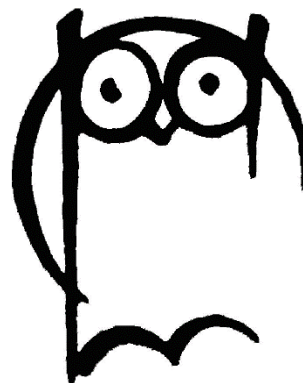


DEBRECENI EGYETEM

MŰSZAKI KAR

GÉPÉSZMÉRNÖKI TANSZÉK



Virtuális gyártás alkalmazása ipari gyártóegységek optimalizálására

Szerző: **Palánkai Emese** BSc hallgató

Témavezető: Sarvajcz Kornél

Tanszékvezető: Dr. Mankovits Tamás

Debrecen

2023.

Tartalomjegyzék

1. Előszó.....	4
2. Bevezetés	4
3. Virtuális komissiózás	5
3.1. A fogalom jelentése	5
3.2. Kialakulását megelőző események	6
3.3. Jelentősége napjainkban	8
4. Virtuális gyártás	8
4.1. Előnyei.....	8
4.2. Alkalmazása.....	9
4.3. Az Ipar 4.0 témakörében végzett kutatások ismertetése.....	10
4.4. Virtuális gyártás az autóiparban	12
5. Az Ipar 5.0 bevezetése	13
6. Tecnomatix Plant Simulation.....	13
6.1. Felhasználása	13
6.2. Felépítése	14
7. A cég valós termelési folyamata	15
7.1. A projekt ismertetése	15
7.2. A gyártósor elemeinek bemutatása.....	15
8. A felépített digitális iker	17
8.1. A valós gyártósor a Tecnomatix Plant Simulation programban.....	18
8.2. A szimulációs modell beállításai	19
8.3. A szimulációs modell folyamatábrája	26
8.4. A szimulációs modell pontosítása	27
8.5. A szimulációs modell kiértékelése	29
9. Javaslatok a gyártósor fejlesztésére	31
10. A kutatás továbbfejlesztési lehetőségei	34

11. Összegzés	35
Köszönetnyilvánítás	35
Irodalomjegyzék.....	36

1. Előszó

Harmadéves gépészmérnök hallgatóként nagy gondot fordítok a járműipari folyamattervező specializáció szaktárgyaira. Egyik kedvelt témaköröm a folyamatelemzés és -tervezés. Ezt az érdeklődésemet szeretném ötvözni a mai modern kor technológiájával és ebből a gondolatból született meg a kutatási témám, amely a gyártóegységek virtualizációját dolgozza fel. Bízom abban, hogy ezáltal közelebb kerülhetek az iparban lejátszódó folyamatokhoz és betekintést nyerhetek a folyamatmérnökök mindennapjaiba. Úgy gondolom, hogy a későbbiekben a kutatási projekt elősegítheti a beilleszkedésemet gépészmérnök néként a mérnöki pályára, valamint felkészíthet a jövőbeli munkám során megjelenő kihívások megoldására.

2. Bevezetés

Napjainkban a korszerű újítások bevezetése a cégek gyártási folyamataiba elengedhetetlen. A világ minden részén gyártanak termékeket, a tömeggyártás eljárásai során a cél a minél több, jó minőségű fogyasztási cikk előállítása minél rövidebb idő alatt. Ennek érdekében a szakemberek megállás nélkül azon dolgoznak, hogy kifejlesszék a gyártórendszerekre alkalmazható legmodernebb technológiákat.

Az iparban kétféle gyártípust különböztethetünk meg digitalizációs felkészültségük alapján. A manapság újonnan épülő vállalatok teljesen digitális alapokról indulnak. Megtervezésük folyamán nagy hangsúlyt fektetnek az innovatív szemléletek beágyazására, illetve a gyártási stratégiák gondos kialakítására. A bennük megvalósított termelési folyamatok nagymértékben automatizáltak, az emberi erőforrások szükséglete háttérbe szorul. Ezzel szemben a másik csoportot az évtizedek óta változatlan elveken működő gyárak képezik, amelyek elavult gyártósorai már kevésbé alakíthatóak. Ezen cégek fejlődésében nagy akadályt jelent, hogy az előállítási módszereik nehezen összeegyeztethetőek a jelenkori technológiákkal. Ezzel a problémával több publikáció, tanulmány és kutatás is foglalkozik, melyekből a későbbiekben feltüntetek néhányat.

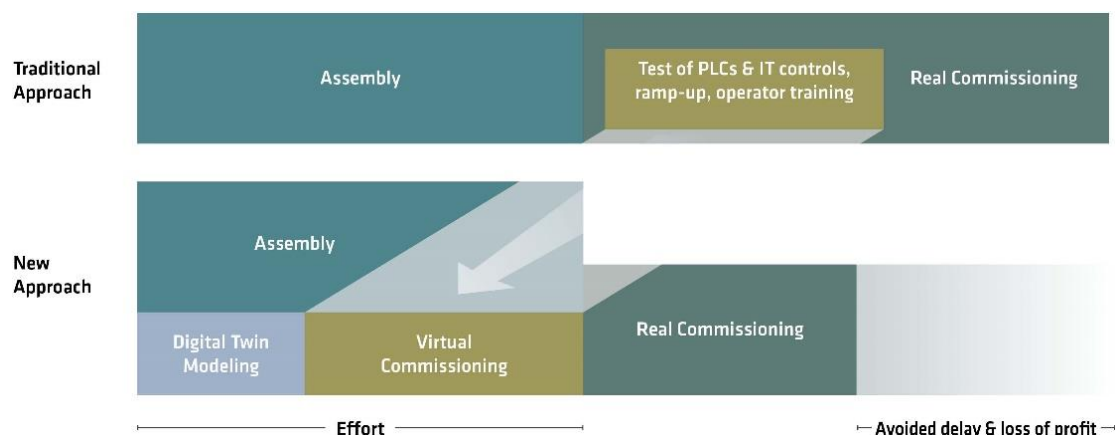
Kutatásom célja, hogy egy hosszú ideje üzemelő cég termelésének korszerűsítésére lehetséges megoldási módszereket dolgozzak ki a virtuális gyártás eszközeinek alkalmazásával. Munkám során sikerült kapcsolatba lépni és közösen dolgozni egy piacvezető nemzetközi vállalattal, amely évtizedek óta ugyanolyan gyártósorokon állítja elő termékeit és nem, vagy csak részben használja az Ipar 4.0 adta lehetőségeket. Az együttműködés ideje alatt fogalmazódott meg az

az igény a vállalat részéről, hogy egy kiválasztott gyártósoruk jelenlegi 72%-os hatékonyságát növelni kívánják. Ez a téma teljesen magával ragadott, éppen ezért célom a cég ezen valós gyártórendszerének felokosítása digitális ikertestvér segítségével azért, hogy egy gyorsabb és eredményesebb folyamat jöhessen létre. A dolgozatban ismertetem a virtuális gyártás tulajdonságait, hatásait és az ehhez felhasznált programok sokszínűségét. Részletes bemutatásra kerül egy 3D-s szimulációs program, a *Tecnomatix Plant Simulation* működése egy valóságos gyártósor virtuális környezetbe ültetésén keresztül. Elemzem a szoftver különböző funkcióit és az eddig megvalósított eredményeket, valamint fejlesztési lehetőségeket határozok meg.

3. Virtuális kommissiózás

3.1. A fogalom jelentése

A virtuális kommissiózás az a folyamat, melynek során a gyártást virtuális környezetben szimulálják egy számítógépes program felhasználásával a valóságos rendszer telepítése előtt. Egy gyártóegység kiépítésekor az üzembe helyezés teszi ki a legidőigényesebb részfolyamatot és jellemzően az eljárás késői szakaszában kerül rá sor, amikor a pontatlanul kialakított elemek már nem változtathatóak. A rendszer hibáinak 70%-a ekkor derül ki, melyeknek a korrigálása számos munkaóra mellett hatalmas költségeket emészt fel. A virtuális világ arra ad lehetőséget, hogy ez az észlelési intervallum a fejlesztés egy korábbi szakaszára, még a tervezési fázis idejére tolódjon. Eközben még számtalan mód adódik a komponensek kijavítására. Így megállapítható, hogy a virtuális kommissiózás alkalmazásának legfőbb funkciója a tervezési és összeszerelési hibák korai érzékelése és a megvalósítás előtti módosítása. [1] [2]



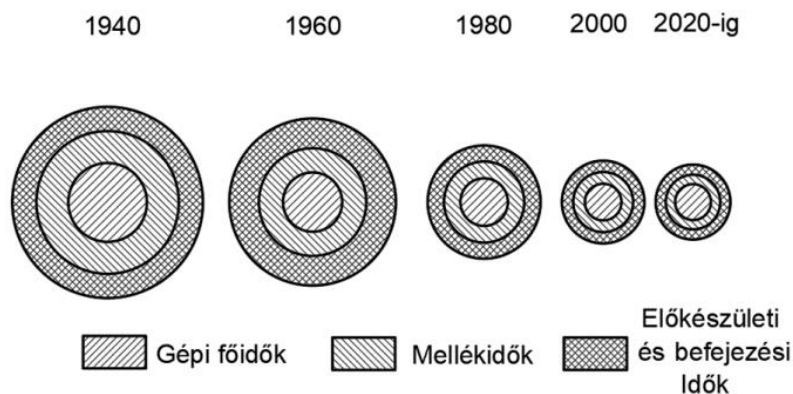
1. ábra: Gyártás virtuális kommissiózással és anélkül [3]

A virtuális modellezés technológiája az iparban egyre jelentősebb szerepet tölt be. Több nagy, a piacon már régóta ismert cég használja saját gyártási folyamatainak optimalizálása céljából. Ennek érdekében ma már számos szimulációs szoftver áll rendelkezésünkre, melyek közül felhasználási igényeink szerint válogathatunk.

