



**Országos Tudományos Diákköri
Konferencia
2025**



**Ember-gép kollaboratív munkavégzés vizsgálatára alkalmas
diszkrét eseményű szimulációs modell fejlesztése**

Készítette: Parádi Norbert Zoltán

Témavezető: Dr. Ruppert Tamás

Mérnöki Kar, Rendszermérnöki Intézeti Tanszék

A pályamunka lezárásának dátuma: 2024.11.21.

Tartalomjegyzék

1. BEVEZETÉS	2
2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS.....	3
2.1 IPARI DIGITALIZÁCIÓ LEHETŐSÉGEI	3
2.2 AZ AUTOMATIZÁCIÓ KORLÁTAI	4
2.3 EMBER-GÉP KOLLABORÁCIÓ	5
2.4 BIZTONSÁGI SZEMPONTOK	7
2.5 EMBER-GÉP ÜTEMEZÉS ÉS MUNKAKIOSZTÁSA	8
2.6 SZIMULÁCIÓ SZEREPE A KOLLABORÁCIÓBAN	10
3. DISZKRÉT ESEMÉNYŰ SZIMULÁCIÓ LEHETŐSÉGEI	11
4. GYÁRTÓKÖRNYEZET BEMUTATÁSA.....	14
5. FEJLESZTETT SZIMULÁCIÓS MODELL.....	18
6. SZIMULÁCIÓS EREDMÉNYEK	26
7. KOLLABORÁCIÓS ÜTEMEZÉSRE KÉPES SZIMULÁCIÓS MODELL	29
8. ÖSSZEGZÉS	31
9. IRODALOMJEGYZÉK.....	32
10. FÜGGELÉK	34

Absztrakt

A kollaboratív robotok megjelenésével technikailag elérhetővé vált az ember és gép közös munkatérben való együttműködése. Az ötödik ipari forradalom egyik alap szellemisége, hogy ember-központú megoldásokat és folyamatokat alakítsunk ki. Ez azért szükséges, mivel a teljes automatizáció korlátokat mutat mind gazdasági, mind technológia szempontból.

A kutatásom célja, hogy olyan diszkrét esemény szimuláció alapú eszköztárat fejlesszek, amellyel hatékonyan és célirányosan tudjuk megvizsgálni ezen kollaborációs folyamatok hatékonyságát és megvalósíthatóságát. A fejlesztett szimulációs modellben kulcsmutatók segítségével vizsgálom a kollaboratív és a szeparált módon megvalósított gyártást emberek és gépek között. A szimuláció segítségével lehetséges lesz költséghatékonyabban, a valós gyártás megszakítása nélkül fejlesztéseket vizsgálni. Munkám során megoldást mutatok arra, hogy hogyan lehet csökkenteni a gyártás erőforrásigényeit és maximalizálni a robotkar és a dolgozó kihasználtságát. Egy konkrét autóiipari beszállító esetében, egy meghatározott munkafolyamatra készítek esettanulmányt, ahol kiértékelésre kerül adott kollaboratív robot és operátorok munkamegosztása.

kulcsszavak: diszkrét esemény szimuláció, kollaboratív munkavégzés, gyártócella, automatizált gyártórendszer

1. Bevezetés

Az utóbbi évtizedekben rohamosan fejlődtek a számítástechnikai területek és ipari alkalmazásuk mára már nélkülözhetetlenné vált. A fejlődés hatására megjelentek a részlegesen automatizált gyártórendszerek, a szimulációk, az ipari- és kollaboratív robotok, valamint még számos egyéb technológia. Mivel a teljes automatizáció korlátokat mutat, emiatt feltétlenül szükséges az emberi munkaerő alkalmazása az automatizált gyártósorok működéséhez. Ahhoz, hogy ember és gép egy munkatérben tudjon dolgozni, feltétlenül szükséges a megfelelő munkakiosztás és ütemezés.

A kutatásom célja, hogy olyan diszkrét esemény szimuláció alapú eszköztárat fejlesszek, amellyel hatékonyan és célirányosan tudjuk megvizsgálni ezen kollaborációs folyamatok hatékonyságát és megvalósíthatóságát. A fejlesztett szimulációs modellben kulcsmutatók segítségével vizsgálom a kollaboratív és a szeparált módon megvalósított gyártást emberek és gépek között. A szimuláció segítségével lehetséges lesz költséghatékonyabban, a valós gyártás megszakítása nélkül fejlesztéseket vizsgálni. Munkám során egy konkrét autóiipari vállalat gyártórendszerének működése alapján fogom létrehozni a szimulációs fejlesztő környezetemet, amely segítségével a rendszer módosításainak gyártásra gyakorolt hatásait lehet tesztelni különböző scenáriók összehasonlításával. Ezen felül megoldást mutatok arra, hogy hogyan lehet csökkenteni a gyártás erőforrásigényeit és maximalizálni a robotkar és a dolgozó kihasználtságát.

2. Irodalmi áttekintés

Munkám során egy valós autóiipari gyártást fogok megvizsgálni, amelyben automatizált gépek és emberi munkavégzés egyaránt megtalálható, azonban a gépek és az ember munkája el van különülve egymástól. Hatékonyabb munkavégzést eredményezhetne, ha az emberek és gépek együtt tudnának dolgozni egyes feladatokon, vagy esetleg kiváltani egymást. Ehhez rendkívül fontos a kiosztott feladatok optimális ütemezése, amelyre kevés jó megoldás áll még rendelkezésre. Munkám során szimulációt fogok készíteni a jelenlegi gyártásról, amely segítségével költséghatékonyan lehet tesztelni a rendszer módosításokra, vagy esetleges hibákra adott válaszát. Ennek érdekében először áttekintem az ipari forradalmak hatását a gyártásra nézve.

2.1 Ipari digitalizáció lehetőségei

A 18. században történt az első jelentős előrelépés az ipar tekintetében, mivel megjelentek az első víz és gőz meghajtású mechanikus berendezések. Segítségükkel ki lehetett váltani az akkor szerszámokkal való kézi megmunkálásokat és helyettük gépekkel lehetett előállítani termékeket. A 19. század vége fele megjelentek az elektromos árammal meghajtott gépek. Ez lehetővé tette az első gyártósorok létrejöttét és megkezdődött a tömeggyártás. A 20. század vége fele megjelentek az első programozható logikai vezérlők (PLC) és számítógépek, melyek felhasználásával részleges automatizációt lehetett megvalósítani egyes gyártórendszereknél.

Az Ipar 4.0 kifejezést először egy német tudóscsoport kezdte el használni 2011-ben, majd később ezt az kifejezést több ország is elfogadta [1]. Ez egy olyan gyártási modell, amelynek fő célja a személyre szabott gyártás elérése, valamint a termékek piacra jutásához szükséges időknak minimalizálása. Segítségével lehetségessé válik a gyorsan változó piacra való reagálás és a rugalmasabb gyártás megvalósítása. Az Ipar 4.0 egyik legfontosabb újítása, hogy a gyártásban résztvevő termékek, gépek, rendszerek mind kommunikálni tudjanak egymással [2]. Amennyiben ez megvalósul, a gyártás képes lesz adaptívan alkalmazkodni a kapott információk alapján, így növelve a hatékonyságát. Az Ipar 4.0 számos technológiai megoldást foglal magában, mint például a Big Data, Internet of Things (IoT) és Kiberfizikai rendszerek (CPS) [3].

A Big Data kifejezés sok különböző forrásból származó nagy mennyiségű adatra utal, amelyek között korrelációkat feltárva, illetve matematikai módszerekkel előre meg lehet határozni egy esemény kimenetelének valószínűségét, majd ezáltal megfelelő döntéseket hozni [4]. Az adatok alapján valós idejű visszajelzést lehetne adni a termelésben részvevő operátoroknak, ezzel is segítve őket. A sok adat alapján könnyebbé válik a rendszerhibák

okainak meghatározása is [5]. A nagy mennyiségű adatok felhasználhatóak szimulációk fejlesztésére is, ezáltal realisztikusabb modellt eredményezve.

Az Internet of Things (IoT) valós idejű kapcsolatot tesz lehetővé a termelésben résztvevők között, interneten vagy valamilyen hálózaton keresztül. Lehetővé teszi a távoli adatgyűjtést, monitorozást és vezérlést [6]. A Kiberfizikai rendszerek (CPS – Cyber-Physical Systems) magában foglalják az okos gépeket, folyamatokat, gyárakat és raktári rendszereket, amelyek autonóm módon cserélhetnek információkat és hajthatnak végre szükséges cselekvéseket, például üzemeltetést, újratermelést, rendelést és fizikai áruk áthelyezését [7]. Például gyártók a termelésben lévő szerszámok állapotáról kapott adatok alapján még meghibásodás előtt prediktív karbantartást tudnának eszközölni. A raktárak érzékelhetnék előre egy szükséges alkatrész elfogyásának közeledtét és erre reagálva előre új megrendelést adhatnának le beszállítóknak.

A Digitális Iker mindezen információkra és rendszerekre építve egy összehangolt, intelligens rendszert alkot, amely tovább fejleszti és optimalizálja a termelési folyamatokat [8]. A Big Data és az IoT által gyűjtött adatok lehetővé teszik a Digitális Iker számára, hogy valós időben értékelje a termelési teljesítményt, előre jelezze a lehetséges problémákat, és akár automatikusan beavatkozzon a folyamatokba a hatékonyság növelése érdekében.

Az Ipar 4.0 koncepció már lehetővé teszi a teljes automatizációt, tehát emberi beavatkozás nélkül lehetséges lenne a teljes gyártási folyamat lebonyolítása, de ezt megvalósítani sok esetben rendkívül komplex feladat és nem költséghatékony. Ez azért van, mert a teljes automatizáció bizonyos esetekben korlátokat mutat, ennek eseteit a 2.2. fejezetben fogom ismertetni. Ezen korlátok miatt a még kutatási fázisban lévő Ipar 5.0 az ember központú gyártást helyezi előtérbe [9], amely koncepció az Operátor 4.0, az emberi munkaerő forradalmának koncepcióján alapszik [10], [11].

2.2 Az automatizáció korlátai

Gyakran előfordul, hogy az automatizálás bevezetésének költségei meghaladják annak előnyeit. Ennek legjellemzőbb példája, amikor egy vállalat csak kis mennyiségben, de nagy varianciában állít elő termékeket. Az automatizált rendszerek gyakran igényelnek jelentős kezdeti befektetést és időt, amely csak nagy termelési volumen esetén térül meg. A nagy kezdeti költségek miatt kisebb cégeknél az automatizáció nem megvalósítható [12]. A jelenlegi technológiákkal rendkívül drága tud lenni a komplex feladatok automatizált kivitelezése. Mivel ezek megtervezése nehéz feladat és gyakran bevezetésük kockázatokat is hordozhat magával. Speciális vagy egyedi gyártás esetén előfordulhat, hogy nem egységesíthetők a gyártási

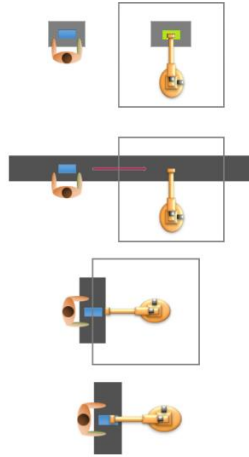
folyamat egyes lépései olyan mértékben, hogy az megérje az automatizált gyártást. Ha egy adott iparágban, vagy technológiai területen gyorsan változnak az előírások vagy elvárások, az automatizációra fordított beruházások hamar elavulhatnak és azok folyamatos újítása további kiadásokhoz vezet. Bizonyos területeken jogszabályok, etikai irányelvek vagy biztonsági előírások korlátozhatják az automatizáció bevezetését [13]. Például egy olyan automatizált rendszerre, ami személyes adatokkal dolgozik a jogszabályok szigorú szabályozásokat írhatnak elő, ami korlátozza az automatizáció alkalmazását. Az ilyen rendszerekre jellemző, hogy nagy adatmennyiség található meg bennük, amely nagy értéket képvisel, ennek esetleges kibertámadásokkal való feltárása szintén nagy kárt okozhat a rendszer működésében. Ha az adott feladat ellátására alkalmas emberi munkaerő költsége alacsony, akkor az esetek többségében nem éri meg automatizálni a feladatot [14].

Ezek az esetek jól összefoglalják azokat az eseteket, amikor az automatizáció önmagában nem megoldás. Az ideális megoldás az lenne, ha az egyszerű folyamatokat automatizálnánk, és a komplexebb feladatok megmaradnának az embernek oly módon, hogy a gép kooperál az emberrel és nem veszélyezteti.

