OTDK-dolgozat

2025

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GAZDASÁG- ÉS TÁRSADALOMTUDOMÁNYI KAR

SZERELŐSOR OPTIMALIZÁLÁS

ASSEMBLY LINE OPTIMISATION

Kurucz Dániel

Konzulensek:

Dr. Benedek Petra

Kovács László

Dr. Tamás Kornél

Kézirat lezárásának dátuma: 2024.12.21.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés 1
2. Elméleti háttér 2
   2.1. Sorozatgyártás, szerelés 2
   2.2. Lean menedzsment 7
   2.3. Folyamatfigyelés, statisztika 11
   2.4. Folyamatoptimalizálás 12
   2.5. Folyamatfejlesztés 13
   2.6. Célok 15
3. Ipar 4.0 Technológiai Központ 16
4. Szerelősor monitorozó rendszer 17
   4.1. Kialakítás 17
5. Folyamat próbája, statisztika és konklúziók 20
6. Egy LEGO összeszerelésének kísérlete 26
   6.1. Tálca tervezés 26
   6.2. Annotálás 27
   6.3. Szerelési folyamat tesztelése 28
   6.4. A LEGO tálcával történő szerelési kísérlet 29
   6.5. Szimuláció és optimalizálási javaslat 35
7. A szerelősor monitorozása és optimalizálásának menedzsment szempontú elemzése 40
   7.1. Átállási folyamatok 40
   7.2. Szerelési folyamat 41
   7.3. Six Sigma és DMAIC ciklus elemzés 43
8. Konklúziók, javaslatok 44
   8.1. Szerelés előkészítésének javaslatai 44
   8.2. Szerelési folyamat javaslatai, és tervezett fejlesztései 45
9. Összegzés 46
10. Irodalomjegyzék 47
11. Mellékletek 49
   11.1. Melléklet 49
   11.2. Melléklet 52

1. BEVEZETÉS

E dolgozat egy szerelésoptimalizálási projekt mentén vizsgálja az esetleges menedzsment kihívásokat. A sorozatszerelés költséghatékonyabbá tételére keresünk megoldásokat, mely újító lehet a mai technológiák mellett. A folyamatok folyamatos monitorozása mellett egy program képes lehet optimalizálni a szerelési folyamatokat annak érdekében, hogy minél hatékonyabb legyen, azaz kevesebb idő alatt több terméket tudjunk előállítani. Ennek nagy alapját a lean szemlélet képezi, ami menedzsment szempontból nagyon fontos lesz ebben a kísérletben. Arra törekszünk, hogy minden hibát kiküszöbölve a legjobb produktumot hozzuk ki a feladatból, ezzel csökkentve az utólagos javítás szükségességét. A felvetések és gondolatok arra szolgálnak a dolgozat során, hogy bebizonyítsuk, miért is jó folyamatos figyelést, fejlesztést, optimalizálást végrehajtani a folyamatokon. Ez a munka segítheti a szerelősorral rendelkező vállalatokat a még precízebb és hatékonyabb munkavégzésre.

A 2. fejezetben szakirodalom, cikkek alapján ismertetem a szerelősor optimalizálás témáját. Bemutatok különböző folyamatfigyelési, fejlesztési és optimalizálási technikákat. A 3. fejezetben kitérek az Ipar 4.0 Technológia központra és tevékenységére a Budapest Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen. A 4. fejezetben bemutatom a szerelősor monitorozó rendszer kialakítását, részegységeit és folyamatát. Az 5. fejezetben egy szelep típusú alkatrészen végzett kísérletet ismertetek és annak kiértékelést hajtom végre. A 6. fejezetben már egy LEGO terméken végezzük el a kísérletet, ami mindhárom szerelőálláson végzett szerelést mutat be. Ennek adatait nem csak statisztikai kimutatásokkal elemzem, hanem egy szimuláció létrehozásával is kiértékelem a folyamatot és javaslatot teszek egy következő kísérletre. Bemutatom az optimalizált kísérletet és bizonyítom sikerességét. A 7. fejezetben menedzsment szempontból elemzem a szerelősor optimalizáló rendszer folyamatait. Végül 8. fejezetben összegzem a hibákat, észrevételeket és javaslatokat teszek a jövőre nézve a folyamat fejlesztése érdekében.

2. ELMÉLETI HÁTTÉR

A lean menedzsment alapjainak megismeréséhez a Lean szemlélet című könyvet vettem alapul, ami a Lean Thinking című könyv magyar kiadása. A próbák és megfigyelések statisztikai értékelésének, következtetéseinek ismertetése után a lehetséges folyamatfejlesztési gyakorlatokat és eljárási projekteket tárgyalom.