3.2. Kialakulását megelőző események

A gyártástudomány fejlődése néhány száz éves múltra nyúlik vissza, melynek egyes időszakában az aktuális gyártási technológiák jelentős hatást gyakoroltak az akkori emberek életvitelére. A 18. században a gőzenergia elterjedésével kezdetét vette a kézi termelés helyettesítése, a gyártás gépesítésével az előállított termékmennyiségek sokszorosukra növekedtek. Később az első futószalagok a húsüzemekben jelentek meg. Ennek ellenére a tömegtermelés fogalmát Henry Ford tette közzismerté, azonban az autóiparban már csak használták a futószalagokat kezdetleges gyártósorok formájában. Míg korábban egyetlen szerelőegységen állították össze a járműveket, az újítás következtében futószalagon, különböző állomásokon végighaladva készültek. Így a folyamatok sokkal gyorsabbnak és alacsonyabb költségek mellett kivitelezhetőnek bizonyultak. [4]

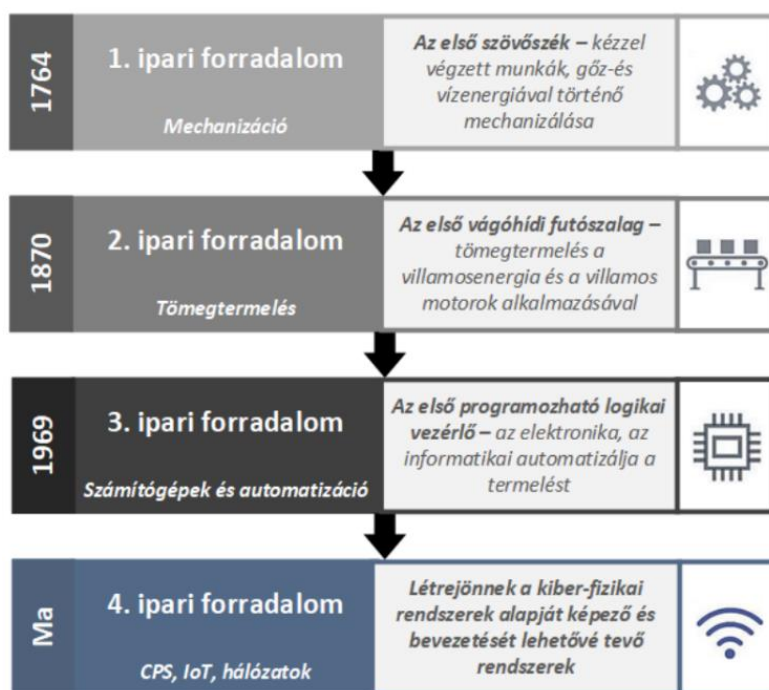
A 20. században kezdődött meg a gyártástechnológia dinamikus modernizációja. Ennek eredményeképp a szakemberek az idő előrehaladtával magasabb termékmennyiséget és jobb minőségű termékeket gyárthattak. [5]



2. ábra: Egy alkatrész előállítására fordítandó időtartomány változása [5]

Az 1940-es években a manuális kezelésű gyártóberendezések működtetéséhez tekintélyes szakértelemre volt szükség, így jókora előkészületi és befejezési idővel kellett kalkulálni. 1952-ben a Massachusetts-i Műszaki Egyetem megalkotta az amerikai hadsereg megrendelésére a számjegyes vezérlés technológiáját. A repülőgépek szárnygeometriáját az első NC vezérlésű szerszámgép készítette, emellett ekkor már képesek voltak szimulálni a repülés közben adódó technikai hibákat. Ezt követően a számjegyes vezérlést felváltotta a számítógépes vezérlés (CNC), valamint az iparban elterjedtek a programozható logikai vezérlők által irányított gyártóegységek. A számítógépekre kifejlesztett egyre jobb szoftvereknek köszönhetően a folyamatok részlegesen automatizálttá váltak, ezért az előkészületi- és tényleges gyártási idők nagymértékben lerövidültek. [5]

A negyedik ipari forradalom, más néven az Ipar 4.0 az információs technológiai elemek ipari alkalmazását jelenti. Vezérgondolata az emberek és gépek között egy rendszerszintű együttműködés létesítése a virtuális és fizikai világ összekapcsolásával. Jellemző technológiai többnyire digitálisak, ezek közé sorolhatók az okos termékek, a termelésben alkalmazott robotok és a számítógépes programok segítségével felépített szimulációk is. Az Ipar 4.0 fő irányvonalát képezi az innovatív szemléletmódok kialakítása, a nagymennyiségű adat elérésére és feldolgozására alkalmas megoldások fejlesztése, valamint a gyártási folyamatok teljes mértékű automatizálása. Mindezek mellett egyre fontosabb helyet foglal el a fenntarthatóság társadalmi, környezeti és gazdasági szintű vonatkozása is. [6]



3. ábra: Ipari forradalmak [6]

3.3. Jelentősége napjainkban

Az utóbbi időkben a gyártástudomány átalakulása a számottevő informatikai fejlődés következtében szinte követhetetlen mértéket ölt. Az Ipar 4.0, a korszerű számítástechnika, valamint a folyamatosan változó piaci igények a virtuális gyártás kialakulását eredményezték. Ennek alapgondolata, hogy a piaci igényekre gyors és hatékony válasz adható, ha a termékek előállítását szimulációs modellekkel virtuális környezetbe integrálják. A digitális világ lehetőséget nyújt az újonnan megfogalmazódott elvárásoknak eleget tenni, valamint az azoknak megfelelő legjobb végrehajtási módot megtalálni és létrehozni. A szimulációk használata a termelési folyamatok tervezését, fejlesztését támogatja és elősegíti a cégek versenyképességének fokozását. Egyre inkább céliránnyá vált a termelékenység növelése, a gyártási technológiák javítása, a folyamatok optimalizálása, illetve a kieső idő és pénz megtakarítása, melyek megvalósítására a virtuális gyártás tökéletes megoldást jelenthet. [2] [5]

4. Virtuális gyártás

4.1. Előnyei

A virtuális gyártás alkalmas új termelési rendszerek tervezésére vagy a már meglévők észszerűsítésére. Ennek első lépése egy megfelelő szimulációs szoftver kiválasztása és ebben egy olyan digitális ikertestvér felépítése, amely a valóságot pontosan reprezentálja. Az összeállított 3D-s virtuális modellek megjeleníthetik a gyártórendszerek részegységeitől kiindulva azok legapróbb alkatrészeit is. A létrehozott szimulációkban lehetőség van a gépek mozgását, a termékek áramlását, valamint a dolgozók tevékenységeit részletesen ábrázolni. Mindennek a célja az, hogy a digitális ikerről gyűjtött adatok kiértékelése után levont következtetések a valóságban optimális megoldást eredményezzenek. [7]

A virtuális gyártás számos előnnyel jár. A modellalkotásnak köszönhetően elérhetővé válik a gyártás előzetes elemzése anélkül, hogy a valós folyamatokba beleavatkoznának. Egy-egy szimulációs kísérlet teljesen kockázatmentes és többször is megismételhető. Mivel a szimulációs idő szabályozható, azaz egy lefuttatott folyamat gyorsítható, illetve lassítható, így nagyszámú kísérlet végezhető el rövid időn belül, mellyel a cégek időt takaríthatnak meg. [8]

A tesztelés során elsősorban az egyes gyártóegységek tökéletes működését és a termékek legyárthatóságát ellenőrzik. A berendezések vizsgálatának alapján értékelik a gyártási folyamat működőképességét, hatékonyságát, illetve felméri azt, hogy képes-e a várakozásoknak és a

vevői igényeknek megfelelni. Amennyiben indokolt, a digitális modellek geometriai méretei könnyen módosíthatóak, az elemek pozíciói és tulajdonságai gyorsan változtathatóak. Ennek hatására a hibák kialakulásának kockázata a fejlesztési folyamat korai szakaszára korlátozódik, így a rendszer megvalósítás utáni áttervezései elkerülhetőek. A hibák időben történő észlelése leredukálja a tényleges gyártás beindításáig szükséges időt és a későbbiekben kevesebb termelési leállás lesz tapasztalható. Bár a megfelelő szoftver megvásárlása jelentős ráfordítással jár, ezzel a technológiával a hibakeresés és az átdolgozás költségei csökkennek és a beruházás az évek múltán megtérül. Amint a jövőben a gyártóegység átalakítása szükségessé válik, a szimulációs modellben tárolt nagymennyiségű adat elősegíti a legcélravezetőbb döntéshozatalt. [2] [9]



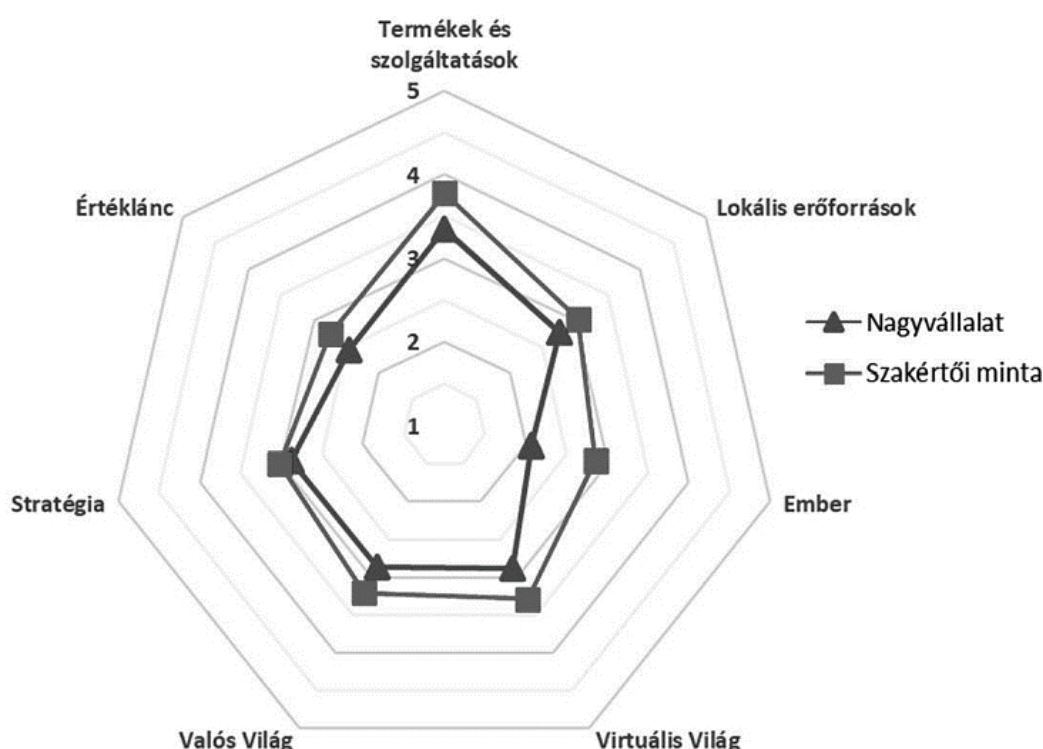
4. ábra: A virtuális gyártás előnyei [10]

4.2. Alkalmazása

A virtuális világ a folyamatos fejlődésének köszönhetően kedvező lehetőségeket rejt mind a témában elmélyedni vágyó kutatók, mind az eredményeket alkalmazó felhasználók számára. Ennek igazolásaként egyre több tanulmány születik a digitalizációval kapcsolatban, az ipari gyakorlatban pedig a virtuális gyártás napról napra hangsúlyosabb szerepet betöltő modern technológiának számít. Számos különböző területen hasznosítják, hozzájárul az Ipar 4.0 megvalósulásához és a legkorszerűbb szemléletek kialakulásához. [2]

4.3. Az Ipar 4.0 témakörében végzett kutatások ismertetése

A negyedik ipari forradalom tervezési alapelvei William de Paula Ferreira et al. publikációjában kerülnek ismertetésre. [11] Athos Paulo Tadeu Pacchini et al. kutatásukban az Ipar 4.0 bevezetését megalapozó technológiák, intézkedések teljesülését vizsgálják különböző vállalatok működésében. [12] Nick Gábor et al. a *Company Compass 2.0 (CCMS 2.0)* Ipar 4.0 érettségi modellt mutatják be, amely a cégek ipari digitalizációs felkészültségének mérésére szolgál. [13]