2.3 Ember-gép kollaboráció

A kollaboráció olyan szervezett, szinkron tevékenység, amely kettő vagy több egyén között, egy adott problémára vonatkozó közös cél elérésének érdekében valósul meg. A kollaboratív tevékenységek során az emberek és gépek megosztják erőforrásaikat, tudásukat és készségeiket. Az együttműködés során a résztvevők gyakran egymás között kommunikálnak, megosztják információikat és tapasztalataikat és közösen hoznak döntéseket.

Az ember és gép közötti munkavégzés olyan folyamat, amelyben emberek és gépek együtt dolgoznak egy munkafolyamatban. A közös munkavégzést robotok esetén különböző csoportokba lehet válogatni, az együttműködés szintjeitől függően (1. ábra).



1. ábra: Fentről lefelé: Szeparáció, Koegzisztencia, Kooperáció, Kollaboráció [15]

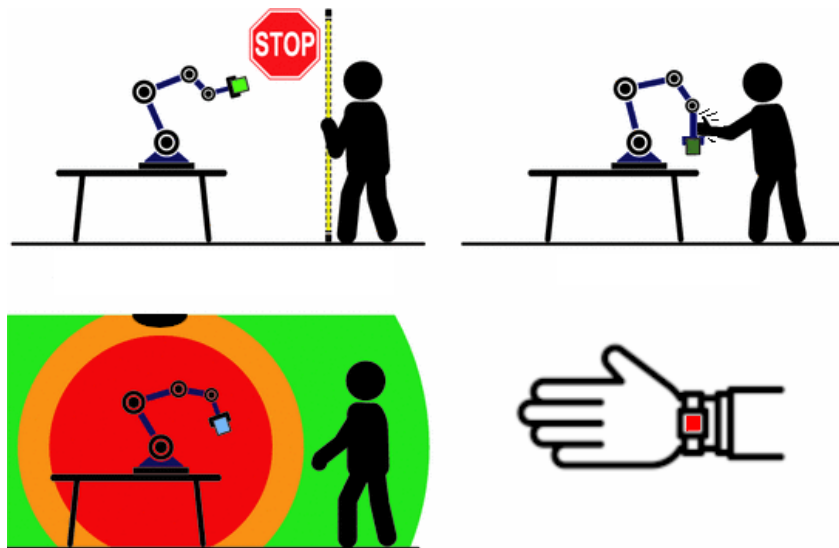
A legalacsonyabb szint a *Szeparáció*, amikor az ember és a robot egymástól fizikailag elkülönítve, időben egymástól függetlenül végzi saját munkáját. A munka végzése során nem osztoznak munkadarabokon és szerszámokon, nem kerülnek kapcsolatba egymással. A következő szint a szekvenciális gyártási folyamat szintje, azaz a *Koegzisztencia*. Ekkor az ember és robot már dolgozhat ugyanazon munkadarabon, de a feladatok elvégzésének szigorú sorrendisége van. A munkában részvevő két fél a sorrendiséget betartva oszthat meg munkadarabokat és szerszámokat. Magasabb szinten már dolgozhat egyidejűleg az ember és robot ugyanazon a munkadarabon, azt a feltételt betartva, hogy a munkadarab különböző részein dolgozzanak és különböző feladatot valósítsanak meg. Ezt nevezzük a *Kooperáció* szintjének. A legmagasabb szint a *Kollaboráció*, ahol ez a feltétel is megszűnik, továbbá az is, hogy ember és robot külön térben dolgozzon. Tehát az ember és a robot egy térben egy időben dolgozik ugyanazon munkadarabon, egy közös feladat elvégzése érdekében. Ez a fajta közös munkavégzés lehetővé teszi, hogy a robotok hatékonyabban és sokoldalúbban végezhesék a feladatokat, és csökkenti az emberi beavatkozás szükségességét a folyamatokban.

A kollaboratív munkavégzéshez a jelenleg az úgynevezett kobotok (kollaboratív robotok) a legjobban illeszkedő robotok, mivel ezeket direkt arra fejlesztették ki, hogy az emberrel egy környezetben, biztonságosan és együttműködve tudjanak dolgozni. Feladatukat tekintve az emberi munka kiváltása helyett inkább a kiegészítésen van a hangsúly. Jellemző tulajdonságaik, hogy kisebb helyeken is elférnek, könnyen programozhatóak és nagy érzékenységű beépített biztonsági szenzorokkal vannak ellátva. Ezek a szenzorok arra vannak kifejlesztve, hogy az esetleges ütközéseket elkerüljék, vagy ütközés esetén a robotkar mozgását azonnal megállítsák.

Ahhoz, hogy egy kollaboratív robot ténylegesen biztonságos legyen emberi környezetben való munkavégzésre, további külsőleg csatlakoztatott biztonsági szenzorok alkalmazása szükséges.

2.4 Biztonsági szempontok

A robotok alkalmazásának közvetlen eredménye az új kockázatok növekedése a munkavállalók balesetveszélyeinek tekintetében. „Amikor egy kollaboratív robotos alkalmazás kerül vizsgálatra biztonsági szempontból, akkor a teljes munkateret és a benne levő eszközöket figyelembe kell venni a kockázatértékelés során, valamint azok felhasználási módjait” [16]. Egy alapvető biztonsági megoldás lehet az, hogy a robotot elkerítjük az emberi munkakörnyezettől. De még biztonságosabb és hatékonyabb munkakörnyezetet tudunk kialakítani különböző biztonsági szenzorok alkalmazásával (2. ábra).



2. ábra: Biztonsági szenzorok

Ilyen biztonsági berendezés lehet a fényfüggöny, amely infravörös vagy lézer technológiát használ a dolgozók védelmére. Ha egy dolgozó belép a fényfüggöny által megvédett területbe, akkor a robot automatikusan leáll. Ilyen terület megfigyelési célra lehet használni a biztonsági lézerszenzorokat, amelyek a robot körülötti környezetet több zónára bontják és annak függvényében, hogy melyik biztonsági zónába lép be az ember, szabályozzák a robotkar sebességét, egy bizonyos zónán belül pedig le is állítják a robot mozgását. További megoldási lehetőséget kínálnak az úgynevezett viselhető szenzorok. Ezek segítségével a robot tudni fogja az ember pontos pozícióját és ehhez igazítva tudja végezni munkáját. A biztonságos munkavégzést nem csak az ember és robot egymáshoz viszonyított helyzete alapján tudjuk fejleszteni. A robotkart elláthatjuk nyomásmérő szenzorokkal, amelyek érzékelik, ha a robot

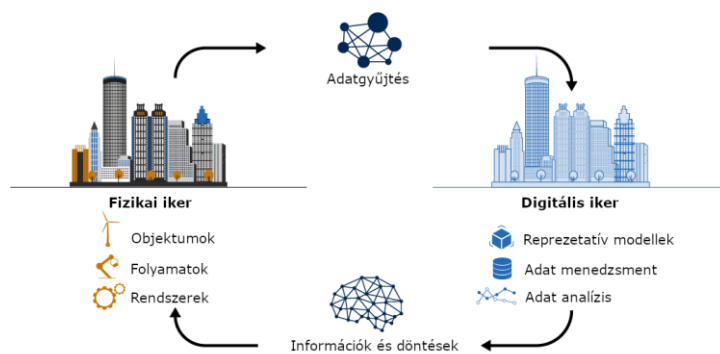
ütközik egy objektummal. Ekkor a robotkar leáll, ha bekövetkezik az ütközés az is rendkívül veszélyes lehet, emiatt a robotokat érdemes rugalmas borítással borítani.

Az esetleges veszélyeket csökkenthetjük a robot és ember között kiosztott feladatok megfelelő ütemezésével is.

2.5 Ember-gép ütemezés és munkakiosztása

Az ember és gép közötti munkavégzés olyan folyamat, amelyben emberek és gépek együtt dolgoznak egy munkafolyamatban [17]. Ennek megvalósítása kihívást jelent a technológia és az emberi felhasználók számára. Ahhoz, hogy egy ilyen gyártási folyamat működőképes legyen, elengedhetetlen az információ áramlása és a hatékony kommunikáció a különböző folyamatok és részvevői között. Ezzel a kérdéskörrel foglalkozik többek között az Ipar 4.0 részét képező Operátor 4.0 koncepciója, amely az ipari robotok és az emberi munkavállalók közötti hatékonyabb együttműködést és kommunikációt célozza az ipari folyamatokban. A hatékonyabb együttműködés pedig javítja a termelékenységet és a minőséget, csökkenti a költségeket. A kommunikáció segítségével a robotok képesek lennének tanulni egymástól, valamint hatékonyabban együttműködni azáltal, hogy feladatokat ütemezzenek az egymástól szerzett információk alapján.

Hatékonyabb feladatmegoldást lehet elérni azzal is, ha emberi fiziológiai reakcióelemzést alkalmazunk, amely azon alapszik, hogy figyelemmel kísérik a munkavállalók teljesítményét, cselekedeteiket, reakcióikat és jólétüket. Végül, az emberi tényezők értékelése lehetővé teszi, hogy megértsük, hogyan dolgoznak az emberek hatékonyan, hogyan mozognak a munkaterületen, hogyan használják az eszközöket és erőforrásokat, és hogy stresszes körülmények között hogyan viselkednek [11]. Ezen információk gyűjtése alapján létre lehetne hozni egy digitális ikerpárt (3. ábra), amely egy virtuális modellt jelent, amely pontosan leírja és szimulálja a valódi rendszer működését [18].



3. ábra: Digitális iker

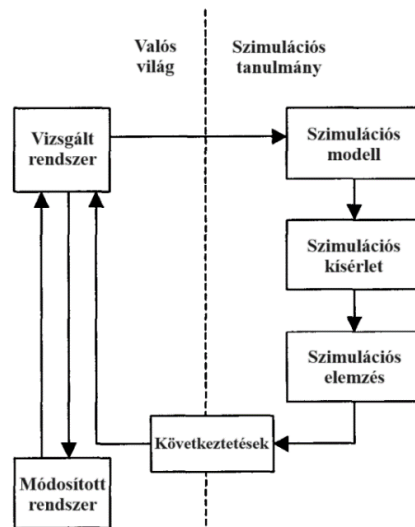
Ez a modell lehetővé teszi az adott rendszer elemzését és optimalizálását anélkül, hogy közvetlenül be kéne avatkoznunk az eredeti rendszer működésébe [19]. A cél ezzel az lenne, hogy az így szerzett információkkal jobban tervezhessük meg a munkaterületeket és munkafolyamatokat.

Minél több információval vannak ellátva berendezéseink, annál inkább autonómmá és önszervezőbbé tudnak válni, ami még összetettebbé teszi a gyártást. A termelési folyamatok növekvő komplexitása hatással lesz az ember és a technológia közötti együttműködésre. Az embereket ezért műszaki támogató rendszerekkel kell segíteni, amelyek célja, hogy áttekinthetően összegyűjtsék és megjelenítsék az információkat, hogy javítsák a döntéshozatalt és növeljék a termelékenységet. Az Ipar 4.0 technikai támogató rendszerei lehetnek például olyan mobil eszközök, mint a táblagépek, okos telefonok és okos szemüvegek. Ezeket a támogató eszközöket egységes néven hívhatjuk ember-gép interfészeknek (Human Machine Interface - HMI). A HMI lehetővé teszi az emberek számára, hogy információt kapjanak a gépekről és rendszerekről, illetve vezéreljék és irányítsák azokat. A HMI funkciói lehetnek egyszerűbbek, például egy gombnyomás, vagy érintőképernyő használata, vagy bonyolultabbak, mint például a hangvezérlés, vagy a gesztusérzékelés.

A HMI alkalmazása az ipar 4.0 korában kéz a kézben jár a megfelelő munkaerői kompetenciával. A kompetencia ebben a kontextusban olyan készségeket, képességeket, tudást, attitűdöket és motivációt jelent, amelyekkel az egyén hatékonyan tud megküzdeni a munkával kapcsolatos feladatokkal és kihívásokkal. A kompetenciahiány gyorsabb csökkentésének és az agilitás növelésének egyre jelentősebb kihívást jelent, amelynek kezelése szükséges a jövőbeni kihívások legyőzése érdekében. Erre megoldást nyújthatnak a szimulációk, amellyel valósághű gyártási eseményeket tudnak gyakorolni a gyártásban résztvevő alkalmazottak, anélkül, hogy kárt tennének a gyártásban [19].

2.6 Szimuláció szerepe a kollaborációban

A szimuláció egy valós rendszer leképzése egy mesterséges környezetben számítógépes rendszeren keresztül [20]. Az így modellezett rendszer lehetővé teszi, hogy kísérletezni lehessen rajta, így megismerve a rendszer működését, és előre jelezni annak viselkedését bizonyos feltételek mellett. A szimuláció hasznos eszköz lehet a valóságos világban zajló folyamatok megértéséhez, elemzéséhez és optimalizálásához anélkül, hogy a valóságban nagy költségek, vagy kockázatok keletkeznének.



