRR)	[%]	30%
Összetett éves növekedési ráta (CAGR)	[%]	9,16%

Amint a három esettanulmány elemzése mutatja, a digitális iker megoldások jelentősen növelhetik a job-shop-gyártórendszerek költséghatékonyságát. Ezt a költséghatékonyságot a digitális iker megoldás összetevői befolyásolják. Ebben az elemzésben a vonalkód- és RFID-technológiák alkalmazására összpontosítottunk a job-shop gyártási rendszerben gyártandó termékek azonosítási és nyomon követési feladatainak elvégzésére. A 15. ábra mutatja a digitális iker telepítési költségének hatását néhány beruházási mutatóra, így a ROI-ra, az NPV-re és az IRR-re.



15. ábra. Digitális iker beruházási költségének hatása a ROI, IRR és NPV értékre

4. Összefoglalás

A cikk keretében a szerzők egy olyan új módszert ismertettek, amelynek segítségével elemezhető különböző digitális iker megoldások bevezetésének hatása a job-shop-gyártórendszerek költséghatékonyságára. A módszer a következő fő fázisokat foglalja magában: (1) a digitális iker összetevőinek elemzése a legfontosabb költségtényezők meghatározásához; (2) a digitális iker hatásának azonosítása a job-shop-gyártórendszer teljesítménymutatóira; (3) a legfontosabb pénzügyi mutatók azonosítása a különböző digitális iker megoldások költségére és nyereségre gyakorolt hatásának elemzése érdekében; (4) a job-shop-gyártórendszer szimulációja a különböző IoT-technológiák (esetünkben különböző azonosítási technológiák, így vonalkód és RFID) teljesítményre gyakorolt hatásának mérésére; (5) esettanulmányok elemzése a potenciális digitális iker megoldások összehasonlítása érdekében.

A kutatás a gyakorlati jelentőségén túl stratégiai jelentőséggel is bírhat, hiszen:

- a szimuláción alapuló elemzés támogathatja a digitális iker megoldások bevezetésével kapcsolatos vezetői döntéseket;
- a megfelelő IoT-megoldások (jelen esetben a vonalkód vagy az RFID integrálása a digitális ikerbe) elemzése lehetővé teszi a megfelelő és legköltséghatékonnyabb technológiák kiválasztására vonatkozó döntés támogatását;

- a digitális ikernek a job-shop gyártórendszer technológiai és logisztikai teljesítményére gyakorolt hatásának elemzése a hatékonyság növelése érdekében a technológiai és logisztikai folyamatok átalakításához vezethet. Jövőbeni kutatási irányként lehetőség van módszerünk kiterjesztésére és más gyártási rendszerek, például a flow-shop gyártás vagy az U-alakú gyártási rendszerek elemzésére.

Köszönetnyilvánítás

A Kulturális és Innovációs Minisztérium ÚNKP-22-1 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.”



Irodalomjegyzék

- [1] *Digital twin market by enterprise, application, industry and geography – global forecast to 2027*. URL: www.marketsandmarkets.com. Letöltve: 2023/02/09.
- [2] Fuller, A., Fan, Z., Day, C., Barlow, C. (2020). *Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research*. IEEE Explore, 8, pp. 108952–108971. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998358>
- [3] Madni, A., Madni, C., Lucero, S. (2019). Leveraging Digital Twin Technology in Model-Based Systems Engineering. *Systems*, 7 (1), 7. <https://doi.org/10.3390/systems7010007>
- [4] Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., Sihn, W. (2019). Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC PapersOnLine*, 51 (11), pp. 1016–1022. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474>
- [5] Urbas, U., Hrga, T., Povh, J., Vukašinović, N. (2022). Novel alignment method for optical 3D gear metrology of spur gears with a plain borehole. *Measurement*, 192, 110839. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.110839>
- [6] Schuh, G., Bergweiler, G., Chougule, M.V., Fiedler, F. (2021). Effects of Digital Twin Simulation Modelling on a Flexible and Fixtureless Production Concept in Automotive Body Shops. *Procedia CIRP*, 104, pp. 768–773. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.11.129>
- [7] Udugama, I. A., Kelton, W., Bayer, C. (2023). Digital twins in food processing: A conceptual approach to developing multi-layer digital models. *Digital Chemical Engineering*, 7, p. 100087. <https://doi.org/10.1016/j.dche.2023.100087>
- [8] Purcell, W., Neubauer, T. (2023). Digital Twins in Agriculture: A State-of-the-art review. *Smart Agricultural Technology*, 3, p. 100094. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100094>