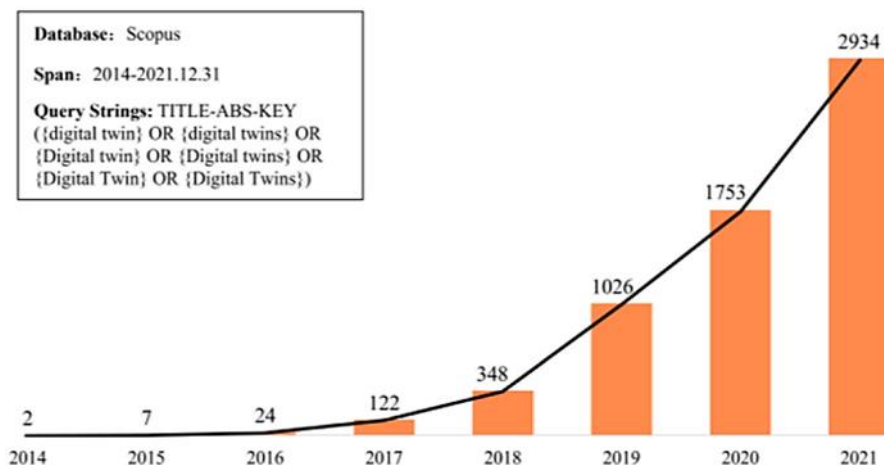


5. ábra: Egy feldolgozóipari nagyvállalat érettségi szintje [13]

Frédéric Rosin et al. az Ipar 4.0 technológiák LEAN elvekre gyakorolt hatását ismertetik. [14] Concetta Semeraro et al. a termelő vállalatoknak gyűjtenek össze javaslatokat, melyek elfogadásával az intelligens gyártás eléréséhez közelebb kerülhetnek. [15] Simon János tanulmánya szerint a VR technológia a humán erőforrás oktatásában lehetővé teszi az ipari dolgozók digitális gyárban történő, valósághű, mégis virtuális környezetben zajló képzését. [16] Raimund Wegener et al. fonalak és gypajúszalak gyártásának virtualizációjához a szimuláció eszközét használják fel. [17]

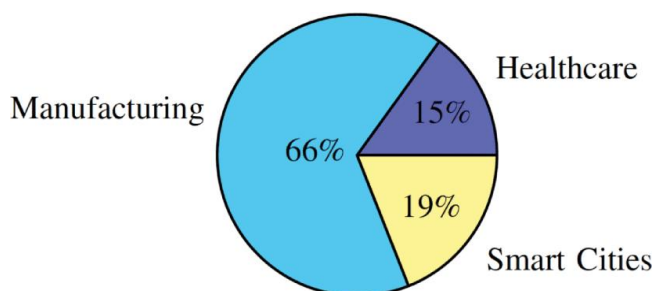
Eric VanDerHorn et al. a digitális iker fogalmára egy általánosított meghatározást alkottak meg. [18]

Kutatási témához kapcsolódóan Fei Tao et al. cikke több mint 300 publikáció tanulmányozása alapján a digitális ikrekről és modellezésükről nyújt átfogó ismereteket. [19]



6. ábra: Évente megjelent digitális ikerről szóló publikációk száma [19]

Aidan Fuller et al. publikációja a digitális ikrek felhasználását mutatja be a gyártástechnológiai alkalmazáson túlmutatva az okos városok és az egészségügy területén is. [20]



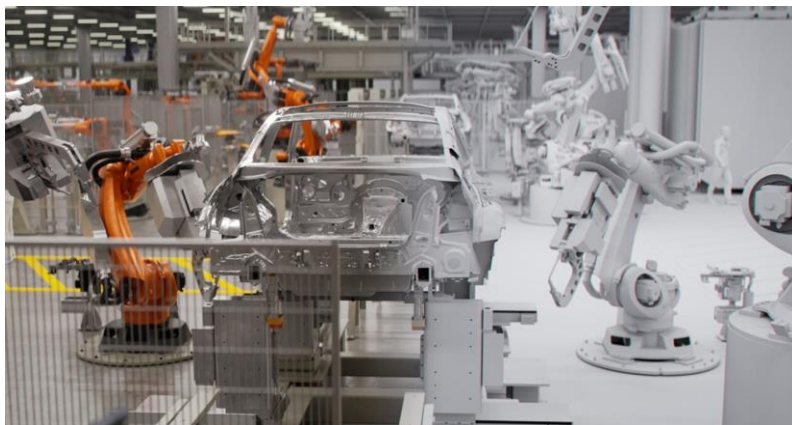
7. ábra: Digitális ikrek alkalmazásának megoszlása [20]

Kuldeep Kumar Verma és Vivek Babele cikke előnyben részesíti a szimulációk használatát és feltárja a *Tecnomatix Plant Simulation* programban rejlő különféle lehetőségeket. [21] Karolina Bendowska és Przemysław Zawadzki a *Tecnomatix Plant Simulation* alkalmazásával egy automatizált összeszerelősor lehető legpontosabb szimulációs modelljét készítették el kutatásukban. [22] Roman Bambura et al. egy szlovák bútorgyártó üzem termelési rendszerét optimalizálták egy *Tecnomatix Plant Simulation* programban felépített szimuláció segítségével. [23] Miriam Pekarcikova et al. egy napelemek és hőcserélők forgalmazásával foglalkozó vállalat anyagáramlását egységesítették a kanban módszer, illetve a *Tecnomatix Plant Simulation* szimulációs szoftver felhasználásával. [24]

A fenti tanulmányok mindegyike ösztönzően hatott projektemre, számos taglalt elmélet hasznomra vált, amelyeket igyekeztem beépíteni munkámba.

4.4. Virtuális gyártás az autóiparban

A virtuális modellezés egyik legnagyobb felhasználója az autóipar, ahol a folyamatszimuláció ma már irányadó technológiának számít. A BMW Group több mint 100 éve képviseli a fenntartható innovációs megoldásokat és megújulásának kulcsa a hatékony folyamatokat szolgáló digitalizáció. Legfrissebb eredménye, hogy felépítettek egy olyan virtuális gyárat, melynek a valóságos kiépítése, a világon egyedülálló módon csak a modellezés után történik meg. Az *NVIDIA Omniverse* rendszerében létrehozott pontos, magas színvonalú előkészítés lehetővé teszi a virtuális járműgyártást a tényleges sorozatgyártás beindítása előtt. A beruházások jelenleg zajlanak, előreláthatólag 2025-ben már megkezdődhet a debreceni gyárban a NEUE KLASSE modellek rekordhatékony előállítása. A BMW célul tűzte ki az *NVIDIA Omniverse* rendszerének kiterjesztését a teljes globális gyártóhálózatára. Az üzemek összekapcsolásával leegyszerűsödik a telephelyek közötti együttműködés, a szakemberek a Föld bármely pontjáról valós időben közösen dolgozhatnak a folyamatok fejlesztésén. [2] [25]



8. ábra: NEUE KLASSE modellek gyártása az NVIDIA rendszerében [26]



9. ábra: Az épülő debreceni BMW gyár [27]

5. Az Ipar 5.0 bevezetése

A negyedik ipari forradalom továbbfejlesztéseként az Ipar 5.0 az emberek és a robotok közötti szorosabb és hatékonyabb együttműködést hangsúlyozza ki. A fogyasztói társadalom elvárásai, valamint a piac folyamatosan változó igényei egyre inkább az egyedi termékek gyártását követelik meg az ipartól. Így az Ipar 5.0 célkitűzése a cégek tömegtermelést végző gyártórendszereire lehetővé tenni a kis sorozatszámú termékek gazdaságos legyártását, ezzel növelve a folyamatok rugalmasságát. A műveletek minőségét állandó szinten tartó robotok alkalmasak a tömeggyártásra és ez remekül kiegészül az emberek képzelőerejével, amely a gyártási folyamatok összehangolásához szükséges. Mindezek mellett a termelés folyamán kiemelkedő szerepet tölt be a fenntarthatóság és az energiatakarékosság elérése. [2] [28]

6. Tecnomatix Plant Simulation

Kutatómunkám során létrehoztam egy valóságos gyártóegység virtuális másolatát, melyhez a *Tecnomatix Plant Simulation* szimulációs programot használtam fel.

A *Plant Simulation* a Siemens *Tecnomatix* termékcsalád tagjaként egy diszkrét, eseményvezérelt folyamatszimulációs eszköz, melyben a gyártási és logisztikai folyamatok digitális ikertestvére gyorsan felépíthető és vizsgálható. Választásom erre a modellalkotó környezetre esett, mert a tanulóbarát Siemens termékeket egyetemünk nagy elégedettséggel népszerűsíti. Az alkalmazás ingyenes licenccel, valamint hat különböző, köztük magyar nyelvű felhasználói felülettel is rendelkezik. Számos oktatóvideó és példa érhető el, amelyek segítik a programban való eligazodást. Az interneten létezik egy olyan közösség is, ahol a felhasználók felvethetik egymás között a felmerülő kérdéseiket és megoldást találhatnak problémáikra.

6.1. Felhasználása

A szoftver lehetőséget ad virtuális környezetben gyártórendszerek modellezésére és optimalizálására az üzemtervezés minden szintjén. Akár egy globális gyártóüzemnek, akár csak egy egyszerű gyártósornak szeretnénk elkészíteni a digitális ikertestvérét, mindig átláthatóan felépített modellekhez juthatunk. Leggyakoribb felhasználási területe az áramlási folyamatok szimulációja. Könnyen kezelhető platformként lehetővé teszi a bonyolultabb rendszerek elemzését és az innovatív stratégiák tesztelését is. [29]



10. ábra: Tecnomatix Plant Simulation modell a gyakorlatban [30]

6.2. Felépítése

A program alaplogikája számottevő szaktudás nélkül követhető, a benne lejátszódó folyamatok némi gyakorlattal értelmezhetőek. A felület valósághű megjelenítést kínál a felhasználók számára, ezzel elősegíti az egyszerű tájékozódást és az áttekinthetőséget a virtuális objektumok között. A 3D-s modellek megalkotásához a rendszer nagyszámú kész alapelemet biztosít, azonban saját komponensek is készíthetőek, valamint kompatibilis alkalmazásokból beemelhetőek. Számos elemzőeszköz, statisztika és diagram járul hozzá az anyagáramlás kiértékeléséhez, majd optimalizálásához, illetve a gyártóegységek és az erőforrások maximális kihasználásához. A program kínálta kitűnő lehetőségek segítségével a valós gyártási folyamatok felgyorsíthatóak, a termékfejlesztés hatékonyabbá tehető. A *Plant Simulation* alkalmazásának köszönhetően egy cég termelékenysége javítható, mivel a megbízható beruházási döntések meghatározása gyorsabbá és egyszerűbbé válik. [2] [8]