4. ábra: Szimulációs tanulmány sematikus ábrázolása [21]

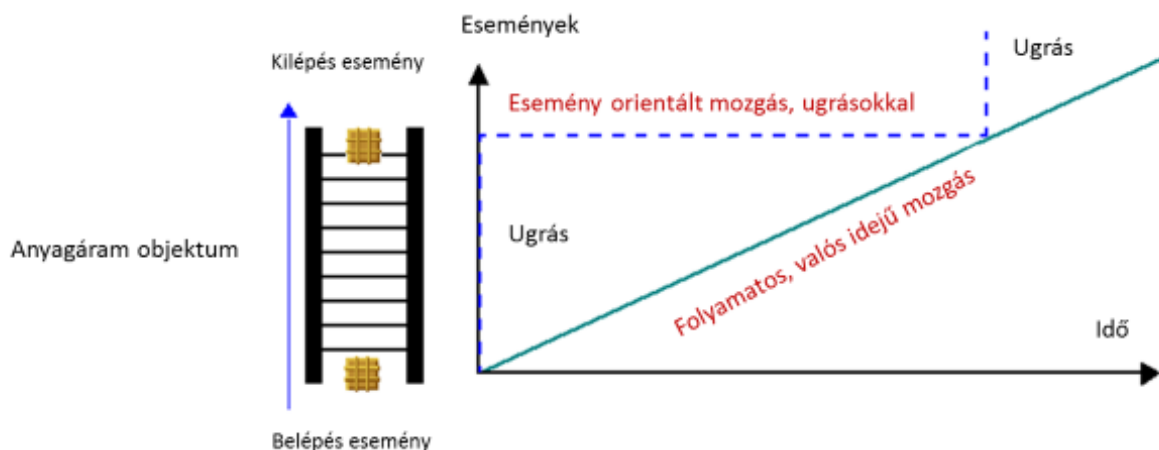
Szimulációt jellemzően egy még nem létező rendszer elkészítése, vagy már egy meglévő rendszer fejlesztésének céljából érdemes készíteni. Így lehetséges csökkenteni a fellépő hibák számát, megakadályozni az erőforrások felesleges felhasználását és optimalizálni a rendszer teljesítményét. Szimuláció elemzés során különböző scenáriók összehasonlításával válaszokat kaphatunk például az ilyen jellegű kérdésekre: Melyik ütemezési módszert lenne a legjobb alkalmazni a gyártórendszeremben? Milyen erőforrásigények szükségesek a rendszer megfelelő működéséhez? Hogyan reagálna a rendszer, ha egy további géppel bővíteném? Ha egy adott hiba jelentkezne, annak milyen következményei lennének? Mi lenne, ha az operátorok több feladatot végeznének felváltva? [21] A szimulációkat gyakorlatban főleg olyan esetekben érdemes használni, amikor:

- analitikus módszerekkel a rendszer nem leírható, vagy leírása körülményes
- a valós rendszeren való kísérletezés veszélyes, vagy hosszadalmas
- a rendszer túlságosan összetett
- a rendszer kimenetei nem észlelhetőek

3. Diszkrét eseményű szimuláció lehetőségei

A diszkrét esemény szimuláció (DES – Discrete Event Simulation) egy olyan számítógépes modellezési technika, amelyet gyakran használnak olyan rendszerek tanulmányozására, ahol időben előre nem meghatározott események (diszkrét események) sorozataként követik egymást. Az események olyan időpontokat jelölnek, amikor a rendszer állapota megváltozik az idő múlásától függetlenül, például egy folyamat kezdetekor vagy végén (5.ábra).

DES szimuláció esetén feltételezzük, hogy két esemény között nem történik semmi, vagyis két egymást követő esemény között a rendszerben nem történik állapotváltozás [22].



5. ábra: Folyamatos és diszkrét működés különbsége

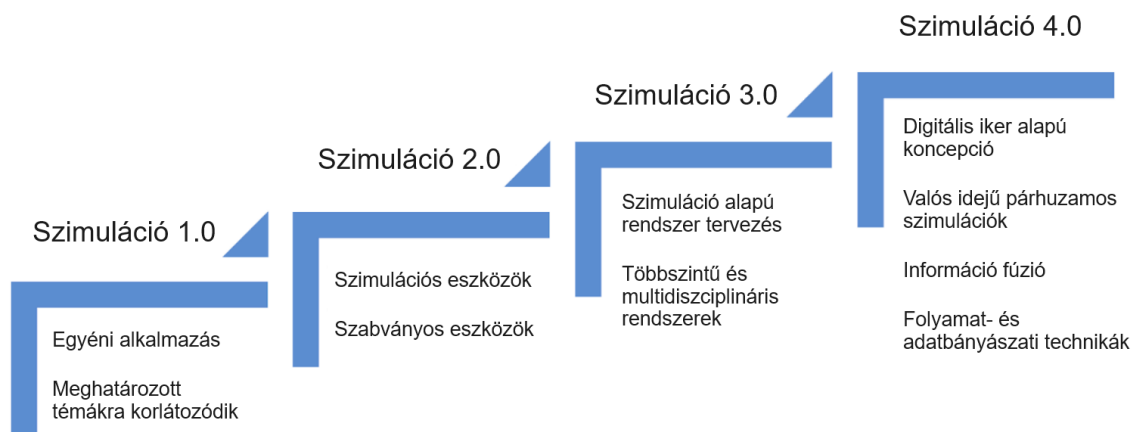
A DES legnagyobb előnye, hogy rendkívül komplex rendszereket is egyszerűen lehet modellezni segítségével. Ez annak köszönhető, hogy a rendszer viselkedését események szabályozzák, amelyek nem kötődnek szigorúan időpontokhoz. Ezen felül még számos előnye van alkalmazásának. A DES lehetővé teszi, hogy szimuláljuk egyes gépek állapotváltozásait, például meghibásodását. Az állapotváltozásra reagálva lehetséges olyan tevékenységeket meghatározni, amelyek csak akkor hajtódnak végre, ha az adott állapotváltozás következik be. Ez lehet például egy meghibásodás esetén végrehajtódó karbantartás szimulációja. A DES rendkívül jól használható hibaanalízisre is. Segítségével vizsgálható a rendszer reakciója egy adott hibára.

További előnyeikhez tartozik a valós időben való futtathatóság. Ezt az Ipar 4.0 koncepcióval rendkívül hasznosan fel lehet használni. Például egy gyártórendszerről valós időben adatokat szolgáltatunk a szimulációnak, amely az adatok alapján képes előre megjósolni a bekövetkező események kimeneteleit és aszerint szabályozni a rendszert, hogy optimális gyártást eredményezzen.

Ezzel a kérdéskörrel foglalkozik a Szimuláció 4.0 nevezetű koncepciója [23]. Mielőtt ismertetném működését és lényegét, bemutatnám a létrejötte előtti szimulációs megoldásokat.

Ahogy azt a 6. ábra mutatja, a szimuláció 1.0 volt az első ilyen szimulációs törekvés. Az első generációs szimulációkat jellemzően egyedi alkalmazásokra készítették. Ezt követte a szimuláció 2.0, amely már szabványosított és általánosított szimulációs eszközöket tartalmazott. Nagy előrelépést jelentett a szimuláció 3.0 megjelenése, amely lehetővé tette a többszintű és multidiszciplináris (több szakterületet érintő) rendszerek tanulmányozását. Erre egy megoldás lehet például a HIL (Hardware-In-the-Loop) szimulációs struktúra [19]. A HIL szimuláció segítségével lehetséges egy valós gyártáson lévő hardver eszköz tesztelése és validálása. Ahhoz, hogy ez megvalósuljon, valós idejű kommunikációt kell biztosítani a hardver és szimuláció között valamilyen interfész segítségével. Ehhez feltétlen teljesülnie kell az Ipar 4.0 azon feltételének, hogy a gyártásban résztvevőknek egy egységes, minden résztvevő által értelmezhető módon kell tudnia kommunikálni a többi résztvevővel.

A Szimuláció 4.0 valós idejű információkat használ, melyeket a digitális iker felé továbbítva virtuális térben DES szimulációval lehetséges modellezni, ezzel megjósolva előre a fellépő hibákat vagy változásokat és a rendszer erre való reakcióját. Ezt követően a digitális iker beavatkozást eszközölhet a valós gyártásban résztvevőkre. Így akár a munkám során készített diszkrét esemény szimuláció egy digitális iker alapját is képezhetné, de a digitális ikert nem fogok készíteni a dolgozat részeként.



6. ábra: Folyamat szimulációk evolúciója [19]

A dolgozatomhoz szükséges szimuláció elkészítéséhez a Siemens Tecnomatix termékcsaládjának Plant Simulation szoftverét választottam [24]. A Plant Simulation egy diszkrét esemény vezérelt folyamatszimulációs eszköz, amely segítségével jól modellezhetők termelési és logisztikai folyamatok. A szoftver kifejezetten gyár, gyártósor és ehhez kapcsolódó folyamatok szimulációjára és optimalizációjára lett kifejlesztve. Ehhez számos hasznos megoldást nyújt, ezért következőkben felsorolnám a szoftver előnyös funkcióit:

- A szoftverben lehetőség van gyártórendszerek 2D és 3D-s modelljeinek elkészítésére is egyaránt
- A gyártásban résztvevő emberi munkások viselkedései és cselekedetei is modellezhetők
- A program nyitott architektúrájának köszönhetően lehetséges külső programokból szerzett adatok (CAD, XML, SQL és egyéb fájltypusok) felhasználása
- Átfogó analízis eszközöket és azok megjelenítésére alkalmas grafikonokat is tartalmaz (pl. szűk keresztmetszet elemzés, Sankey-diagram és Gantt-diagram)
- A szimulációban lehetséges valós időben szimulálni a rendszer működését

A szoftver objektum orientált működésű, ennek köszönhetően rendkívül komplex rendszereket is egyszerűen meg lehet valósítani a szimulációkban. A programban lehetséges saját, felhasználó által létrehozott objektumokkal, vagy a szoftvercsomag széleskörű kínálatából választott előre elkészített objektumokkal való modell felépítés. Objektumoknak hívjuk például a különböző be- és kimeneteket, termékeket, gépeket és további modell alkotásra alkalmas eszközöket. Az objektumokból felépített rendszerhez hozzá lehet adni metódusokat, amelyek egyes objektumokban való változás következtére lépnek működésbe és a modell működését befolyásolják. Az objektum orientáltságnak köszönhetően egy objektumon belül lehetséges további objektumokat létrehozni, ezzel részletesebb és a valós működéshez jobban hasonlító összetett szimulációkat is lehet készíteni.

Az objektumokat két csoportra lehet bontani tulajdonságaikat tekintve. Ezt a két csoportot képezi a mozgó, illetve nem mozgó elemek csoportja. A mozgó elemek csoportjába jellemzően szállítási eszközök, konténerek és munkadarabok (7. ábra) tartoznak. Ezeket a mozgó elemeket az angol nevükből eredően MU-nak (Movable Unit) nevezzük.



7. ábra: Mozgó elemek

Nem mozgó elemek lehetnek az MU-kat generáló, majd a folyamat végén elnyelő be- és kimenetek, az MU-kat feldolgozó munkaállomások, pufferek, össze- és szétszerelő állomások, valamint az MU-k továbbításáért felelős konvektorok, áramlás vezérlők és robotkarok (8. ábra).