2.1. Sorozatgyártás, szerelés

A sorozatgyártás egy gyártási eljárás, mely csoportokba rendezi az egyes alkatrészek legyártását és meghatározott időn belül meghatározott számú darabot gyártanak le belőlük. A szabványosítás lehetővé tette a tömegtermelésre való átállást a vállalatok számára. A 20. századra elterjedtek a megmunkáló forgácsológépek, és később a különböző anyagokat különböző eljárásokkal gyártó gépek jöttek létre.

Egy anyag megmunkálása jellemzően nem csak egy műveletből áll, és egy termék nem csak egy megmunkált anyagból/alkatrészből áll. Ezek nyomán beszélhetünk bonyolultabb, összetettebb összeszerelésekről, összeállításokról. Képzeljük csak el az otthoni elektronikus berendezések, bútorok hány és hány alkatrészből tevődnek össze. A mai modern szekrényeket már úgy készítik, hogy egy laikus is képes legyen összerakni otthon a használati és szerelési utasításokat követve. Egy porszívó esetében ennél egy kicsit hozzáértőbbnek kellene lennünk a témában. A mechanikai működésre odafigyelő és elektronikában is jártas emberek szerelik össze ezeket. A szakemberek hiánya régebben is felmerült és ma is probléma. Ha nincs elég idő és pénz megfelelő oktatást biztosítani, szükséges megkönnyíteni a dolgozók munkáját úgy, hogy a feladatokat részfeladatokra bontják. A megfelelő áramlás érdekében futószalagok/szerelőszalagok segítségével végzik el a feladatokat a vállalatok. A lényeg egyidejűleg a minőségi megfelelőség biztosítása és a szállítási idő megrövidítése.

Mivel a futószalagok lehetővé teszik, hogy a kevéssé képzett dolgozók összetett termékeket szereljenek össze, a tömegtermelésben ezek a leggyakrabban alkalmazott módszerek. Az összeszerelő rendszerek tervezőinek elsődleges célja a szükséges költségek minimalizálása és az áteresztőképesség összehangolása és maximalizálása a gyártósor hatékonyságának növelése érdekében. Ennek eredményeképpen a szerelősorok tervezése jelentős ipari kérdés. Amikor egy vállalat úgy dönt, hogy az összeszerelés stratégiai alaptevékenység, meg kell fontolnia, hogyan használja és építse ki az összeszerelő rendszert a lehető leghatékonyabban a siker érdekében. Az összeszerelési rendszerben végzett összeszerelési folyamatok a végtermék minőségének meghatározásán túl hatással vannak a piacra kerülési időre, a szállításra és más tényezőkre is.

Ezért az összeszerelő rendszer hatékonyságát és minőségét az határozza meg, hogy hogyan épül fel. Egy állomást jellemző teljesítménymutató a legérdekesebb a kézi összeszerelő sorok esetében, a cél az, hogy kiegyensúlyozott legyen. (Rekiek et al., 2002)

A dolgozó mozgásának nem automatizált helyzetekben történő nyomon követésének technikáját ultraszéles sávú (UWB) érzékelők segítségével tárgyalja Aslan et al. (2024), mint az ipari hatékonyság növelésének egyik módját. Hangsúlyozza a gyártási folyamatok szűk keresztmetszeteinek kiszűrésének és a tervezett gyártási ütemtervektől való eltérések felismerésének jelentőségét. A szerzők a dolgozók valós idejű lokalizációs adatait felhasználó folyamatbányászati technikák alkalmazásával olyan adatvezérelt folyamatmodelleket találtak, amelyek rávilágítanak a nem hatékony működésre, például arra, hogy a kezdeti összeszerelési lépés sokkal tovább tart, mint a többi. A tanulmány bemutatja, hogy a dolgozók lokalizációs adatai hogyan használhatók fel a gyártási teljesítmény javítására. A tanulmány feltárja az adathalmaz mennyiségével kapcsolatos korlátozásokat is, és ajánlásokat tesz további kutatásokra a gyártási elrendezéseknek a munkások részvételével történő javítására.(Aslan et al., 2024)

Battini és munkatársai (2020) az ergonómia kézi összeszerelősorokba történő beépítésével foglalkoznak. Írásuk hangsúlyozza, hogy mennyire fontos az ergonómikus munkaterületek kialakítása a balesetveszély csökkentése és a munkavállalók jóllétének javítása érdekében - különösen az elöregedő munkaerő fényében. A szerzők javasolják a munkavállalók fizikai és mentális jóllétének nyomon követését viselhető intelligens technológiával, többek között okosórákkal, hogy segítsék a dinamikus sorrendbe állítást és ütemezést. Bemutatnak egy többcélú, az ergonómiát és a termelékenységet figyelembe vevő összeszerelőszalag-kiegyenlítési modellt, valamint egy számokkal kifejezhető példát a módszertan bemutatására. A cikkben fellelhető még az okos megoldások alkalmazásának előnyeinek megvitatása a munkavállalók biztonságának és a szerelőszalagok tervezésének javítása érdekében, valamint a kapcsolódó területeken a jövőbeli kutatási kezdeményezésekre vonatkozó ajánlások.(Battini et al., 2020)