7. A cég valós termelési folyamata

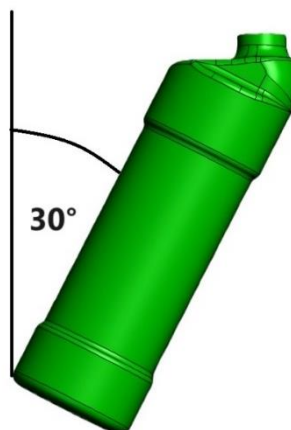
7.1. A projekt ismertetése

A kutatási projektet támogató cég egy piacvezető szerepet betöltő multinacionális vállalat, amely folyékony tisztítószer gyártásával és csomagolásával foglalkozik. Több helyszíni bejárás alkalmával lehetőségem volt mélyreható elemzést készíteni az üzem egy adott terméket előállító gyártósoráról. A gyártórendszer megfigyelése magába foglalta a különböző műveleteket végző részállomások megismerését, műszaki paramétereinek felmérését, valamint taktidő vizsgálatok elvégzését is. A kiválasztott tisztítószer gyártásának azon részfolyamatát tanulmányoztam, melyben az üres műanyag flakonok elindulnak egy futószalagon, majd különböző állomásokon keresztül eljutnak a piacképes állapotig és megkezdődik a termékek dobozolása. Az alábbiakban a gyártósor áttekintésén keresztül részletes bemutatásra kerülnek az egyes részegységek különböző funkciói. [2]

7.2. A gyártósor elemeinek bemutatása

A folyamat elején az üres műanyag palackok az emeletről egy ejtőtáras, gravitációs elven működő adagolón keresztül ömlesztve érkeznek az első állomásra. Ez előnyös és gazdaságos mozgatósi módot jelent, mivel a flakonok helyváltoztatásához nincs szükség külső erő kifejtésére. Ezt követően a flakonok talpukra állítva, sorokba rendeződve indulnak tovább két futószalagon, melyeket végül egy összeterelő csiga egyetlen sorra egyesít. A dupla futószalagos megoldás redundanciát biztosít az üres flakonok kiszolgálására.

A következő munkafolyamatot az orientáló állomás látja el, amely egyszerre több műveletet hajt végre a palackokon. A részegység bemenetére a flakonok szorosan egymás után, hézag nélkül, véletlenszerű irányba fordulva érkeznek meg. Az orientáló elődleges feladata, hogy minden flakont azonos irányba fordítson ezzel garantálva a töltőegységre való csatlakozásuk lehetőségét. Másodlagos funkcióként egyenlő nagyságú hézagokat állít be a flakonok között, amely pontosan megegyezik a töltőfejek távolságával. Mindezek mellett azzal egészül ki a töltés előkészítése, hogy az orientáló állomás végzi a flakonok függőleges pozícióhoz képest 30° -os, menetiránnyal ellentétes megdöntését. Ez a művelet felel a palackok szájának vízszintes helyzetbe történő állításáért, így tudnak majd a töltőfejek megfelelően kapcsolódni hozzájuk.



11. ábra: Függőleges pozícióban álló flakon 12. ábra: 30°-os szögben megdőntött flakon

A termék legyártásának folyamata ezután a folyadékadagoló állomáshoz érkezik. A töltőberendezés $\pm 1\%$ -os tűréssel minden egyes flakonba 0,75 liter folyékony halmazállapotú vegyi anyagot juttat. Ezt követően a megtöltött flakonok biztonságos lezárása következik, melyhez a kupakok gravitációs úton, rezgőasztal segítségével kerülnek a feltekerő egységbe. A kupakzáró állomás 40 N nagyságú meghúzási erő kifejtése mellett a flakonokat 360°-os fordulattal megforgatva zárja le. A kupakok szilárd rögzítése után a palackok újra felveszik eredeti helyzetüket, talpra állítva, függőleges pozícióban folytatják útjukat a soron lévő munkafolyamat irányába.

Lézeres egyedi azonosító égetését követően megérkeznek a következő részegységhez, a címkéző állomáshoz. Ekkor a flakonok 360°-os fordulattal maguk köré csavarják a címkéjüket, melyek megfelelő rögzítése ragasztott kötéssel történik. A címkéző egység optikai ellenőrző berendezést tartalmaz, melynek feladata a flakonokon elhelyezkedő címke helyes pozíciójának ellenőrzése. Az optikai ellenőrző másodpercenként 20 db képet készít egy-egy palackról, melyek alapján automatikusan értékeli a címke felragasztásának pontosságát.

A már megtöltött és külső borítással ellátott késztermékek egy futószalagon keresztül a szortírozó egységbe jutnak, ahol egy pneumatikus útterelő $2 \times 4 = 8$ utas pályára rendezi azokat. Ezen részegységen kezdődik meg a termékek palettázása. A dobozba helyezés műveletét egy pneumatikus megfogással rendelkező TT manipulátor viszi véghez. Egyszerre 40 db termék megemelésére képes, melyeket 4 x 5-ös elrendezésben (4 oszlop, 5 sor) helyez el, egyidejűleg 2 doboz feltöltését elvégezve. A 20 db flakon befogadására alkalmas kartondobozok alul összeragasztva, nyitott állapotban, gravitációs ejtőcsúszdán érkeznek a dobozoláshoz. Utolsó lépésként megvalósul a késztermékekkel teli dobozok ragasztószalag használatával történő

biztonságos lezárása, majd elevátor szállítja tovább azokat az első emeleten található csomagoló üzembe.



13. ábra: A termelési folyamat gyártórendszere

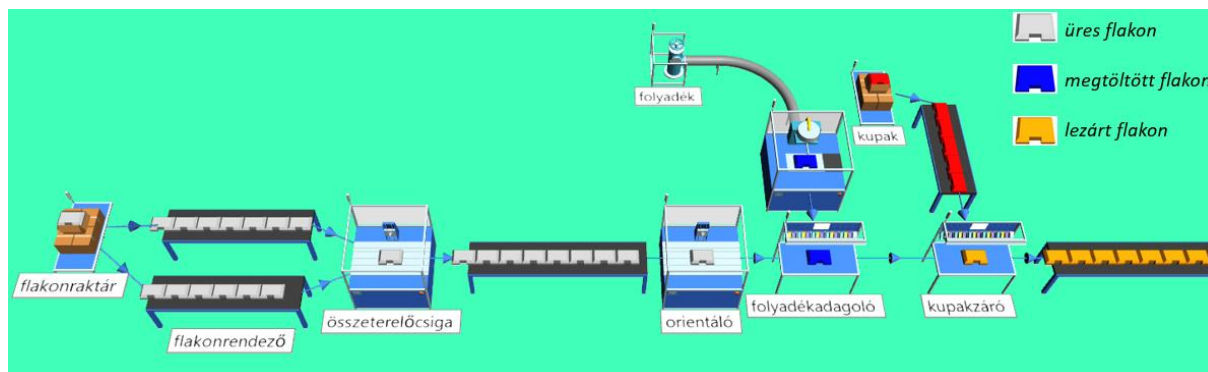
A gyártósoron lejátszódó termelési folyamat logikusan, a LEAN elve szerint van felépítve. A rendszer teljesen automatizált, a folyamat során végig szenzorok ellenőrzik a félkész termékek állapotát. Mivel nincs szükség emberi erőforrásra, így a hibák kialakulásának kockázata alacsony. A bemutatott termelési rendszerben bár folyamatos gyártás zajlik, azonban a gyártósor életkorából, illetve a gyártóegységek működési pontatlanságaiból adódóan vannak leállások. Ezek kiküszöbölésére jelenthet egy lehetséges megoldási módot a virtuális gyártás. Ennek köszönhetően a folyamatok optimalizálása elérhetővé, a cég által kitűzött 13%-os hatékonyságnövelés pedig teljesíthetővé válik. [2]

8. A felépített digitális iker

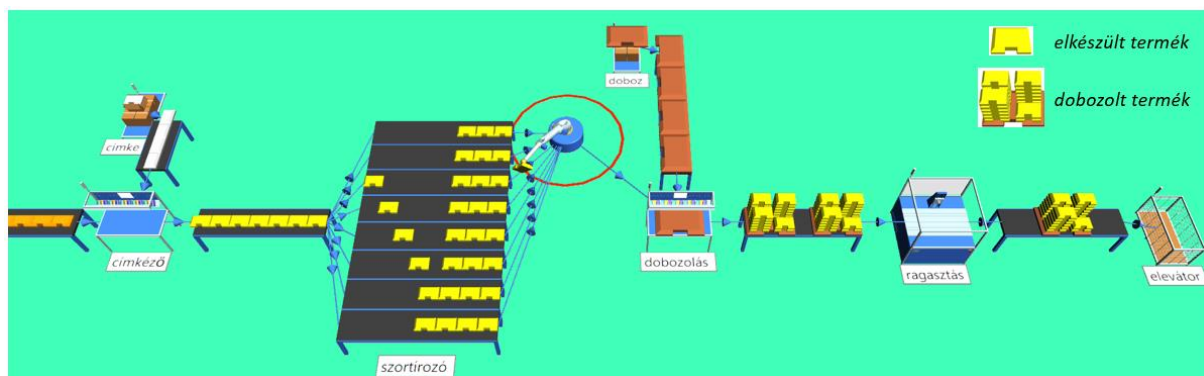
A virtuális gyártás megvalósításához a valóságos rendszer alapos elemzése után a gyártás folyamatait virtuális környezetbe ültettem át. A *Tecnomatix Plant Simulation* szimulációs program alkalmazásával létrehoztam egy folyamatszintű digitális ikertestvért, amely a valós gyártórendszert pontosan reprezentálja. A modellezés során a cég által összegyűjtött 2022. évi gyártósori adatok alapján dolgoztam. A felépített digitális modell elemeihez emellett számos további adat került hozzárendelésre, mint például a futószalagok hossza és sebessége, valamint

az egyes állomásokon percenként legyártott termékek száma. Ezen paramétereket a valóságban precízen megfigyeltem és megmértem, majd a szimulációs szoftverbe beilleszthetővé alakítottam át. Az alábbiakban ismertetem a modell egyes részeit, amelyeken a bemutatás során láthatóvá válik, hogyan feleltethetőek meg a valóságnak.

8.1. A valós gyártósor a Tecnomatix Plant Simulation programban



14. ábra: A felépített virtuális modell I.



15. ábra: A felépített virtuális modell II.

A digitális iker felépítésének szempontjából az elemek 3D-s alakja helyett a funkcióik kerültek előtérbe, ezen túlmenően a *Plant Simulation* sem kezeli tökéletesen a 3D-s objektumok megjelenítését, ezért a szimuláció külsőre csak szemléltető, azonban a valósággal megegyező feladatokat ellátó munkaállomásokkal dolgozik. A bemeneteken érkező alapanyagok ábrázolásához színkódot alkalmaztam. Minden újonnan megjelenő szín az eredeti flakonhoz egy további elem kapcsolódását jelenti.