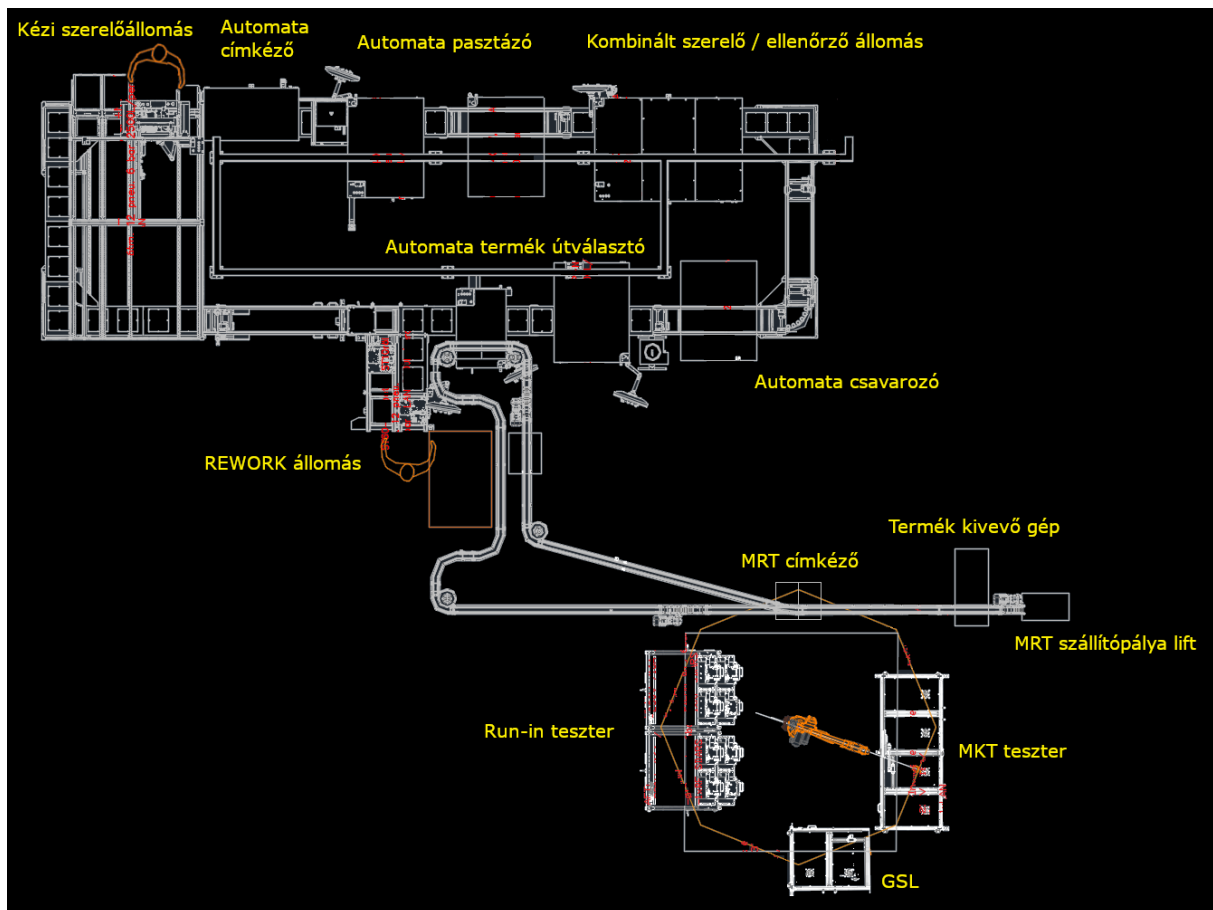


8. ábra: Nem mozgó elemek

A szoftver összes objektumára igaz, hogy attribútumokkal, tehát tulajdonságokkal rendelkeznek. Az attribútumok határozzák meg például egy gép munkaidejét, kapacitását, állapotát és még számos jellemzőt. Ezeket az attribútumokat a szimuláció futása közben valós időben lehetséges módosítani vagy megfigyelni.

4. Gyártókönyvet bemutatása

A szimulációt egy autóiipari cég valós gyártórendszeréről készítettem. A gyártórendszer feladata, hogy a beérkező alkatrészeket összeszerelje, majd az összeszerelésből kapott késztermék minőségét ellenőrizze. A gyártás felépítését a 9. ábra mutatja. Jól látható, hogy a gyártás két külön részre oszlik fel. Az első részen a termék összeszerelése zajlik, a második részen pedig a késztermék funkcionalitásának és minőségének tesztelése. Ezt a két részt a továbbiakban első gyártórésznek, illetve második gyártórésznek fogom nevezni.



9. ábra: Gyártórendszer felépítése

A gyártásban minden gépnek megvan a saját feladata, amit el kell végeznie egy adott terméken. Ezek a feladatok az úgynevezett lépések. Ezen felül minden terméknek meg van szabva, hogy milyen lépéseken, milyen sorrendben kell átesnie, hogy az késztermékké válhasson. A termékhez tartozó információk **SAP vállalatirányítási rendszerben** vannak nyilvántartva. A rendszer segítségével nyomon követhető egy termék gyártásának múltja, valamint az is hogy melyik termékbe milyen modulok épültek be. A gyártás jobb megértéséhez a gyártásban résztvevő berendezéseket, elemeket fogom ismertetni.

A rendszer két részén egy-egy **konvejpálya** továbbítja a termékeket. A konvejpályák folyamatos egyirányú mozgásban vannak és a rájuk helyezett úgynevezett **paletták** segítségével képesek továbbítani a termékeket. A paletták azonos, vagy különböző termékek tárolására is egyaránt alkalmas tárolóegységek. Segítségükkel egyszerre lehet mozgatni az alkatrészek egy csoportját. A **stopperek és kiemelők** gépekben, illetve konvejszalagokon is elhelyezkedhetnek egyaránt. Feladatuk a termék megállítása, illetve tovább engedése (bizonyos feltételek teljesülése esetén). Segítségükkel lehetséges a konvejszalagnak csak egy bizonyos pontján lévő paletták megállítása úgy, hogy a konvejpálya továbbra is mozgásban maradjon.

A **kézi összeszerelő állomás** a gyártás első eleme. Az állomásra érkező üres paletták megállításra kerülnek. Ezt követően egy operátor feladata felhelyezni a szükséges alkatrészeket. Egy termék előállításához négy alkatrész szükséges: egy öntvény, egy nyomtatott áramköri lap (áramköri elemekkel és csatlakozókkal felszerelve), egy fedőlap és egy ventilátor. Az előbb említett első három alkatrészt az operátor felhelyezi a palettán kialakított helyükre. Ezt követően a ventilátoron szereplő vonalkódot beolvassa kézi bárkód olvasóval, olvasás után pedig felhelyezi a ventilátort a nyomtatott áramköri lapra, majd csatlakoztatja csatlakozóját. Ezt követően az operátor egy gombot megnyomva jelzi a gép felé, hogy végzett a műveletekkel és a paletta továbbításra kerül az **automata címkézőbe**.

Az alkatrészek beérkezésekor a nyomtatott áramköri lap vonalkódja automatikusan a gép által beolvasásra kerül és a címkéző nyomtat egy vonalkódot az öntvény számára, amit nyomtatás után rá is helyez. Ha ezzel végzett, a termék továbbításra kerül. Az alkatrészek beérkezése után a **pasztázó gép** pasztát visz fel az öntvény és a fedőlap felületeire. Erre azért van szükség, mert a késztermék működése során az elektromos alkatrészek hőt generálnak és ezt a hőt képes elvezetni a paszta. Miután végzett a pasztázó, a termék továbbításra kerül.

A **kombinált szerelő / ellenőrző állomás**ba érkező alkatrészek először egy kamerás ellenőrzési folyamaton esnek át, ahol a pasztázás eredményét ellenőrzik, illetve azt, hogy minden alkatrész megfelelően helyezkedik-e el a palettán. Amennyiben az ellenőrzéssel végzett a gép, a paletta tovább halad a gép végébe, ahol aztán meg is áll. Itt történik az alkatrészek összeszerelése. Az összeszerelést egy Kuka robotkar végzi. Az öntvény képezi a termék alapját, erre kerül rá a nyomtatott áramköri lap a rajta lévő ventilátorral együtt, majd ezt követően a fedőlappal lezárjuk a terméket. Ezt követően az összeszerelés illesztései kamerás ellenőrzésen esnek keresztül, majd a termék továbbításra kerül a **csavarozóba**.

Az összeszerelt termék beérkezésekor a gép csavarokkal rögzíti az öntvényre illesztett fedőlapot. Ezt követően a termék továbbításra kerül az **útválasztóba**, amelybe miután beérkezett a paletta a termékkel, két irányba haladhat tovább. Amennyiben sikeres volt az első gyártórészben minden lépése, a gép az első konvejorszalagon lévő palettáról áthelyezi a második konvejorszalagon lévő palettára a terméket. Ezt követően mindkét palettát tovább engedi. Amennyiben viszont a beérkezett termék tartalmaz hibás lépést (tehát sikertelen volt valamely művelet, amit végrehajtottak rajta korábban), akkor a gép a palettát a rajta lévő hibás termékkel együtt a **Rework állomásra** továbbítja.

A Rework állomásra érkezik minden hibásnak ítélt termék. Az állomásnál dolgozó operátornak ellenőriznie kell a beérkező terméket és eldönteni, hogy javítható-e még a termék. Ha nem javítható a termék, akkor azt a selejteknél fenttartott tárolóba helyezi az operátor.

Amennyibe az operátor úgy dönt, hogy javítható, akkor a hiba okát megszünteti, ezt rögzíti a termékhez tartozó SAP felületen, majd a felhasználható alkatrészeket a palettán tovább engedi. Ez a paletta az alkatrészekkel együtt újra a kézi összeszerelő állomásra fog érkezni. Az itt lévő operátornak pótolnia kell a hiányzó alkatrészt, ha szükséges. Az első gyártórészen lévő többi gép a paletta belépésekor le fogja kérdezni, hogy az adott terméken van-e elvégzendő feladata és csak akkor lát neki, ha szükséges. Amennyiben nincs elvégzendő feladata a terméket azonnal tovább engedi. Így elkerülhető az a hiba, hogy egy feladat kétszer legyen végrehajtva egy adott terméken.

A gyártásban kétféle tesztet különböztetünk meg, mindegyikből egy-egy darab található a gyártásban. Az egyik az **MKT teszter**, amely egy 12 férőhelyes teszter gép, a másik pedig a **Run-in teszter**, amely egy 4 férőhelyes gép. Mindkét gép a késztermék különböző funkcionalitásait teszteli le. A gépekből ki és berakodást robotkar végzi. A terméknek először mindig MKT teszten, majd ezt követően Run-in teszten kell részt vennie. Amennyiben az MKT teszter és Run-in teszter is sikeresnek ítélte az adott terméket, a robotkar az **MRT címkéző**höz tartja a terméket, ahol két további címkét ragaszt a gép a termékre. Ezek a címkék már a késztermékre vonatkoznak. Ezt követően robotkar továbbítja a terméket a következő pozíciójába, jellemzően a **GSL**-be.

A GSL-be beérkező késztermékek kamerás ellenőrzésen esnek át. A kamerás ellenőrzés egy képfeldolgozó szoftver segítségével működik. Ellenőrzésre kerülnek a csatlakozások, illesztések, a csatlakozók állapotai, illetve a termékre ragasztott címke olvashatósága. Ezt követően a terméket robotkar továbbítja, a második konvejpályán lévő üres palettára. Ezt követően a palettán lévő termék a **késztermék kivevő gép**be kerül, ahol lehetősége van az operátornak levenni a terméket a konvejszalagról. Ez jellemzően akkor történik, ha hibás vagy sikeresen elkészült termék érkezik. Ekkor az operátornak a hibás, vagy kész termékeknek fenttartott dobozokba kell helyeznie a termékeket. Az itteni munkát jelenleg ugyan az az operátor végzi, aki az alkatrészek felrakodását is.

Az **MRT szállítópálya lift** a második konvejpálya termék kivevő részén túl helyezkedik el. Itt a konvejpálya önmaga alatt folytatódik és kanyarodik vissza. Ez a lift, arra van, hogy a termékeket leengedje a konvejpálya folytatásához. Ezzel a második konvejpálya egy zárt hurkot alkot. Ez azért jó, mert amennyiben egy gép kiürülésére várna egy termék egy másik gépben (ezzel helyet foglalva), helyette a konvejpályán tud keringeni.

A gyártás során a teszterek dolgoznak a legtöbb ideig a rendszerben, mondhatni ezek alkotják a gyártórendszer szűk keresztmetszetét. Hiszen egy gyártórendszer csak annyira gyorsan tud gyártani, amennyire azt a leglassabb gépe engedi. Amíg a teszterek tesztelnek,

addig a robotkar amely ezek között mozgatja a termékeket áll. Ez a termelésben veszteséget jelent. Ezt az állásidőt hasznos munkaidővé lehetne fordítani, ha a robot várakozás helyett besegítene az összeszerelő robotnak, vagy a gyártásban résztvevő operátoroknak. Azt, hogy ez milyen változást hozna a termelésre nézve, szimulációval fogom vizsgálni.

5. Fejlesztett szimulációs modell

Gyakorlati munkám először a gyártási folyamat lépéseinek vizsgálatával kezdődött. A gyártósor működését több módszer segítségével határoztam meg. Először csak nagy vonalakban megfigyeltem a gyártást és próbáltam megérteni, hogy mi történik az egyes gépeknél, illetve mi miért történik. Ebben nagy mértékben segített, hogy több éve dolgozom már a cégnél és tapasztalattal rendelkezem a gyártásról és menetéről. Amennyiben szükséges volt a gyártósor működéséről lehetőségem volt kérdezni az azon dolgozó munkatársaktól is. Így a gyártási folyamat működését sikerült első sorban jól megismernem.