-
- [9] Manocha, A., Afaq, Y., Bhatia, M. (2023). Digital Twin-assisted Blockchain-inspired irregular event analysis for eldercare. *Knowledge-Based Systems*, 260, p. 110138. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2022.110138>
- [10] Zuhr, P., Rissmann, L., Meißner, S. (2022). Framework for planning and implementation of Digital Process Twins in the field of internal logistics. *IFAC-PapersOnLine*, 55 (10), pp. 2221–2227. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.10.038>
- [11] Xie, X., Lu, Q., Parlikad, A. K., Schooling, J. M. (2020). Digital Twin Enabled Asset Anomaly Detection for Building Facility Management. *IFAC-PapersOnLine*, 53 (3), pp. 380–385. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.11.061>
- [12] Wong, J., Hoong, P., Teo, E., Lin, A. (2022). Digital twin: A Conceptualization of the Task-Technology Fit for Individual Users in the Building Maintenance Sector. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1101 (9), p. 092041. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1101/9/092041>
- [13] Kumar, S. M., Al Mahmoud, M. A. H., Al Yahyae, N. (2022). Gap to Potential Identification through An Online Process Digital Twin. *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference*, Article ID: SPE-211130-MS, Society of Petroleum Engineers, Abu Dhabi. <https://doi.org/10.2118/211130-MS>
- [14] Lai, W., Zhang, H., Jiang, D., Wang, Y., Wang, R., Zhu, J., Chen, Q., Gao, Y., Li, W., Xie, D. (2022). Digital Twin and Big Data Technologies Benefit Oilfield Management. *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference*, Article ID: SPE-211116-MS, Society of Petroleum Engineers, Abu Dhabi. <https://doi.org/10.2118/211116-MS>
- [15] Aslanyan, A., Popov, A., Zhdanov, I., Pakhomov, E., Gulyaev, D., Farakhova, R., Guss, R., Dementeva, M. (2022). Multiscenario Development Planning by Means of the Digital Twin of the Petroleum Field. *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference*, Article ID: SPE-208970-MS, Society of Petroleum Engineers, Abu Dhabi, 2022. <https://doi.org/10.2118/208970-MS>
- [16] Westcott, B. J., Hag-Elsafi, O., Mosafarchi, G., Alampalli, S. (2021). Lifting load restrictions on the NYS Fort Plain Bridge: A case study in SHM and the internet of things. *10th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure: Transferring Research into Practice*, pp. 1135–1139, International Society for Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure, Porto, 2021.
- [17] Skobelev, P., Tabachinskiy, A., Simonova, E., Lee, T.-R., Zhilyaev, A., Laryukhin, V. (2021). Digital twin of rice as a decision-making service for precise farming, based on environmental datasets from the fields. *Proceedings of ITNT 2021 – 7th IEEE International Conference on Information Technology and Nanotechnology*, pp. 1–8, Samara, Russian Federation, IEEE. <https://doi.org/10.1109/ITNT52450.2021.9649038>
- [18] Eppinger, T., Longwell, G., Mas, P., Goodheart, K., Badiali, U., Aglave, R. (2021). Increase food production efficiency using the executable Digital Twin (xDT). *Chemical Engineering Transactions*, 87, pp. 37–42.
- [19] Behnke, J. (2020). Digital Transformation's Impact on Smart Manufacturing. *IEEE International Symposium on Semiconductor Manufacturing Conference Proceedings*, p. 9377506. <https://doi.org/10.1109/ISSM51728.2020.9377506>

-
- [20] Venkateswaran, N.: Industry 4.0 solutions – A pathway to use smart technologies / build smart factories. *International Journal of Management*, 11 (2), pp. 132–140.
- [21] Park, S., Lee, S., Park, S., Park, S. (2019). AI-based physical and virtual platform with 5-layered architecture for sustainable smart energy city development. *Sustainability*, 11 (16), pp. 4479. <https://doi.org/10.3390/su11164479>
- [22] Qi, Q., Tao, F., Hu, T., Anwer, N., Liu, A., Wei, Y., Wang, L., Nee, A.Y.C. (2021). Enabling technologies and tools for digital twin. *Journal of Manufacturing Systems*, 58 (B), pp. 3–21. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.10.001>
- [23] Dukes, E.: The Cost of IoT Sensors Is Dropping Fast. URL: <https://www.iofficecorp.com/blog/cost-of-iot-sensors>. Letöltve: 2023/02/24.
- [24] Klubnink, A.: How much does IoT cost? URL: <https://itrexgroup.com/blog/how-much-iot-cost-factors-challenges/>. Letöltve: 2023/02/24.
- [25] How to Estimate Database Costs in 2022. URL: https://idea island.io/database_cost_estimation/. Letöltve: 2023/02/24.
- [26] How Much Does Cyber Security Cost? Common Cyber Security Expenses & Fees. URL: <https://www.provenda.com/blog/cyber-security-cost-expenses-fees/> Letöltve: 2023/02/24.
- [27] Fernando, J. Return on Investment (ROI): How to Calculate It and What It Means. URL: <https://www.investopedia.com/terms/r/returnoninvestment.asp>. Letöltve: 2023/01/05.
- [28] Fernando, J. Net Present Value (NPV): What It Means and Steps to Calculate It. URL: <https://www.investopedia.com/terms/n/npv.asp>. Letöltve: 2023/02/12.
- [29] Kenton, W. Rate of Return (RoR) Meaning, Formula, and Examples. URL: <https://www.investopedia.com/terms/r/rateofreturn.asp>. Letöltve: 2023/02/12.
- [30] Fernando, J. Compound Annual Growth Rate (CAGR) Formula and Calculation. URL: <https://www.investopedia.com/terms/c/cagr.asp>. Letöltve: 2023/05/01.