8.2. A szimulációs modell beállításai

A szimuláció alapját a bemenetek képezik, amelyek alapanyagot biztosítanak a folyamatnak. Az erőforrások bemenetei – mint a flakon, a töltendő folyadék, a kupak, a címke és a doboz ellátását végző részegységek – végtelen kapacitással rendelkeznek a modellben, mert a cég által kiadott 2022. évi adatokban nem szerepel a gyártósor alapanyagellátásából adódó probléma. Amennyiben azonban a későbbiekben számolni szükséges az alapanyaghiánnyal, a felépített digitális iker természetesen lehetővé teszi ezt is.

A szimuláció első lépéseként a flakonraktárból olyan mennyiségű flakon érkezik, amely a gyártósor teljesítményét kielégíti. A gyártási folyamatban a termékek szállításáért felelős futószalagok hosszanti méretei megfelelnek a valóságnak, a modell szempontjából azonban szélességük a soros anyagáramlás miatt irreleváns, ezért ez utóbbi paraméter nem került hozzárendelésre a szimulációban, egységnyi értéként tüntettem fel. A valós szállítószalagok hosszait centiméter pontossággal mértem meg, mely adatok megadása a digitális iker létrehozásakor ugyanilyen részletességgel kivitelezhető volt. Az egymás után sorakozó flakonokat továbbító flakonrendező futószalagot az üzemben 384 cm hosszúságúnak mértem, ezért a modellben a hossz paraméterhez $3,84\text{ métert}$ definiáltam. A futószalagok modellezésekor ezenfelül a sebességüket határoztam meg, melyet a valós egységeknél feltüntetett BPM (*Beats Per Minute, azaz percenkénti darabszám*) mértékegységről a modellben beállítható $\frac{m}{s}$ értékévé kellett átszámolni. A flakonrendező esetében ez $0,624\frac{m}{s}$ -os sebességet jelent, mely számítást az alábbi levezetés szerint végeztem el:

2 db futószalag 260 BPM (flakon/perc) sebességű anyagáramlást lát el.

1 db futószalag sebessége:

$$\frac{260}{2} = 130\text{ flakon/perc} \quad (1)$$

a flakonok szélessége: $7,5\text{ cm}$

$$1\text{ flakon} = 0,075\text{ m} \quad (2)$$

$$130\text{ flakon} = 130 \cdot 0,075 = 9,75\text{ m} \quad (3)$$

a $3,84\text{ m}$ hosszúságú futószalag sebessége:

$$3,84 \cdot 9,75 = 37,44\frac{m}{perc} = 0,624\frac{m}{s} \quad (4)$$

Models.Model.flakonrendező

Navigálás Nézet Eszközök Lapfűl Sűgó

Név: flakonrendező ☐ Hibás ☐ Belépés lezárva ☐

Címke: ☐ Tervezett ☐ Kilépés lezárva ☐

Attribútumok Idők Hibák Kontrollok Kilépés Statisztika Energia Köl

Hossz: 3.84 m ☐ Feltorlódó ☐

Szélesség: 1 m ☐ Energia megtakarítás ☐

Sebesség: 0.624 m/s ☐ Visszafelé ☐

Idő: 0:06.1538461

☐ Gyorsulás ☐ Gyorsulás: 1 m/s²

Aktuális sebesség: 0 m/s ☐ Lassulás: 1 m/s²

Kapacitás: -1 ☐

MU távolságtípus: Hézag ☐ MU távolság: -1 m

3D OK Mégsem Alkalmaz

16. ábra: A flakonrendező futószalag beállított paramétereit

A folyamat következő állomása az összetereelő csiga, amely egyetlen futószalagra továbbítja a két ágról érkező flakonokat. Az ehhez hasonló típusú állomásokhoz a modellben feldolgozási idő adható meg, amely azt jelenti, hogy az adott állomás mennyi ideig foglalkozik a meghatározástól függően egy vagy akár több termékkel. Az összetereelő csiga esetében ez a számadat a gyártósor paramétereit szerint 1 s értéket vesz fel, melyet a modellezés során is beállítottam a részegységhez.

Models.Model.összeterelőcsiga

Navigálás Nézet Eszközök Lapfűl Sűgó

Név: összeterelőcsiga ☐ Hibás ☐ Belépés lezárva ☐

Címke: ☐ Tervezett ☐ Kilépés lezárva ☐

Idők Átállás Hibák Kontrollok Kilépés Statisztika Importáló Energia

Feldolgozási idő: Konstans 0:01 ☐

☒ Automatikus feldolgozás ☐

Átállási idő: Konstans 0 ☐

Visszaállítási idő: Konstans 0 ☐

Visszaáll. idő kezdete Amikor a darab belép ☐

Ütemidő: Konstans 0 ☐

3D OK Mégsem Alkalmaz

17. ábra: Az összetereelő csiga állomás beállított paramétereit

Az összerelő csigát követő futószalag az orientáló állomásra irányítja a flakonokat.

- Hossz: 4,59 m
- Sebesség: $1,492 \frac{m}{s}$

Az orientáló állomás olyan egység, amely az üres flakonokat 30° -os döntés mellett megfelelő irányba fordítja, miközben töltőfej nagyságú hézagot állít be közöttük. Ezen műveletekkel előkészíti a folyadékfeltöltést.

- Feldolgozási idő: 1 s

A folyadékadagolás folyamata alatt a szimulációban alkalmazott színkód alapján a szürke színű üres flakonok feltöltődnek tisztítószerrel, így megtöltött kék flakonokká válnak. Ennek menetét a modellben összeszerelésként értelmeztem a művelet megjelenítésének összetettsége miatt. A két elődágból, az üres flakonból, valamint a töltendő folyadékból kimenetként egy teljesen új termék, a megtöltött flakon keletkezik.



18. ábra: A folyadékadagoló összeszerelés színkódja

Model.folyadékadagoló

Név: folyadékadagoló Hibás Belépés lezárva
Címke: Tervezett Kilépés lezárva

Attribútumok Idők Átállás Hibák Kontrollok Kilépés Statisztika Imp

Szerelési tábla:	Elődágak	Megnyitás
Fő MU érkezési elődága:	1	
Szerelési mód:	MU-k törlése	
Kilépő MU:	Új MU	
MU:	*.UserObjects.toltott	
Sorrend:	MU-k, aztán a szolgáltatás	

3D OK Mégsem Alkalmaz

19. ábra: A folyadékadagoló összeszerelési módja

Az állomásokhoz hasonlóan az összeszereléseknél is lehetőség van feldolgozási idő beállítására. A folyadéktöltő berendezés 6 s ideig dolgozik a flakonokkal.

20. ábra: A folyadékadagoló összeszerelés beállított paramétereit

A folyamat elemeit tovább vizsgálva a kupakzáró összeszerelés a folyadékkal teli flakonokra rátekeri a piros kupakokat, így a termékek narancsszínű, biztonságosan lezárt flakonokként folytatják útjukat.

- Feldolgozási idő: 4,5 s

 megtöltött flakon +  kupak $\longrightarrow$  lezárt flakon

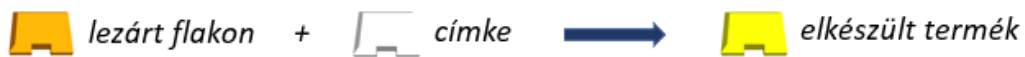
21. ábra: A kupakzáró összeszerelés színekódja

A következő futószalag a kupakzáró és címkéző összeszerelések közötti anyagáramlást biztosítja.

- Hossz: 7,3 m
- Sebesség: $2,373 \frac{m}{s}$

A címkéző állomás a lezárt flakonokra a fehér címkék ráragasztását végzi, mely művelet után késztermékeket kapunk. A modellben az elkészült termékeket sárga szín jelöli.

- Feldolgozási idő: 1 s



22. ábra: A címkéző összeszerelés színkódja

Ezt követően egy egyszerre 54 db flakon szállítására képes futószalag a szortírozó egységbe tereli a dobozolásra készen álló termékeket.

- Hossz: 4,06 m
- Sebesség: $1,325 \frac{m}{s}$

A szortírozó feladatot ellátó futószalagok 2 x 4 utas pályán rendezik a flakonokat, majd megkezdődik azok palettázása.

- Hossz: 4,6 m
- Sebesség: $1,495 \frac{m}{s}$

A szortírozó egységről egy TT manipulátor 8,3 s alatt egyszerre 40 db flakont emel át kartondobozokba. Ezen állomásnál a robot rakodási idejét, illetve kapacitását adtam meg, azonban számos további beállítási lehetőség is rendelkezésre áll, amelyek pontosabbá tennék a modell működését. További paraméterek konkrét definiálását azonban nem kérte a projekt megrendelője.

23. ábra: A robot beállított paraméterei

Az eddigiekkel ellentétben a dobozoló összeszerelésben nem keletkezik új termék a kimeneten, hanem az elődágakból érkező anyagok összekapcsolt állapota jelenik meg. Egy barna színű dobozba 20 db termék kerül és egyidejűleg két kartondoboz töltődik fel.

- Feldolgozási idő: 1 s



24. ábra: A dobozoló összeszerelés színkódja

25. ábra: A dobozolás összeszerelési módja

A dobozolás befejeztével egy futószalag vezet a dobozok leragasztását végző állomáshoz.