A megfigyelés során tapasztaltam, hogy az automatizált teszter cellában lévő robotkar nincs megfelelően kihasználva, az idő nagy részében csak áll és nem dolgozik, ebből következik, hogy a robotkar nincs maximálisan kihasználva. Ez abból ered, hogy a robot egyetlen feladata a teszterek közötti munkadarab továbbítás, a teszterek pedig (a folyamat többi lépéséhez viszonyítva) sok ideig dolgoznak egy adott termékmennyiségen. Így amíg a teszterek tele vannak termékekkel és a munkájukat végzik, a robotkar áll. Véleményem szerint a robot állásidejét fel lehetne használni arra, hogy más állomásokon végezzen addig munkát, illetve kollaboratívan besegítsen az operátorok munkájába. Ez megvalósítható lenne, ha a gyártórendszer úgy lenne kialakítva, hogy a robotkar képes legyen egy lineáris pályán átmozogni több gyártóegységhez. Ezzel a megoldással, amíg a teszterek dolgoznának és robotkar feladat nélkül maradna huzamosabb ideig, át tudna mozogni a termék összeszerelő állomáshoz és a termékek összeszerelését is el tudná végezni, ezzel kiváltva az ottani robot szerepét. Másik megoldás lehet, hogy a robot a kézi összeszerelő állomáshoz mozogna és kollaboratívan segítene az operátornak alkatrészeket felhelyezni a palettára. Akár ki tudná váltani a termék útválasztó feladatát is, hiszen annak rakodó feladata is megvalósítható robotkarral. Az ilyen jellegű fejlesztéseket gyakorlatban nagyon előnytelen lenne kipróbálni, mivel megvalósítása drága és nagyon nagy termelés kiesést okozna. Azonban a szimuláció segítségével, amit készítek lehetőség nyílik a korábban említett fejlesztéseket kipróbálni virtuális térben költséghatékonyan, a valós rendszer működését nem befolyásolva.

A gyártás során a két konveijorpályán fix mennyiségű paletta áll rendelkezésre, amelyek a termékeket továbbítják. Ezek mennyisége is befolyásolja a gyártórendszer hatékonyságát, tehát

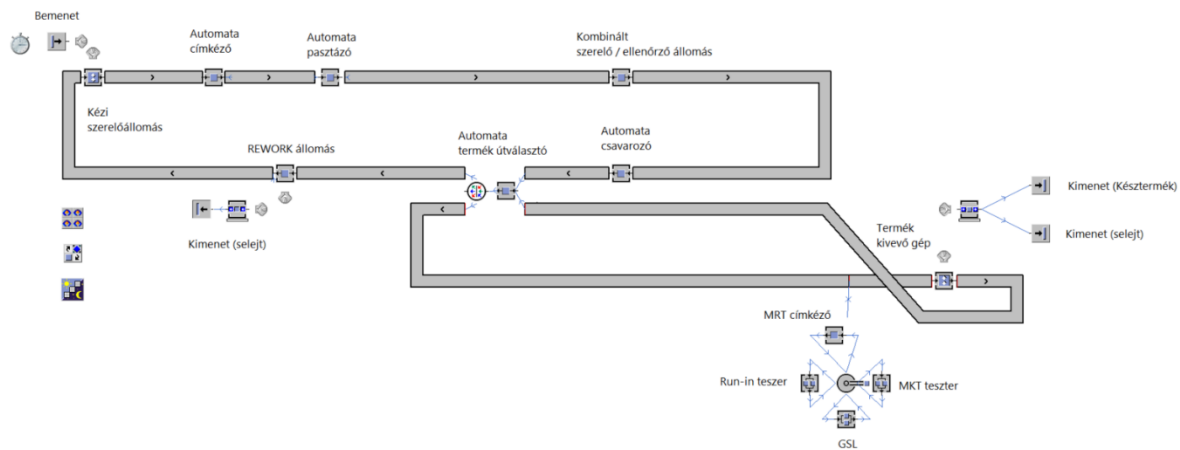
fontos a megfelelő paletta mennyiséget meghatározni adott konveijorpályára. Erre is megoldást nyújt a szimuláció, segítségével ez könnyedén meghatározható az optimális paletta mennyiség.

Következő lépésként idő adatokat kezdtem el gyűjteni a gyártásról. Az idő adatokat gyártás közben magam mértem meg. Egy adott esemény idejét igyekeztem minimum háromszor megmérni, hogy aztán abból átlagot és szórást lehessen meghatározni. Az így kapott időadatokat a dolgozatom függelék részében rögzítettem (lásd: 27. ábra), a későbbiekben fel fogom használni a szimuláció egyes lépéseire szükséges idők szimulálásához. Ezt követően elkezdtem felépíteni a szimulációs modelletem.

A szimulációs modelletem az alábbi fő lépések szerint készítettem el:

- Termék és paletták létrehozása
- Bemenet létrehozása
- Kézi összeszerelő állomás létrehozása
- Első gyártórész konveijorpályájának létrehozása
- Első gyártórész gépeinek (Címkéző-, pasztázó-, összeszerelő-, csavarozó gép) létrehozása
- REWORK állomás létrehozása
- Automata termék útválasztó létrehozása
- Második gyártórész konveijorpályájának létrehozása
- Automatizált teszter cella (Robotkar, MRT címkéző, Run-in és MKT teszterek, GSL létrehozása)
- Termék kivevő gép létrehozása
- Operátorok hozzáadása a rendszerhez
- Kimenetek létrehozása

A szimulációs modell elkészítése során figyelembe vettem azt is, hogy a valódi gépek hajlamosak hibázni, ezért a szimuláció pontosságának érdekében ezeket a hibalehetőségeket a szimulációban is megvalósítottam. A gyártásban résztvevő gépek munka idejeit, valamint konveijorszakaszok továbbítási idejeit és robotok rakodási idejeit a valós gyártásban mért idők alapján állítottam be minden egységre. A valós gyártórendszerről készített szimulációs modellt a 10. ábra mutatja.



10. ábra: Kidolgozott modell

A szimuláció működéséhez létre kellett hoznom **egyéni objektumokat**, amelyek a gyártás modellezését segítik. Először a két palettatípust hoztam létre, a valós gyártásnak megfelelően. A két palettatípust a szoftver konténer objektumából hoztam létre. Ezt követően létrehoztam két féle munkást (operátort), amelyek közül az egyik az alkatrészek palettára helyezéséért és a késztermékek elrakásáért felelős, a másik pedig a RWORK állomás működtetéséért felelős. Végül pedig létrehoztam a terméknek megfelelő objektumot, amelynek a SAP lépéseknek megfelelő lépések voltak az attribútumai (11. ábra). Ezt felhasználva a szimuláció futása során lehet látni a termékek valós idejű lépéseinek állapotát. Ezeket az állapotokat a szimulációban résztvevő gépek módosítják termékek beérkezése, illetve kilépése során.

Name	Value	Type	C..	L..
OP_ASSEMBLY		string		*
OP_GAPFILLER	In_work	string		
OP_GSL		string		*
OP_LABEL_1	COMPLETED	string		
OP_LABEL_2		string		*
OP_MKT		string		*
OP_PLACEPARTS	COMPLETED	string		
OP_REWORK		string		*
OP_RUNIN		string		*
OP_SCREWING		string		*

11. ábra: Példa a termék lépés attribútumaira

A szimuláció futtatásával először a két inicializáló metódus (12. ábra) fut le, amely adott mennyiségű palettát helyez a két konvejpályára. A valós rendszerhez hasonlóan a két konvejoron különböző paletta típusok vannak létrehozva, amelyek csak a saját konvejorukon haladhatnak. Az, hogy tényleges palettákon mozognak a szimuláció során az alkatrészek és termékek sokkal valóságosabbá teszi a modellt. Így lehetőség nyílik arra, hogy különböző paletta mennyiségekkel teszteljük le a termelés viselkedését.

```

var palettCount : integer := 16
for var i := 1 to palettCount
    .UserObjects.Palett1.create(?)
next

```

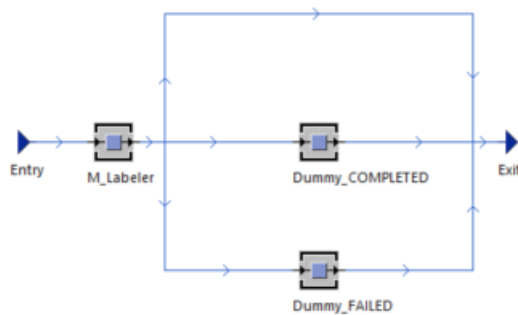
12. ábra: Első gyártórész konveijorának inicializáló metódusa

Miután létrejöttek a paletták a második konveijor pályán, de terméket még nem tartalmaznak, így azok csak körbe-körbe haladnak a konveijoron, mint ahogy azt a valós rendszerben tennék. Ennek okát már a dolgozat 4. fejezeténél a MRT szállítópálya lift részénél kifejtettem. Az első konveijor pályán pedig továbbításra kerül a paletta a **kézi összeszerelő állomásra**. Ezt az egységet a szoftver beépített összeszerelő állomásával készítettem el. Egy ilyen állomással lehetséges két (vagy akár több) termék összeszerelése. Az összeszerelő állomásnak is lehetséges meghatározni a munkaidejét, amit be is állítottam a mért adatoknak megfelelően. A munkaidőbe beleszámítottam az állomáson végzett összes művelet elvégzéséhez szükséges időt. Miután egy üres paletta érkezik az állomásra, azt a gép megállítja a valós működéshez hűen.

A rendszer **bemenete** képes legenerálni az alkatrészeket. Mivel a rendszer terhelt állapotát vizsgálom dolgozatom készítése során, így végtelen sok alkatrészt generáltak a bemenetemmel. Az így generált alkatrészeket a szimulációban egy operátor helyezi a **kézi összeszerelőn** megállított üres palettára, majd tovább küldi a palettát a konveijoron.

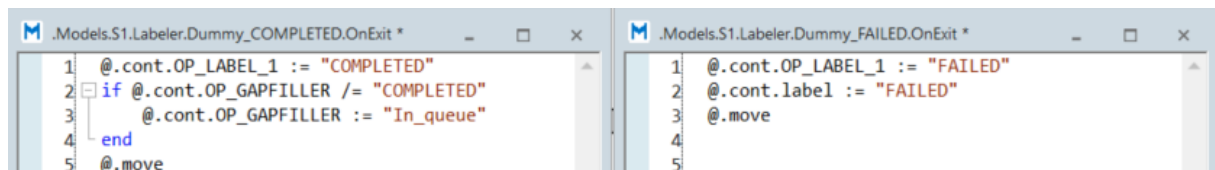
A szimulációmban a **címkéző-, pasztázó- és csavarozó gépek** nagyon hasonlóan vannak leképezve, ezért működésüket egyben fejtem ki. A gépek között csak a módosított lépések nevei és a munkaidők különböznek. Amikor valamely gépbe beérkezik egy termék, először ellenőrzésre kerül, hogy a termék az adott géphez tartozó lépésre vár-e. Amennyiben nem teljesül ez a feltétel, vagy a gép sikertelen lépéssel rendelkező terméket fogad be, a paletta a termékkel együtt rögtön továbbításra kerül. Ekkor nem módosítja a gép a termék lépéseit.

Amennyiben a termék a gépnek megfelelő lépésre vár és nem rendelkezik hibás lépéssel, a géphez tartozó lépés „In work” státuszba kerül a beérkezés után. Ezt követően a lépés vagy sikeres vagy sikertelen eredményt tud hozni. Amennyiben sikeres az eredmény, a termék adott géphez tartozó lépése „COMPLETED” státuszba kerül, valamint a termék életciklusában szereplő következő lépés státusza „In queue”-re változik. Ha sikertelen lesz az eredmény, akkor a termék géphez tartozó lépése „FAILED” státuszba kerül (és egyik lépése sem kerül „In queue” státuszba). Ezen kívül a termék „címke” nevű attribútuma is megváltozik „FAILED”-re (alaphelyzetben ez az attribútum üres). A gépek modellezésére külön vázlatokat (13. ábra) használtam, mivel csak így volt lehetséges a hibás termékek leképzése a modellben.



13. ábra: Címkező vázlata

A vázlatban magán az adott gépen kívül két úgynevezett Dummy station-t hoztam létre. Ezek üres állomásoknak felelnek meg, amelyek munkaideje nulla. Ezek csupán azért szükségesek, hogy a sikeres, illetve sikertelen műveletek esetén a megfelelő lépés státuszt kapja meg a termék. Az 13. ábrán legfelül látható elágazás pedig akkor kerül használatba, ha üres paletta érkezik az állomásra. Ekkor nem történik lépésrátétel. A vázlat úgy van megcsinálva, hogy csak egy termék tudjon benne tartózkodni egyszerre, mintha az egy valós gép lenne. Az 14. ábrán bal oldalt látható a „sikeres” Dummy kiemeneti metódusa, jobb oldalt pedig a „sikertelen” Dummy kiemeneti metódusa.