- Hossz: 3,6 m
- Sebesség: $0,194 \frac{m}{s}$

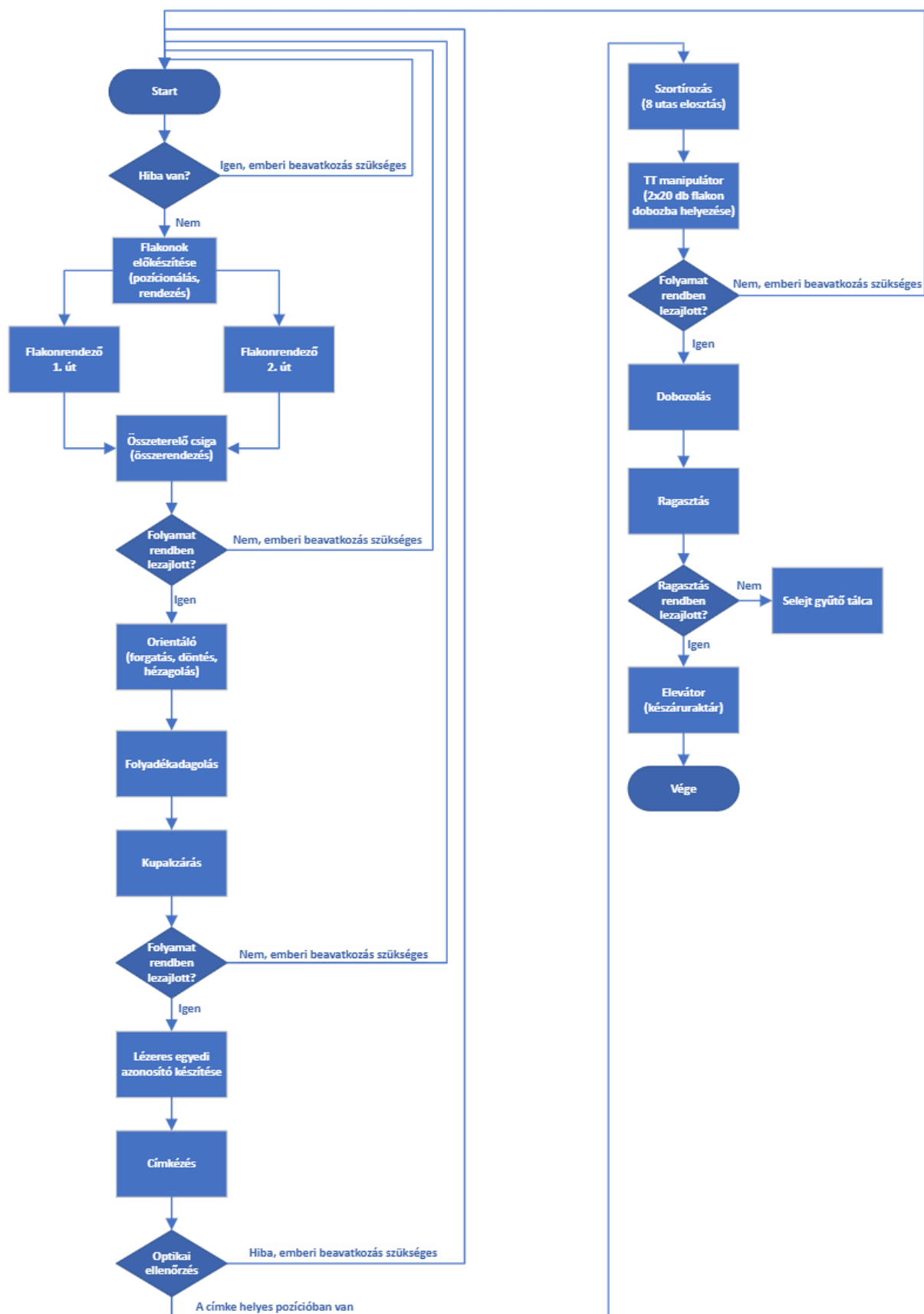
Ezen az állomáson történik meg a késztermékekkel megtelt dobozok biztonságos lezárása ragasztószalag segítségével.

- Feldolgozási idő: 2 s

A szimulációban utolsóként szereplő futószalag a szállításra kész dobozokat az elevátorig juttatja el, amellyel tovább indulnak a csomagolóüzembe.

- Hossz: 3,8 m
- Sebesség: $0,204 \frac{m}{s}$

8.3. A szimulációs modell folyamatábrája



8.4. A szimulációs modell pontosítása

Annak érdekében, hogy a digitális iker még jobban tükrözze a valóságot, a cég gyártósori adatai alapján összegeztem az egyes részegységeken előforduló működési hibákat havi szintre lebontva. Ezek az értékek az 1. táblázatban láthatóak percben megadva:

1. táblázat: A gyártósori elemek hibái percben megadva

MŰKÖDÉSI STRATÉGIA 2022. ÉV											
Hónap	A gyártósori elemek hibái (perc)										
	Flakonrendező	Összeterező csiga	Conveyor	Orientáló	Folyadékadagoló	Kupakzáró	Cimkéző	Szortírozó	Robotkar	Dobozolás	Ragasztás
január	74	17	53	8	936	599	267	30	135	495	26
február	72	6	0	65	662	242	195	295	210	467	31
március	437	12	35	136	773	83	429	52	44	789	12
április	274	42	52	168	859	181	206	2	138	1 147	55
május	410	101	60	443	324	48	130	38	266	2 139	132
június	395	157	77	100	428	358	344	336	110	1 471	188
július	1 145	159	45	150	725	111	431	124	127	2 002	193
augusztus	139	124	53	124	235	57	124	1	53	1 226	67
szeptember	340	195	74	123	727	321	126	262	103	650	95
október	235	235	89	131	705	287	531	34	186	2 229	130
november	199	165	89	194	601	114	225	135	119	633	12
december	118	113	49	52	855	365	40	0	28	656	29
ÖSSZESEN	3 838	1 326	676	1 694	7 830	2 766	3 048	1 309	1 519	13 904	970

Az elemzésből kiolvasható, hogy kimagasló érték a dobozolás esetében tapasztalható, amely azt mutatja meg, hogy a dobozoló állomás működési pontatlanságaiból adódó hibák a 2022. évben több mint 9 nap állásidőt okoztak a cégnek. Azért, hogy ezek a veszteségek a szimuláció eredményeiben is megjelenjenek, az egyes részegységekhez szükségesnek tartottam ezen üzemelési hibák hozzárendelését. A modell minden egyes eleméhez beállítható, hogy a szimulációs időhöz viszonyítva az adott egységek milyen rendelkezésre állás mellett képesek dolgozni. A dobozoló állomás évre vetített 13 904 perc leállást okozó működési hibája a szimulációban 96,36%-os rendelkezésre állás mennyiségként mutatkozik meg. Ezen értéket az alábbi számítás alapján kaptam meg:

$$\text{rendelkezésre állás} = \frac{\text{loading time} - \text{downtime}}{\text{loading time}} \cdot 100 \quad (5)$$

ahol: $\text{loading time} \rightarrow \text{naptári idő} - (\text{ünnepnapok} + \text{tervezett leállások})$

$\text{downtime} \rightarrow \text{nem tervezett leállások}$

a cég adatai szerint 2022. évben a loading time: 382 022 perc

a dobozolás esetében a downtime: 13 904 perc

a dobozoló állomás rendelkezésre állása:

$$\frac{382\,022 - 13\,904}{382\,022} \cdot 100 = 96,36\% \quad (6)$$

26. ábra: A dobozoló állomás rendelkezésre állásának beállítása

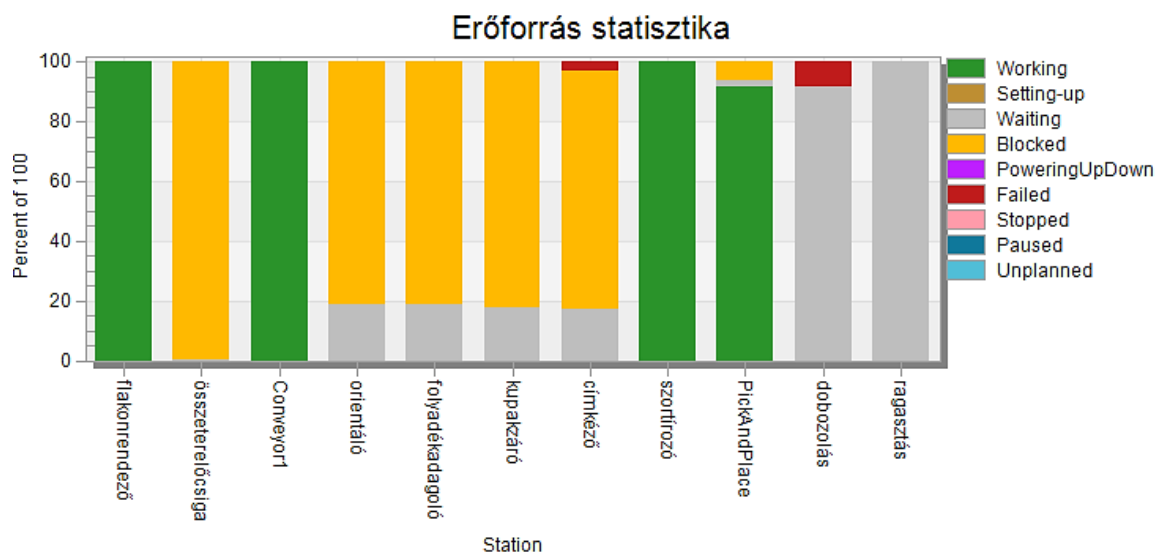
Hasonló számolási módszer szerint a többi részegység rendelkezésre állásának kapott értékei a következők:

- Flakonrendező: 98,97%
- Összeterelő csiga: 99,65%
- Conveyor: 99,94%
- Orientáló: 99,56%
- Folyadékadagoló: 97,95%
- Kupakzáró: 99,28%
- Címkéző: 99,20%
- Szortírozó: 99,56%
- Robotkar: 99,60%
- Ragasztás: 99,75%

Mindezen adatok pontos megadásával a valóságnak megfelelő szimulációhoz jutottam. A *Plant Simulation* programban több kiértékelést is készítettem, melyek eredményei a valóságos értékeket támasztják alá.

8.5. A szimulációs modell kiértékelése

A felépített digitális modellt elsőként egy erőforrás statisztika diagram segítségével vizsgáltam, amely az egyes állomások működési idejének százalékos megoszlását mutatja.



27. ábra: A jelenlegi gyártósor erőforrás statisztikája

Ehhez kapcsolódóan elkészítettem a gyártósor szűk keresztmetszet elemzését is, amely az erőforrás statisztika diagramot foglalja össze konkrét értékek definiálása mellett.

2. táblázat: A jelenlegi gyártósor szűk keresztmetszet analízise

SZŰK KERESZTMETSZET ANALÍZIS 2022. ÉV				
Gyártósori elem	Üzemelési idő megoszlása (%)			
	Working	Waiting	Blocked	Failed
Flakonrendező	100.000	0.000	0.000	0.000
Összeterelő csiga	0.000	0.467	99.533	0.000
Conveyor	100.000	0.000	0.000	0.000
Orientáló	0.000	19.829	80.171	0.000
Folyadékadagoló	0.000	18.967	81.033	0.000
Kupakzáró	0.000	18.018	81.982	0.000
Címkéző	0.000	17.743	79.149	3.108
Szortírozó	100.000	0.000	0.000	0.000
Robotkar	92.625	2.321	5.054	0.000
Dobozolás	0.000	92.697	0.000	7.303
Ragasztás	0.000	100.000	0.000	0.000

Ezen kiértékelések alapján megállapítható, hogy a cég termelési hatékonyság növelésének egyik legnagyobb akadálya az egyes részfolyamatok nem megfelelő összehangolása. Az elemzésekből látható, hogy míg bizonyos egységek túlterhelik a folyamatot, addig vannak nagyobb kapacitással rendelkező állomások is. Ebből következően a teljes folyamat során a várakozás és a blokkolás állapota dominál, amely egy akadozó termelési folyamatra utal.

Az összetételű csiga már a gyártósor elején szinte teljesen blokkolja a termékek áramlását. A kétutas flakonrendező részegységről érkező flakonok itt feltorlódhatnak és ez a továbbiakban újabb hibákat eredményez. Emiatt az orientáló egységtől a címkéző állomásig minden folyamat továbbra is 80%-ban blokkolt, a maradék 20%-ban pedig termékre vár. A szortírozó egységnél a soros anyagáramlás befejeződik, a flakonok 8 utas pályára terelődnek, így megszűnik a blokkolás és újra teljes mértékben dolgozik az állomás. A folyamatban a nagyobb teljesítménnyel rendelkező egységek a dobozolás és a ragasztás állomásai, amelyek üzemelési idejük több mint 90%-ában termékekre várnak. A dobozolás részfolyamatánál a korábban kimutatott működési hiba mértékét a diagram is kiválóan láttatja.

Összességében a gyártórendszer 2022. évi adatai alapján a termelési folyamat hatékonysága (*OEE – Overall Equipment Effectiveness*) megközelítőleg eléri a 72%-ot, melyet az alábbi módon számítottam ki:

$$OEE = TM \cdot R\acute{A} \cdot MM = 0,8359 \cdot 0,8613 \cdot 1 = 0,7199 \rightarrow \mathbf{71,99\%} \quad (7)$$

ahol:

$$TM = \frac{\text{elvárt ciklusidő [perc/db]} \cdot \text{gyártott összes darabszám [db]}}{\text{gyártási idő [perc]}} \quad (8)$$

$$R\acute{A} = \frac{\text{gyártási idő [perc]}}{\text{tervezett gyártási idő [perc]} - \text{leállások [perc]}} \quad (9)$$

$$MM = \frac{\text{gyártott jó darabszám [db]}}{\text{gyártott összes darabszám [db]}} \quad (10)$$

$$TM [\%] = \frac{0,0038 \cdot 60\,448\,969}{274\,785} \cdot 100 = 83,59\% \quad (11)$$

$$R\acute{A} [\%] = \frac{274\,785}{382\,022 - 62\,987} \cdot 100 = 86,13\% \quad (12)$$

$$MM [\%] = \frac{60\,448\,969}{60\,448\,969} \cdot 100 = 100\% \quad (13)$$

a cég adatai szerint 2022. évben a legyártott termékmennyiség: 60 448 969 db

selejttel nem számol a cég, mivel minden alapanyag újrahasznosítható

ebből: a gyártott jó minőségű termékek darabszáma: 60 448 969 db

a gyártott selejt darabszáma: 0 db

a tervezett gyártási idő: 382 022 perc

a leállások összesített ideje: 62 987 perc

a tényleges gyártási idő: 274 785 perc

a tervezett ütemidő számítása:

$$60\,448\,969 \text{ db termék} = 274\,785 \text{ perc} \quad (14)$$

$$1 \text{ db termék} = \frac{274\,785}{60\,448\,969} = 0,00327 \text{ perc} \quad (15)$$

Mindezek alapján elmondható, hogy a megfogalmazott cél elérése érdekében a cég termelési rendszere korszerűsítésre szorul, a folyamat teljes eszközhatékonyságát 13%-kal szükséges növelni. A részfolyamatok többsége nem igazodik egymáshoz, nehézkes anyagáramlás tapasztalható és a termékek tényleges gyártási idejének nagy részét a blokkolás és a várakozás teszi ki. Ezen problémák megoldásával, illetve a jelentkező hibák minimalizálásával fejleszthető a gyártósor. A kutatási projektem folytatásaként a szimulációs modell kiértékelései alapján javaslatokat teszek a folyamat optimalizálására.

9. Javaslatok a gyártósor fejlesztésére

A szimulációs modell alapos elemzése után levont következtetések alapján megállapítottam, hogy a gyártási folyamat mely részegységei szorulnak fejlesztésre és ennek érdekében milyen változtatások beépítése indokolt. Az alábbiakban ismertetem azokat a legfontosabb intézkedéseket, amelyek a valós gyártórendszer maximális kihasználásához elengedhetetlenek.

A digitális iker vizsgálatával kapott adatok szerint optimálisabb megoldást eredményez, ha az egyes részfolyamatok a folyadéktöltő berendezés kapacitásához igazodnak. Ezzel a folyadékadagoló állomás tölti be a master szerepet a gyártósorban és minden időpillanatban egy aktuális számot küld el kérésként az összetétel csiga irányába, mely érték az éppen aktuális töltési kapacitás kiszolgálásához elegendő flakonok számát jelenti. Az összetétel csiga csak

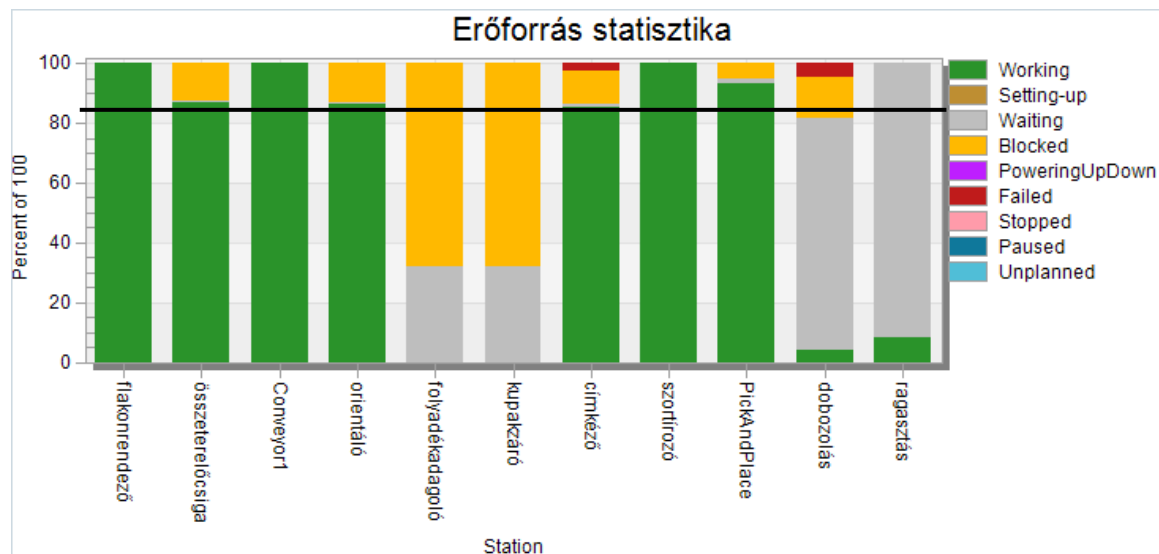
és kizárólag a kérésnek megfelelő számú flakont enged a gyártósorra, melynek hatására csökken az állomások között feltorlódó flakonok száma.

A rendszerben ezenfelül mindenképpen szükséges biztonsági tartalék figyelembevétel is. A tartalék nem vehet fel túl nagy értéket, mivel ez esetben újra torlódás alakulna ki a gyártórendszerben, azonban túl kicsi szám sem adható meg, ugyanis ekkor flakonborulás alkalmával jókora idővesztés generálna. A szimuláció segítségével a töltőegység kért darabszámán felül a biztonsági tartalék optimális megválasztását $+8 \text{ db}$ flakonként értelmeztem.

Emellett a szimulációs eredmények alapján arra a következtetésre jutottam, hogy a szortírozó állomás útterelő egységének darabos mozgása is hátráltatja a folyamat gördülékenységét. A megtöltött flakonok túl lassú ütemben kerülnek a megfelelő futószalagra, illetve hosszadalmas folyamat során alakul ki a 8×5 -ös kiosztású elrendeződésük. A modell beállításai szerint növelhető az útterelő kar sebessége, amely a szortírozó állomás gyorsabb működését eredményezi. Ezen elképzelést a szimulációs elemzések is remekül alátámasztották, melyekben a 8×5 -ös elrendeződés esetén a munkaállomás működési idejét $1,2 \text{ s}$ -mal sikerült csökkenteni. A gyorsítás műveletét egy pneumatikus nyomásszabályzó beiktatásával hoztam létre.

Az utolsó észrevételem a gyártási folyamattal kapcsolatosan a csomagoló állomás sebességének felülvizsgálatát tartalmazza. A dobozoló állomás sokkal ritkábban hajt végre műveletet, mint a folyamatban az ezt megelőző egységek, hiszen egy dobozban összesen 20 db flakon található. A dobozolás $96,36\%$ -os rendelkezésre állása szembeütően alacsony a gyártósor többi állomásához képest. A dobozolás folyamatának alapos tanulmányozása után azt a következtetést vontam le, hogy a hibás darabok keletkezésének nagy százalékáért a túlzott sebesség felel. Ennek következtében megvizsgáltam a szimuláció segítségével, hogy mekkora sebességcsökkentés nem okoz még torlódást a gyártósoron. A folyamat ezen szakaszában már csak dobozolt termékek érkeznek átlagosan $8,6 \text{ doboz/perc}$ ütemidő mellett. A javaslatom azt tartalmazza, hogy a dobozoló munkaállomás sebességének $1 \frac{m}{s}$ -mal való lerövidítése nagymértékben hozzájárulna az állomás hibáinak csökkenéséhez.

Ezen módosítások alkalmazása mellett a szimulációs modell elemzése a következőképpen változnak:



28. ábra: A javaslatok megfogadásával kapott erőforrás statisztika

Ehhez tartozóan a számadatok a következők:

3. táblázat: A javaslatok megfogadásával kapott szűk keresztmetszet analízis

	SZŰK KERESZTMETSZET ANALÍZIS JAVASLATOKAT KÖVETŐEN			
Gyártósori elem	Üzemelési idő megoszlása (%)			
	Working	Waiting	Blocked	Failed
Flakonrendező	100.000	0.000	0.000	0.000
Összeterelő csiga	87.558	0.164	12.278	0.000
Conveyor	100.000	0.000	0.000	0.000
Orientáló	86.325	1.106	12.569	0.000
Folyadékadagoló	0.000	32.355	67.645	0.000
Kupakzáró	0.000	33.296	66.704	0.000
Címkező	85.325	0.646	11.465	2.564
Szortírozó	100.000	0.000	0.000	0.000
Robotkar	94.354	1.426	4.220	0.000
Dobozolás	4.939	76.981	13.533	4.547
Ragasztás	9.542	90.458	0.000	0.000

A gyártórendszer folyamatainak átdolgozása és a digitális iker átalakítása után látványos javulás tapasztalható. A kiértékelésekből látható, hogy az állomások többsége 85% feletti kihasználtsággal dolgozik, blokkolt működési idejük jelentősen csökkent és ezzel együtt minimalizálódott a várakozási idejük is. A változtatások eredményeképp kialakuló 85%-os teljes eszközhatékonyságot a (16) egyenlet is bizonyítja.

A módosított szimulációt a 2022. évi adatokban szereplő legyártott darabszámmal és elvárt sebességgel azonos értékekre állítottam be, emellett a gyártási idő a modell alapján 231 869 *perc*re csökkent.

a megtermelt mennyiség: 60 448 969 *db*

a gyártósor sebessége: 300 *db/perc*

a tervezett gyártási idő: 231 869 *perc*

a termelés hatékonysága:

$$OEE = \frac{60\,448\,969 \cdot 0,00327}{231\,869} \cdot 100 = \mathbf{85,25\%} \quad (16)$$

A megfelelően módosított digitális iker lehetővé tette a vállalat által kitűzött cél virtuális környezetben való megvalósítását, így a szimulációban a gyártórendszer 72%-os hatékonysága 85%-os értékre változott. Az eredmény azt bizonyítja, hogy az említett problémák megoldására alkalmasak a gyártósor fejlesztésére tett kezdeményezések. Ezen javaslatok valóságos kivitelezését átgondolva, majd a termelési folyamatba integrálva egy gyors és gördülékenyen működő folyamat hozható létre.