14. ábra: Címkező dummy-k kiemeneti függvényei

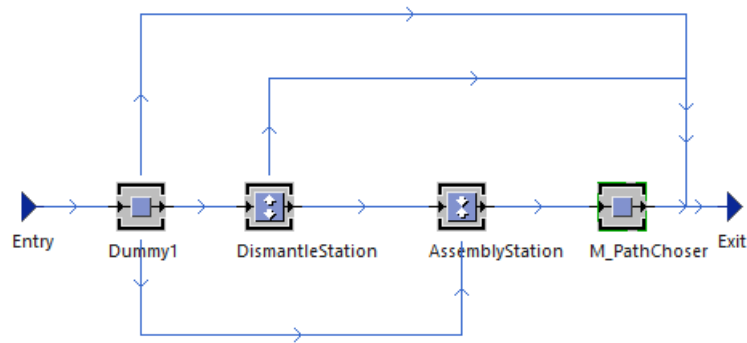
A **kombinált szerelő / ellenőrző állomáson** történik a termék alkatrészeinek összeszerelése, amit grafikus módon is igyekeztem megkülönböztetni a szimulációban úgy, hogy az összeszerelt termék másmilyen ikonnal van ábrázolva a modellben (15. ábra). Ez a gép az előző három géppel (címkező-, pasztázó-, csavarozó gép) ettől az egy grafikus kivételtől eltekintve azonosan működik. A gép munkaidejének meghatározása során az ellenőrzésre és az összeszerelésre fordított időket összeadtam.



15. ábra: Alkatrészek és az összeszerelt termék

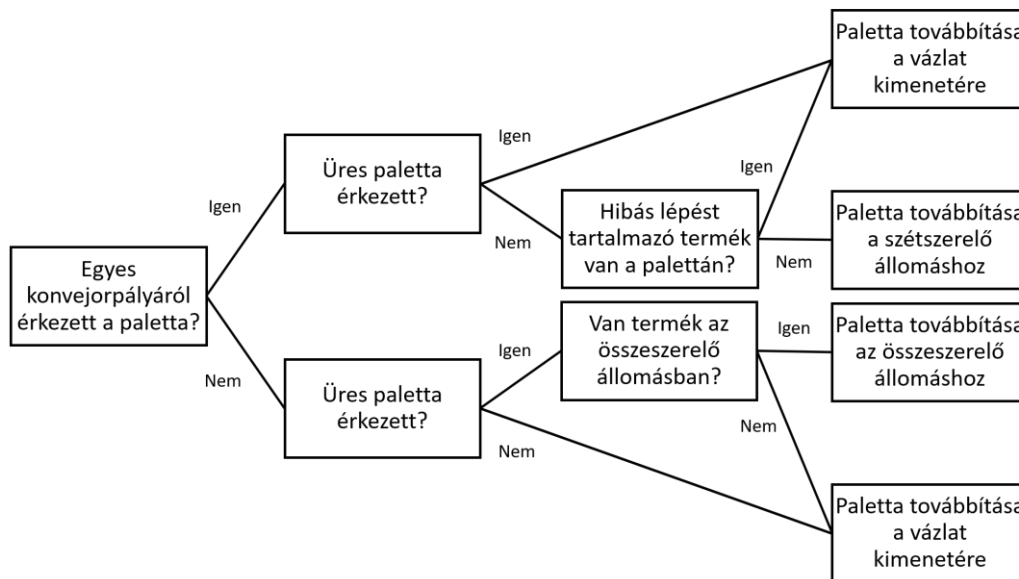
Az **automata termék útválasztó** feladata, hogy azokat az első konveijorpályáról beérkező termékeket, amelyeknek az első gyártórészen minden lépése „COMPLETED” státuszú,

áthelyezze a második konvejpályán lévő üres palettára. Ennek megvalósítása a szoftver segítségével kicsit összetett. Először is létrehoztam egy „PathChooser” elnevezésű vázlatot, amely két bemenetet tudott fogadni és egy kimenettel rendelkezett. Az útválasztó belső felépítését az 16. ábra mutatja. Az útválasztó tartalmaz egy Dummy station-t (Dummy1), egy szétszerelő állomást (DismantleStation), egy összeszerelő állomást (AssemblyStation) és magát az útválasztót szimbolizáló munkaállomást (M_PathChoser).



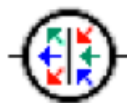
16. ábra: Termék útválasztó belső felépítése

Az útválasztóba belépő paletták először a „Dummy1” elnevezésű munkaállomásra kerülnek, amely egy nulla munkaidővel és egy kimeneti metódussal rendelkező munkaállomás. Feladata, hogy a beérkező palettákat az 17. ábrán látható logika alapján továbbítsa kimeneteire. Az szétszerelő állomás képes két összeszerelt objektum szétválasztására, jelen esetben a beérkező palettáról távolítja el a terméket. Ezt követően a palettát a vázlat kimenetére küldi, a terméket pedig az összeszerelő állomásba továbbítja. Az összeszerelő állomás képes beérkező objektumokat összeszerelni. A második konvejpályáról beérkezett üres palettát a „Dummy1” az összeszerelő gépbe küldi, ami ezt követően erre szereli rá a szétszerelő gépből érkező terméket. Így megtörténik a termék áthelyezése az egyik típusú palettáról a másik típusú palettára. A szét- és összeszerelő gépek munka idejeit nullára állítottam, mivel az őket követő „M_PathChoser” szimbolizálja a szétszerelő állomást magát, így hát az „átszerelés” összevont idejeit ennek az állomásnak állítottam be munkaidőként.



17. ábra: Dummy1 kimeneti logikája

Amikor elhagyja egy paletta a vázlatot egy áramlás vezérlőbe (18. ábra) érkezik, amely attól függetlenül, hogy van-e rajta termék vagy nincs, szétválogatja a palettákat a nekik megfelelő konvejpályákra.



18. ábra: Áramlás vezérlő

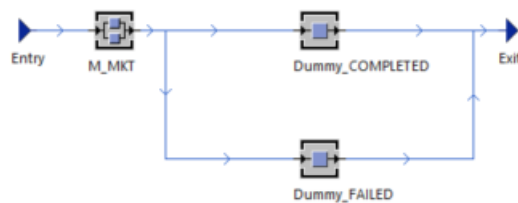
A szimulációban a **REWORK állomás**on operátor végzi a munkát. Ha az automata útválasztóból egy termék ide jut az azért van, mert hibás lépést tartalmaz. Ezt követően két dolog történhet a termékkel. Az operátor leselejtezheti, ami annyit jelent, hogy a behelyezi a selejt termékeknek fenttartott pufferbe, ezt követően pedig a selejt kimeneten fog távozni a termék a rendszerből. Másik lehetőség, hogy az operátor eltávolítja a termék hibás lépését („In queue” státuszba rakja) és a „FAILED” címkét a termékről, így szimulálva a termék hiba okának megszüntetését. A két lehetőség közül bármely teljesül, a paletta ezt követően továbbításra kerül. Mivel a gépek csak azon a terméken fogják végrehajtani a lépésüket, amely „In queue” státuszba van (a valóságos rendszerhez hasonlóan) ezért nem következhet be az a hibalehetőség, hogy egy művelet kétszer legyen végrehajtva egy adott terméken.

A második konvejpálya mentén található teszterekből és GSL gépből ki- és berakodást, valamint a termék **MRT címkéző**höz mozgatását egy **robotkar** végzi. Ennek megvalósításához a második konvejpályán el van helyezve egy szenzor, amely, ha érzékeli egy paletta a robothoz

való érkezését, akkor megállítja azt (kiemeli a konvejpályáról). Ezt követően a terméket a következő szükséges lépését megvalósító gépbe helyezi a robot, amennyiben ez lehetséges. Ha a termék továbbítás nem lehetséges, mert a célgép nem tudja befogadni a terméket, akkor a paletta a termékkel együtt továbbításra kerül a konvejpályán. A robot prioritizált sorrend alapján dönti el, hogy melyik rakodó műveletet hajtja végre több utasítás esetén.

A cellát, amelyen belül a robotkar rakodik automatizált teszter cellának hívják. Ennek leképzésére a szimulációban a GSL állomást és teszttereket párhuzamos állomásokkal valósítottam meg. A párhuzamos állomások a szoftver beépített elemei közé tartoznak. Jellegzetes tulajdonságuk, hogy x és y dimenzióban elosztva meg lehet adni a gép kapacitásait, tehát, hogy vízszintesen és függőlegesen a gépben hány hely található. Párhuzamos állomás alkalmazásával egymástól függetlenül lehet több behelyezett termék megmunkálását, vagy feldolgozását szimulálni.

A modellemben a korábban említett három gépet (**GSL, MRT- és Run-in teszter**) nagyon hasonló módon valósítottam meg. A gépeknek csupán a kapacitásuk és munkaidejük, illetve a termékre rárakott lépésük különbözik. Ahhoz, hogy a gépek a termék ellenőrzése során tudjanak hibás eredményt hozni, a gépeket vázlatokban hoztam létre, amelyekre egy példa a 19. ábrán látható.



19. ábra: MKT teszter vázlata

A vázlat tartalmaz két Dummy stationt, amelyeknek munkaideje nulla. Mindkettő tartalmaz egy-egy kimeneti metódust, amelyek felelősek a kilépő termék megfelelő lépésének rátételéért. Ezek a lépések nevét leszámítva azonosak az 14. ábrán ábrázolt metódusokkal. Az MRT címkéző azonosan működik az említett GSL és teszter gépekkel, annyi különbséggel, hogy itt párhuzamos állomások helyett munkaállomás van felhasználva.

A gyártórendszer végén található a **késztermék kivevő gép**, ahol a munkát ugyanaz az operátor végzi, aki a kézi összeszerelőnél dolgozik. Az ide érkező termékeket az operátor leveszi a konvejpályáról, ha a termék hibás lépést tartalmaz, vagy ha a termék összes előírt lépése „COMPLETED” státuszban van. Ezt követően az operátor a termékeket egy pufferbe helyezi, amely szétosztja a hibás, illetve sikeresen elkészült termékeket a nekik megfelelő kimenetre.

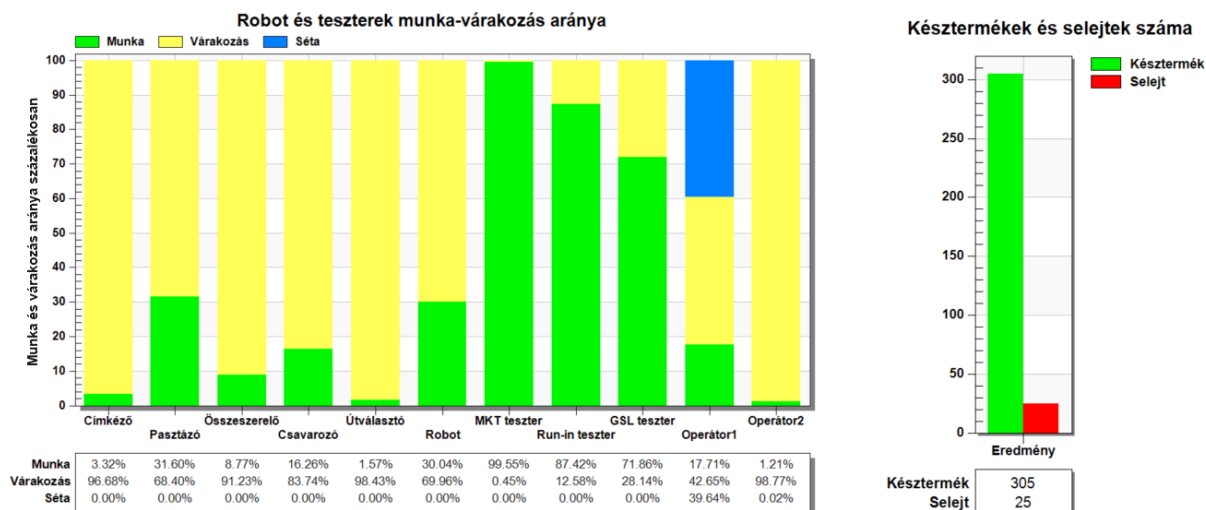
A szimulációban az operátorok létrehozásáért a „WorkerPool” elnevezésű objektum (20. ábra) felelős. Működéséhez a szimulációban meg kell adni, hogy milyen munka elvégzésére alkalmas embereket akarunk generálni, milyen mennyiségben, illetve milyen műszak beosztásban. A műszakok létrehozásáért felelős a „ShiftCalendar” nevű objektum (20. ábra), ahol a műszakok munka idejeit és szüneteit tudjuk meghatározni. Ez rendkívül hasznos, mert a munkaidők, illetve műszakok változtatásával is meg tudjuk nézni a termelésre való hatásukat. Miután az operátorok adott műszakokban létre lettek hozva, már csak az elvégzendő feladatokat kell hozzájuk rendelni a munka megkezdéséhez. Ezt a „Broker” nevű objektum (20. ábra) végzi. A feladatok kiosztásán kívül azok ütemezésére is képes prioritások figyelembevételével



20. ábra: Operátor műveletekhez szükséges egységek

6. Szimulációs eredmények

A létrehozott szimulációval már lehetségessé vált egyes forgatókönyvek tesztelése. Először a valós rendszer megépített modelljét kezdtem el vizsgálni egy napnyi gyártást szimulálva. Ebből a vizsgálatból a 21. ábrán látható eredményeket kaptam.

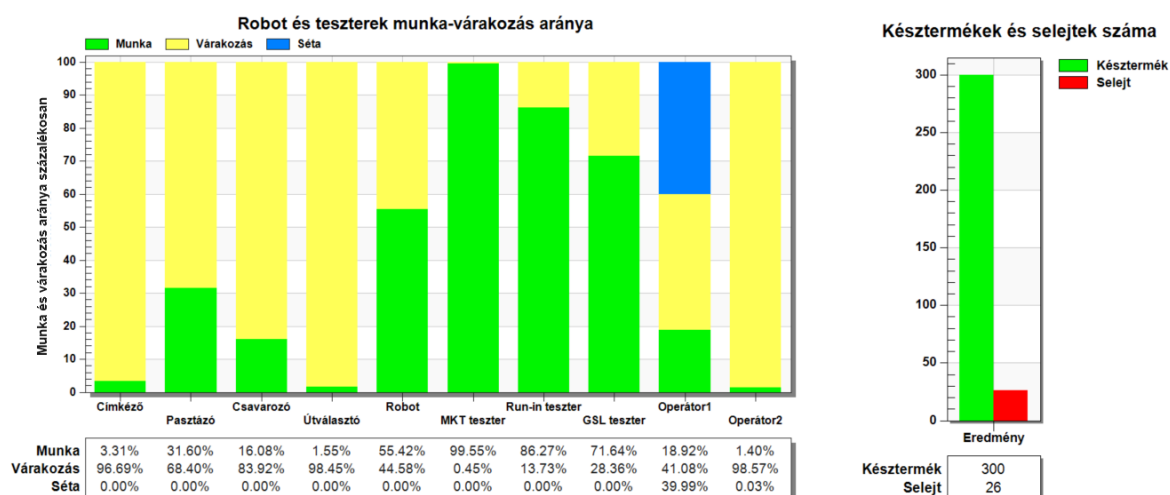


21. ábra: Szimulációs eredmények

Az ábrán jól látszik, hogy a teszter cellában lévő robot a végzett munkaidejéhez képest több mint kétszer annyit várakozik. Ezt a gyártócella működésének megfigyelése alatt is észleltem és a szimuláció segítségével ez számszerűen is beigazolódott. Az is leolvasható, hogy a

tesztetek közül az MKT teszter van a legjobban leterhelve, ez azért van mivel ennek a legtöbb a munkaideje. Ebből is látszódik, hogy ez a gyártás szűk keresztmetszete. Az első konvejpályán lévő gépek (Címkéző, Pasztázó, Összeszerelő, Csavarozó) várakoznak a legtöbbet a szimuláció során. Ebből az látszódik, hogy a termék legyártása sokkal gyorsabban megy végbe, mint annak második konvejpályán lévő tesztelése. Amennyiben erre van lehetőség, a tesztelési folyamatok felgyorsítását vagy a teszterek kapacitás növelését javasolnám ebben az esetben. A kimutatáson láthatóak az operátorok munka idejei, várakozási idejei, illetve a sétálással eltöltött idejei egyaránt. Az első operátor, aki az alkatrészeket helyezi fel a gyártás elején és a termékeket veszi ki a gyártás végén. Ezeket a feladatokat azért tudja egy operátor végezni, mert a két konvejpályának nagyban eltérnek a munka idejei. Mivel a gyártócella eleje és vége nagy távolságra helyezkedik el egymástól, így az operátornak sokat kell sétálnia a gyártás során. Ezen segíthetne egy puffer beépítése a késztermék kivető gépnél. Ha pufferbe raktározoznánk a kész termékeket, az operátor egymás után gyorsan ki tudná venni a termékeket és a nekik kialakított tárolóba helyezni azokat. A REWORK állomáson elhelyezkedő második operátor pedig rendkívül sokat várakozik, mivel kevés selejtet gyárt a gyártócella. A szimuláció eredményeként megkaptuk számszerűen az egy nap alatt legyártható késztermékek számát és a napi gyártás alatt keletkező selejtek számát.

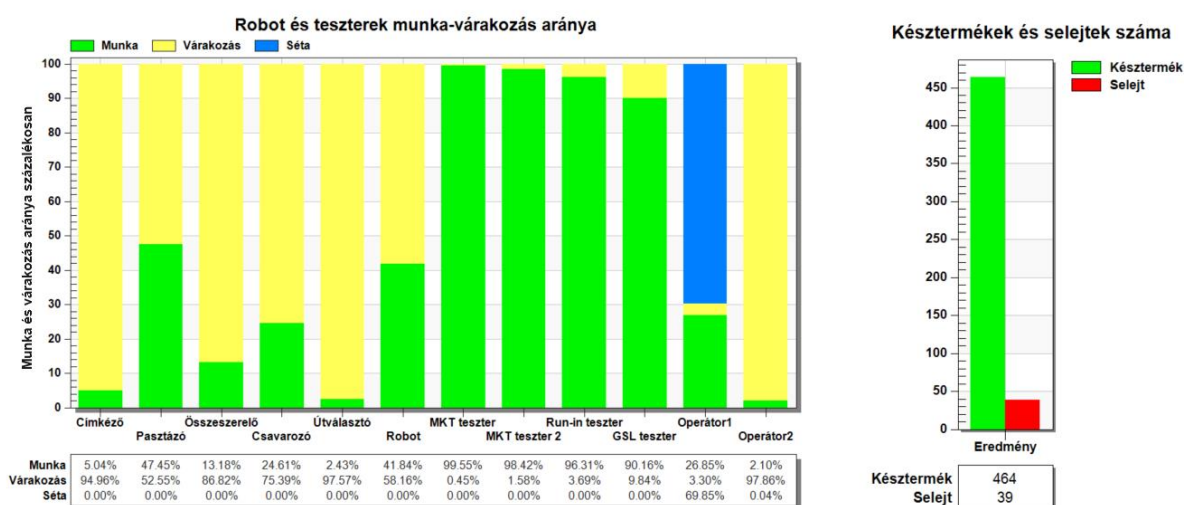
A robot jobb kihasználtsága érdekében megvizsgáltam azt az esetet, amikor a robot várakozási idejében át tudna mozogni az összeszerelő cellába és kiváltani az ott lévő szerelőrobot munkáját. Az így kapott eredményeket a 22. ábra szemlélteti.



22. ábra: A robotkar jobb kihasználtságára irányuló szimulációs eredmények

A kapott eredmények azt mutatják, hogy a robotkar kihasználtságát valóban lehet növelni az alkalmazott módszerrel. Fontos eredmény, hogy az egy napra eső késztermékek és selejtek számai csak nagyon kis mértékben térnek el az eredeti eredményektől.

Ezt követően a teszterek jobb kihasználtságát akartam elérni egy újabb szimuláció létrehozásával. Ezt a legkönnyebb úgy elérni, hogy a szűk keresztmetszetet képző gép kapacitását megnöveljük. Ennek érdekében egy újabb MKT tesztet adtam a teszter cellához, ami további 12 helyet biztosított az MKT tesztekre. Az így kapott eredmények a 23. ábrán láthatóak.



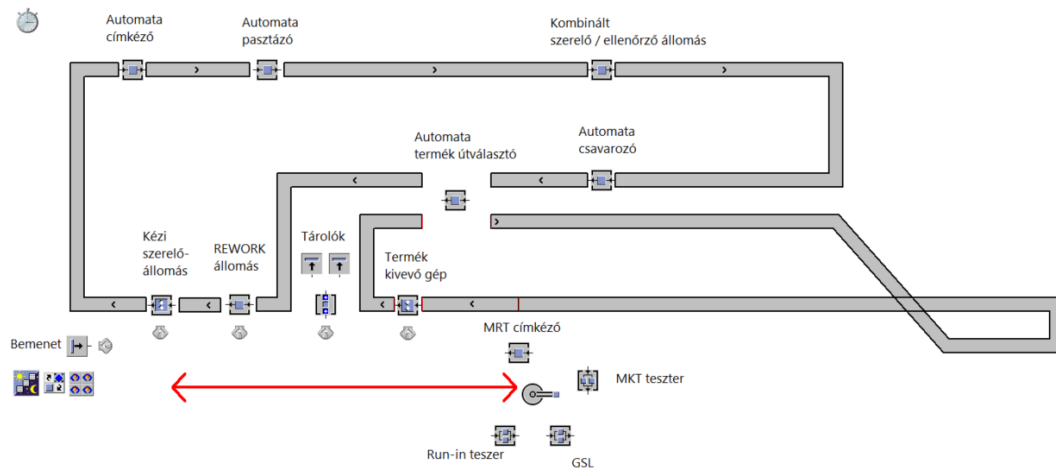
23. ábra: A teszterek jobb kihasználtságára irányuló szimulációs eredmények

A szimuláció kimutatásai szerint egy MKT teszter hozzáadásával rendkívüli eredmények érhetőek el. Az grafikonokon jól látható, hogy megnövekedett a Run-in teszter és GSL teszter kihasználtsága. Mivel a robot több helyre tud így rakodni és a teszterek is nagyobb hatékonysággal tudják végezni a tesztek, a robotkar munkaideje is megnövekedett. Ezen felül az egy napra számított késztermékek száma jelentősen megnövekedett, míg a selejtek száma csak kis mértékben nőtt. A megnövekedett gyártásnak köszönhetően a rakodó operátor várakozási ideje lecsökkent, az aktívan (munkával vagy sétálással) töltött idejei pedig növekedtek.

Az elkészített szimulációk eredményeinek alapján az MKT teszterrel való bővítés hozná a legtöbb hasznot a gyártórendszer eredményességére nézve.

7. Kollaborációs ütemezésre képes szimulációs modell

A kollaborációs munka megvalósításához a gyártórendszer egy új elrendezését találtam ki, amely segítségével ember és gép hatékonyan tudna közös térben dolgozni egymást segítve. Az elkészített elrendezés a 24. ábrán látható.



24. ábra: Ember-gép közös munkavégzésének ütemezésére alkalmas szimulációs modell

Az elkészült modellben az operátori munkát igénylő munkaállomások csoportosítva lettek egy helyre, így az operátoroknak kevesebbet kell sétálniuk a gépek között a gyártás során, ezzel energiát és időt spórolva. Az elrendezés kialakításakor igyekeztem a konvejpályák hosszainak módosítását elkerülni, hogy ez ne befolyásolja a szimulációból kapott eredményeimet. Az átcsoportosításnak köszönhetően könnyebben megközelíthetővé váltak a robotkar számára azon munkaállomások, amelyeken a robotkar dolgozni tud, vagy segítséget nyújtani az operátoroknak. Ilyen munkaállomás lehet a kézi összeszerelő állomás, ahol az alkatrészek palettára helyezését, ventilátor bárkódjának leolvasását és annak beszerelését a robotkar el tudja végezni, valamint a késztermék kivevő gép, ahol a készterméket a robotkar ki tudja venni a gépből, majd a neki megfelelő tárolóba helyezni azt. Az elkészített szimulációban a robotkar a 25. ábrán látható metódus segítségével tud három pozícióba („célhelyzetekbe”) mozogni a 24. ábrán piros nyíllal jelölt egyenes mentén. Ez a három pozíció a teszterek között, a kézi összeszerelő állomás előtt és a termék kivevő gép előtt található.