10. A kutatás továbbfejlesztési lehetőségei

Elsőként a kutatás elméleti eredményeit szeretném a gyakorlatban hasznosítani. Elsődleges célom a felépített digitális iker segítségével megfogalmazott módosítási javaslatok mindegyikét az üzem valós gyártórendszerében is megvalósítani és beépíteni a termelési folyamatba. Ez elősegíti a jelenlegi gyártási folyamat célravezető megújítását, amely a vállalat termelésének fellendítéséhez, illetve teljesítőképességének növeléséhez járul hozzá.

Ezenfelül a jövőben szeretném a szimulációs modellt is folyamatosan fejleszteni. Az aktuális digitális iker nem kezeli tökéletesen a 3D-s objektumok megjelenítését, ezért következő lépésként a gyártósor valós 3D-s képét szeretném megalkotni a szimulációban, ezzel valósághűbb külalakot kölcsönözve a modellemnek.

Terveim között szerepel egy olyan gyári modell elkészítése is, amelyben már az alapanyag rendelés és készanyag elszállítás is modellezésre kerül.

Mindezek mellett szeretném a digitális modellt kiterjeszteni a cég hasonló elven működő gyártórendszereire is. Ennek köszönhetően a vállalatnak lehetősége nyílna arra, hogy optimalizálja a gyártósorokra fordított fejlesztési ütemtervét. Bízom abban, hogy munkám eredményeképp az üzem más gyártósorainak termelése a szimuláció alkalmazásával hatékonyabbá válhat.

11. Összegzés

A kutatómunkám során kitűzött célokat úgy gondolom, sikeresen teljesítettem és a virtuális gyártás eszközét alkalmazva hozzájárultam a kiválasztott vállalat termeléstámogatásához.

A projekt ideje alatt egy ipari gyártósor mélyreható elemzését követően felépítettem annak digitális ikertestvérét a *Tecnomatix Plant Simulation* szimulációs program felhasználásával. A valós gyártórendszer többszöri helyszíni felmérése után a szimulációban mérethelyes és a valóságos működéssel azonos modellbeállításokat alkalmaztam. A szimulációs modellt a cég 2022. évi gyártósori adatai alapján kiértékeltem és megállapítottam a szűk keresztmetszeteit. A digitális modellben sikerült elérnem a vállalat által meghatározott 85%-os teljes eszközhatékonyságot. Ennek alapján a modell újra konfigurálásával fejlesztési javaslatokat határoztam meg a vállalat felé, melyek közül már többet is alkalmaznak a gyártósoron. Bízom abban, hogy az együttműködés a jövőben továbbra is fennmarad és lehetőségem lesz a kutatás folytatására tapasztalataim bővítése érdekében.

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnék köszönetet mondani témavezetőmnek, Sarvajcz Kornél Tanár Úrnak a lehetőségért, amellyel elérhetővé tette számomra, hogy egyetemi tanulmányaim kiegészítéseként a gyártási folyamatok gyakorlati alkalmazását tanulmányozhassam, ezen túlmenően a témakör feldolgozásában megtehessem első lépéseimet. Támogatása, türelme, valamint biztató szavai nélkül pályamunkám elkészítése nem lett volna lehetséges.

Irodalomjegyzék

- [1] Lechler T., Fischer E., Metzner M., Mayr A., Franke J., *Virtual Commissioning – Scientific review and exploratory use cases in advanced production systems*, Procedia CIRP, 2019, Volume 81, pp. 1125-1130
- [2] Palánkai E., Sarvajcz K., *Virtuális gyártás alkalmazása ipari gyártóegységek optimalizálására*, XXIV. Energetika-Elektrotechnika – ENELKO és XXXIII. Számítástechnika és Oktatás – SzámOkt Multi-konferencia, 2023, pp. 54-58
- [3] Xcelgo by Schneider Electric, *What is virtual commissioning?*, Online: <https://xcelgo.com/virtual-commissioning> (Utolsó letöltés: 2023.11.02.)
- [4] Desoutter Industrial Tools, *Ipari forradalmak – az Ipar 1.0-ból az Ipar 4.0-ba vezető út*, Online: <https://www.desouttertools.hu/on-iparaga/hirek/641/ipari-forradalmak-az-ipar-1-0-bol-az-ipar-4-0-ba-vezeto-ut> (Utolsó letöltés: 2023.10.11.)
- [5] Dr. Gyurika I. G., Márton Z., Dr. Fodor D., *Digitális gyártás és kommunikációs protokollok*, Online: https://moodle2.mk.uni-pannon.hu/pluginfile.php/35980/mod_resource/content/0/Digit%C3%A1lis%20gy%C3%A1rt%C3%A1s%20tananyag.pdf (Utolsó letöltés: 2023.10.22.)
- [6] Puskás E., *Ipar 4.0 megoldások a Fizikai Interneten alapuló logisztikai hálózatok megvalósításához*, Online: <https://repozitorium.omikk.bme.hu/bitstream/handle/10890/16142/ertekezes.pdf?sequence=2> (Utolsó letöltés: 2023.11.01.)
- [7] Kokareva V. V., Smelov V. G., Malyhin A. N., *Production Processes Management by Simulation in Tecnomatix Plant Simulation*, Applied Mechanics and Materials, 2015, Volume 756, pp. 604-609
- [8] Siderska J., *Application of Tecnomatix Plant Simulation for Modeling Production and Logistics Processes*, Business, Management and Education, 2016, 14(1). pp. 64–73
- [9] Morshedzadeh I., Amos H.C. Ng, Jeusfeld M., Oscarsson J., *Managing virtual factory artifacts in the extended PLM context*, Journal of Industrial Information Integration, 2022, Volume 28, 100369

- [10] Birlasoft The CK Birla Group, *How is Digital Twin Technology Transforming the Oil & Gas Industry*, Online: <https://www.birlasoft.com/articles/how-digital-twin-technology-transforming-oil-gas-industry> (Utolsó letöltés: 2023.11.11.)
- [11] Ferreira W. P., Armellini F., Santa-Eulalia L. A., *Simulation in industry 4.0: A state-of-the-art review*, Computers & Industrial Engineering, 2020, Volume 149, 106868
- [12] Pacchini A. P. T., Lucato W. C., Facchini F., Mummolo G., *The degree of readiness for the implementation of Industry 4.0*, Computers in Industry, 2019, Volume 113, 103125
- [13] Nick G., Kovács T., Kő A., *A company compass 2.0 : Ipar 4.0 érettségi modell és alkalmazásának tapasztalatai*, Budapest Management Review, 2023, 54 (1). pp. 52-65
- [14] Rosin F., Forget P., Lamouri S., Pellerin R., *Impacts of Industry 4.0 technologies on Lean principles*, International Journal of Production Research, 2019, Volume 58, pp. 1644-1661
- [15] Semeraro C., Lezoche M., Panetto H., Dassisti M., *Digital twin paradigm: A systematic literature review*, Computers in Industry, 2021, Volume 130, 103469
- [16] Simon J., *Ipari digitalizáció – Ipar 4.0 és virtuális valóság (VR) a gyártásban*, Jelenkori társadalmi és gazdasági folyamatok, 2023, XVIII. évfolyam, Különszám, pp. 431–443
- [17] Wegener R., Marheineke N., Hietel D., *Virtual Production of Filaments and Fleeces*, Currents in Industrial Mathematics: From Concepts to Research to Education, 2015, pp. 103–162
- [18] VanDerHorn E., Mahadevan S., *Digital Twin: Generalization, characterization and implementation*, Decision Support Systems, 2021, Volume 145, 113524
- [19] Tao F., Xiao B., Qi Q., Cheng J., Ji P., *Digital twin modeling*, Journal of Manufacturing Systems, 2022, Volume 64, pp. 372-389
- [20] Fuller A., Fan Z., Day C., Barlow C., *Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research*, IEEE Xplore, 2020, Volume 8, pp. 108952- 108971
- [21] Verma K. K., Babele V., *Evaluation and Enhancement of Transfer line in Production Process by Simulation*, Research Journal of Science and Technology, 2020, Volume 12, Issue 2, 110-122

- [22] Bendowska K., Zawadzki P., *Development and Verification of a Simulation Model of an Automated Assembly Line*, Applied Sciences, 2023, Volume 13, Issue 18, 10142
- [23] Bambura R., Sujová E., Čierna H., *Utilizing Computer Simulation to Optimize Furniture Production System*, BioResources, 2020, Volume 15, pp. 6752-6765
- [24] Pekarcikova M., Trebuna P., Kliment M., Dic M., *Solution of Bottlenecks in the Logistics Flow by Applying the Kanban Module in the Tecnomatix Plant Simulation Software*, Sustainability, 2021, Volume 13, Issue 14, 7989
- [25] BMW Group at NVIDIA GTC, *Virtual Production Under way in Future Plant Debrecen*, Online: <https://www.press.bmwgroup.com/global/article/detail/T0411467EN/bmw-group-at-nvidia-gtc:-virtual-production-under-way-in-future-plant-debrecen?language=en> (Utolsó letöltés: 2023.09.21.)
- [26] NVIDIA, *BMW Group Starts Global Rollout of NVIDIA Omniverse*, Online: <https://blogs.nvidia.com/blog/2023/03/21/bmw-group-nvidia-omniverse> (Utolsó letöltés: 2023.11.11.)
- [27] Világgazdaság magyar gazdaság, *Most már nehéz lenne átvinni Romániába a BMW debreceni gyárát – fotók*, Online: <https://www.vg.hu/vilaggazdasag-magyar-gazdasag/2023/07/most-mar-nehez-lenne-atvinni-romaniaba-a-bmw-debreceni-gyarat-fotok> (Utolsó letöltés: 2023.11.11.)
- [28] Dr. habil Oláh J., Prof. Dr. Popp J., Erdei E., *Az Ipar 5.0 megjelenése: ember és robot együttműködése*, Logisztikai trendek és gyakorlatok, 2019, V. évfolyam, 12-19
- [29] Petrila S., Brabie G., Chirita B., *The use of Tecnomatix software to simulate the manufacturing flows in an industrial enterprise producing hydrostatic components*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2016, Volume 145, Issue 4, 042032
- [30] Siemens Digital Industries Software, *Discrete Event Simulation with Tecnomatix Plant Simulation Tutorials*, Online: <https://resources.sw.siemens.com/en-US/download-discrete-event-simulation-with-tecnomatix-plant-simulation-tutorials#disw-fulfillment-form> (Utolsó letöltés: 2023.11.11.)