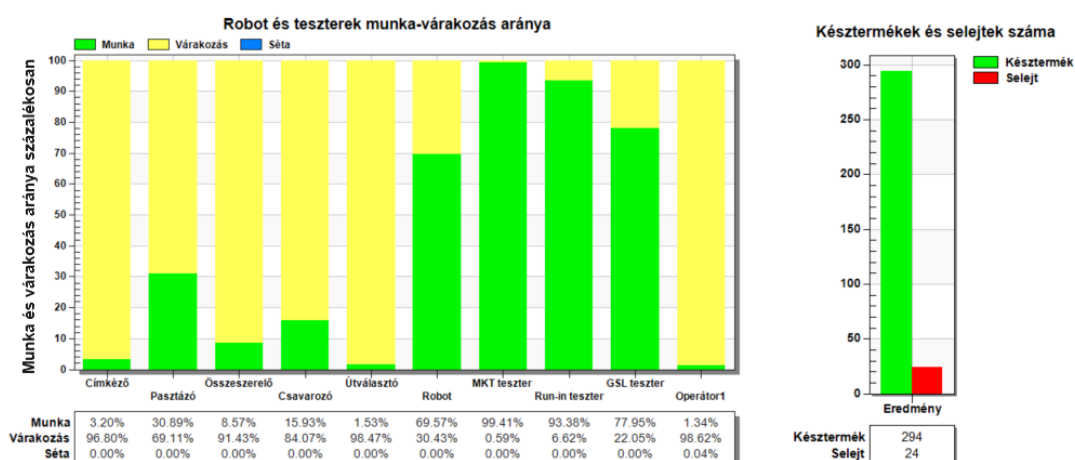
```

1 var celhelyzet:integer := root.Tester_cell.Robot.celhelyzet
2 var startTime:time := 0
3
4 while true
5   if Tester_cell.Robot.empty and startTime = 0
6     startTime := EventController.SimTime
7   end
8
9   if Tester_cell.Robot.Xpos = celhelyzet
10    root.MovingTime := root.MovingTime + (EventController.SimTime - startTime)
11    exitloop
12  elseif Tester_cell.Robot.Xpos > celhelyzet
13    wait 0.4
14    root.WaitlTime := root.WaitlTime + 1
15    Tester_cell.Robot.Xpos := Tester_cell.Robot.Xpos-10
16  elseif Tester_cell.Robot.Xpos < celhelyzet
17    wait 0.4
18    root.WaitlTime := root.WaitlTime + 1
19    Tester_cell.Robot.Xpos := Tester_cell.Robot.Xpos+10
20  end
21 end
22

```

25. ábra: Robotmozgatás metódus

A robotmozgatás során a robot figyelembe veszi az egyes feladatok prioritását is. Az elsődleges feladata a késztermék kivétele a késztermék kivevő gépből, ez azért fontos, mert a készterméket tartalmazó paletta megállításra kerülne a késztermék kivevőben, ezzel akadályozva a paletták folytonos mozgatását a második konvejorszállagon. A másodlagos feladata az automatizált teszter cellában való rakodás, harmadlagos feladata pedig a kézi összeszerelő állomáson lévő műveletek elvégzése.



26. ábra: Az átrendezett szimulációs modell eredményei

Az átrendezett szimulációs modell eredményeit a 26. ábra szemlélteti. A kapott eredményekből látszódik, hogy a robot kihasználtsága jelentősen megnőtt. Az elkészített gyártási modell segítségével akár teljesen kiváltható az egyik operátor munkája. A REWORK állomáson nem lehetséges az operátori munka kiváltása robottal, az állomáson elvégzendő feladatok bonyolultsága miatt. A gyártórendszer elrendezésének köszönhetően elérhetővé válik az ember-gép ütemezett munkavégzésének, vagy akár a kollaboratív munkavégzésnek lehetősége is.

8. Összegzés

A dolgozat megírása során egy valós autóiipari gyártórendszer működése lett bemutatva, majd a bemutatott gyártási folyamatnak egy diszkrét esemény vezérelt szimulációs modellje került elkészítésre. Az elkészült modellel lehetségessé vált és meg is valósult a jelenlegi gyártás tesztelése, valamint különböző scenáriók tesztelése is. A tesztnek eredményei kiértékelésre kerültek, majd összehasonlítás által a további következtetéseket vontam le: a gyártásban lévő összeszerelő állomás robotkarját, amely az alkatrészek összeszerelését végzi hatékonyan lehet kiváltani a teszter cellákban rakodó robotkarral oly módon, hogy a robotkar a várakozási idejében átmozogna az összeszerelő géphez és az végezné el az összeszerelési műveleteket. A szimulációk összehasonlításából az is kiderült, hogy a rendszer bővítése további teszterekkel több szempontból is hatékonyabbá tenné a gyártást. A gyártórendszer gépeinek elhelyezkedését módosítva elérhetővé válna az ember-gép ütemezett munkavégzésének, vagy akár a kollaboratív munkavégzésnek lehetősége is, ezzel együtt pedig javulna a robotkar kihasználtsága is.

A dolgozatom jó példát és segítséget nyújthat azon olvasóknak, akik hasonló módon szimulációt szeretnének készíteni és kiértékelni.

9. Irodalomjegyzék

- [1] M. F. Hocaoglu and İ. Genç, *Smart Combat Simulations in Terms of Industry 4.0*. 2019. doi: 10.1007/978-3-030-04137-3_15.
- [2] P. Marcon *et al.*, “Communication technology for industry 4.0,” *Prog. Electromagn. Res. Symp.*, pp. 1694–1697, 2017, doi: 10.1109/PIERS.2017.8262021.
- [3] A. A. Letichevsky, O. O. Letychevskiy, V. G. Skobelev, and V. A. Volkov, “Cyber-Physical Systems,” *Cybern. Syst. Anal.*, vol. 53, no. 6, pp. 821–834, 2017, doi: 10.1007/s10559-017-9984-9.
- [4] J. Fan, F. Han, and H. Liu, “Challenges of Big Data analysis,” *Natl. Sci. Rev.*, vol. 1, no. 2, pp. 293–314, 2014, doi: 10.1093/nsr/nwt032.
- [5] E. Erdei, “Az Ipar 4.0 fejlődése, használata és kihívásai napjainkban,” *Acta Carolus Robertus*, vol. 9, no. 1, pp. 49–63, 2019, doi: 10.33032/acr.2019.9.1.49.
- [6] D. Bandyopadhyay and J. Sen, “Internet of things: Applications and challenges in technology and standardization,” *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 58, no. 1, pp. 49–69, 2011, doi: 10.1007/s11277-011-0288-5.
- [7] S. Enyedi and L. Miclea, “IEEE international conference on automation, quality and testing, robotics (AQTR),” *Proc. - Int. Test Conf.*, vol. 2019-Novem, pp. 2–4, 2019, doi: 10.1109/ITC44170.2019.9000144.
- [8] T. H. J. Uhlemann, C. Lehmann, and R. Steinhilper, “The Digital Twin: Realizing the Cyber-Physical Production System for Industry 4.0,” *Procedia CIRP*, vol. 61, pp. 335–340, 2017, doi: 10.1016/j.procir.2016.11.152.
- [9] J. Leng *et al.*, “Industry 5.0: Prospect and retrospect,” *J. Manuf. Syst.*, vol. 65, no. August, pp. 279–295, 2022, doi: 10.1016/j.jmsy.2022.09.017.
- [10] T. Ruppert, S. Jaskó, T. Holczinger, and J. Abonyi, “Enabling technologies for operator 4.0: A survey,” *Appl. Sci.*, vol. 8, no. 9, pp. 1–19, 2018, doi: 10.3390/app8091650.
- [11] B. Gladysz, T. anh Tran, D. Romero, T. van Erp, J. Abonyi, and T. Ruppert, “Current development on the Operator 4.0 and transition towards the Operator 5.0: A systematic literature review in light of Industry 5.0,” *J. Manuf. Syst.*, vol. 70, no. July, pp. 160–185, 2023, doi: 10.1016/j.jmsy.2023.07.008.
- [12] W. M. P. van der Aalst, M. Bichler, and A. Heinzl, “Robotic Process Automation,” *Bus. Inf. Syst. Eng.*, vol. 60, no. 4, pp. 269–272, 2018, doi: 10.1007/s12599-018-0542-4.
- [13] A. Doufexi, S. Armour, A. Nix, P. Karlsson, and D. Bull, “University of Bristol - Explore Bristol Research,” vol. 3, no. 5, pp. 1437–1443, 2004, doi:

10.1016/j.pbiomolbio.2010.09.007.

- [14] J. A. Jones, “Labour , Work , and Automation : Reconsidering the Future of Work in Light of Automation,” pp. 1–424, 2022.
- [15] J. A. Marvel, S. Bagchi, M. Zimmerman, and B. Antonishek, “Towards effective interface designs for collaborative HRI in manufacturing,” *ACM Trans. Human-Robot Interact.*, vol. 9, no. 4, 2020, doi: 10.1145/3385009.
- [16] D. KÓCZI and J. SÁROSI, “Kollaboratív robotok ipari alkalmazása–Áttekintés. Jelenkori Társadalmi és Gazdasági Folyamatok,” vol. 17.1–2, pp. 145–152, 2022.
- [17] L. Nagy, T. Ruppert, A. Löcklin, and J. Abonyi, “Hypergraph-based analysis and design of intelligent collaborative manufacturing space,” *J. Manuf. Syst.*, vol. 65, no. August, pp. 88–103, 2022, doi: 10.1016/j.jmsy.2022.08.001.
- [18] V. Cutrona *et al.*, “Extending factory digital Twins through human characterisation in Asset Administration Shell,” *Int. J. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 00, no. 00, pp. 1–18, 2023, doi: 10.1080/0951192X.2023.2278108.
- [19] T. Ruppert and J. Abonyi, “Integration of real-time locating systems into digital twins,” *J. Ind. Inf. Integr.*, vol. 20, no. June, p. 100174, 2020, doi: 10.1016/j.jii.2020.100174.
- [20] Hartmut Bossel, *Modeling and Simulation*. 2018.
- [21] A. Maria, “Introduction to modeling and simulation,” *Winter Simul. Conf. Proc.*, pp. 7–13, 1997, doi: 10.1145/268437.268440.
- [22] B. El-Haik and D. M. Roy, “Discrete Event Simulation,” *Serv. Des. Six Sigma*, pp. 331–364, 2005, doi: 10.1002/0471744719.ch14.
- [23] A. Q. Md, K. Jha, S. Haneef, A. K. Sivaraman, and K. F. Tee, “A Review on Data-Driven Quality Prediction in the Production Process with Machine Learning for Industry 4.0,” *Processes*, vol. 10, no. 10, 2022, doi: 10.3390/pr10101966.
- [24] S. Bangsow, *Tecnomatix Plant Simulation. Modeling and Programming by Means of Examples*. 2015.

10. Függelék

Gépek munkaidejei			
Gép neve	Feladat	Munkaidő [s]	Szórás [s]
Automata címkéző	Címkézés	7.83	0.15
Automata pasztázó	Pasztázás	76.47	1
Kombinált szerelő / ellenőrző állomás	Összeszerelés	21.4	0.15
Automata csavarozó	Csavarozás	40.23	3.5
Automata termék útválasztó	Termék áthelyezés	4	0.5
MKT teszter	MKT teszt	3000	600
Run-in teszter	Run-in teszt	570	30
MRT címkéző	Címkézés	4	0.1
GSL	Kamerás ellenőrzés	300	30

Operátorok munkaidejei			
Operátor azonosító	Feladat	Munkaidő [s]	Szórás [s]
Operátor 1	Alkatrészek palettára helyezése	29.72	5
Operátor 1	Késztermék kivétele	10.34	3
Operátor 2	Termék javítása	90	30
Operátor 2	Selejt termék kivétele	8.21	2.8

Konveyorok továbbítási idejei			
Kiindulási pont	Érkezési pont	Munkaidő [s]	Szórás [s]
Kézi szerelőállomás	Automata címkéző	8.16	1
Automata címkéző	Automata pasztázó	7.5	1
Automata pasztázó	Kombinált szerelő / ellenőrző állomás	22	1
Kombinált szerelő / ellenőrző állomás	Automata csavarozó	40	1
Automata csavarozó	Automata termék útválasztó	7	1
Automata termék útválasztó	REWORK állomás	14	1
REWORK állomás	Kézi szerelőállomás	26	1
Automata termék útválasztó	Robot termék felvevő/lehelyező pozíció	46	1
Robot termék felvevő/lehelyező pozíció	Termék kivevő gép	6.9	1
Termék kivevő gép	Automata termék útválasztó	53	1

Teszter robot továbbítási idejei			
Kiindulási pont	Érkezési pont	Munkaidő [s]	Szórás [s]
Robot termék felvevő/lehelyező pozíció	MKT teszter	13.2367	0.3
MKT teszter	Run-in teszter	12.5	0.5
Run-in teszter	MRT címkéző	9	0.2
MRT címkéző	GSL	9	0.16
GSL	Robot termék felvevő/lehelyező pozíció	19.73	0.38
MRT címkéző	Robot termék felvevő/lehelyező pozíció	2	0.1
Run-in teszter	Robot termék felvevő/lehelyező pozíció	8.92	0.18
MKT teszter	Robot termék felvevő/lehelyező pozíció	13.2367	0.3

27. ábra: Szimulációs idők