Boysen, Schulze és Scholl (2022) alapos áttekintést tett a futószalag-kiegyensúlyozás (ALB) kutatásának fejlődéséről 2006-ban és 2007-ben végzett nagyobb felméréseik óta. A tanulmány címe „Összeszerelő szalag kiegyensúlyozása: Mi történt az elmúlt tizenöt évben?”, amiben kiemelik, hogy az egyszerű futószalag-kiegyensúlyozási probléma (SALBP) kulcsfontosságú a szerelőszalagok munkaállomásai közötti munkamegosztás maximalizálásában, ami a nagyüzemi gyártáshoz szükséges számos ipari ágazatban. A szerzők új modelleket és problémaváltozatokat mutatnak be, vizsgálják az adatlekérdezés élvonalbeli megközelítéseit, és kiemelik az ALB-tartományban elért fontos algoritmikus előrelépéseket. A következő tizenöt

évre vonatkozó kutatási menetrendet is felállítottak, amely átfogóbb modellek létrehozását segíti elő. Figyelembe veszik a kapcsolódó tervezési feladatokkal való kölcsönös függőségeket, a különböző tervezési szakaszok testre szabását, valamint az ipar 4.0-hoz kapcsolódó intelligens gyárakhoz szükséges módosításokat. Ez a felmérés rávilágít a fejlett optimalizálási technikák gyakorlati megvalósítása során felmerülő folyamatos nehézségekre, még a területen elért jelentős elméleti előrelépések ellenére is.(Boysen et al., 2022)

Az Ipar 5.0 fogalmát az Ipar 4.0 modell figyelemre méltó továbbfejlesztéseként vizsgálta Ivanov (2023), hangsúlyozva a fenntarthatóság, az emberközpontúság és az ellenálló képesség beépítését az ellátási láncok és műveletek tervezésébe és irányításába. Ivanov azt állítja, hogy az Ipar 5.0 a munkavállalók jólétét és a vállalati folyamatok szélesebb körű társadalmi hatásait helyezi előtérbe. Keretrendszere fontos technológiai fogalmakat vázol fel, amelyek három különböző szinten működnek: társadalmi, hálózati és üzemi szinten. E fogalmak közé tartozik az együttműködés, a koordináció, a kommunikáció és az adatelemzés. Ez a paradigma az Ipar 5.0 szervezeti és technológiai aspektusait, valamint a gyártási és logisztikai rendszerek fenntarthatóságának, rugalmasságának és hatékonyságának javítására gyakorolt hatását fejti ki jobban. Az eredmények azt mutatják, hogy ahhoz, hogy az ipar 5.0-ban, azaz ellátási lánc és a műveletirányítási módszerek megváltoztatásában rejlő lehetőségeket teljes mértékben ki lehessen aknázni, multidiszciplináris, azaz több szakterületet érintő kutatási stratégiára van szükség.(Ivanov, 2023)

Lassila és társai (2005) a számítógépes szimuláció segítségével vizsgálják az emberközpontú összeszerelősor szimulációjának nehézségeit az autógyártás területén. A tanulmányban megnevezett „A” nevű termék egy bizonyos változatát kezelni nem képes 1. gyártósoron tapasztalható működési eltéréseket és hatékonysági hiányosságokat mutatja be, két összehasonlítható kézi összeszerelősorra összpontosítva, amelyek A és B terméket gyártanak. A szerzők részletesen leírják az összeszerelési eljárást, kiemelve a jelentős mennyiségű fizikai munkaigényt és a különböző állomások egyenetlen munkaterhelését, ami a termékáramlás hatékony szabályozásához szükségessé teszi a pufferek használatát. A tanulmány rávilágít a folyamatok teljesítményére vonatkozó információk kezdeti hiányosságaira, ami arra késztette a szerzőket, hogy tíz kiválasztott terméken mélyreható vizsgálatokat végezzenek. Ezek a tesztek a tervezett ciklusidő és a tényleges teljesítmény között nagy eltérést mutattak, ami egy szervezetlen működési környezetre utal, ahol a kezelő gyakori mozgása az állomások között üresjáratokat és hatékonysági hiányosságokat eredményez. Ezeknek a nehézségeknek a leküzdése érdekében háromszög alakú feldolgozási időeloszlást alkalmazó szimulációs modellt hoztak létre, hogy

minden egyes operátort korlátozott kapacitású folyamatként ábrázolnak. Annak érdekében, hogy figyelembe vegyék az operátorok állomáson kívüli feladatok miatti pillanatnyi elérhetetlenségét, egy véletlenszerű üzemzavar-operátort is implementáltak, amely jelentős hatással volt a rendszer teljesítményére. A szimulációs modell teljesítménymutatóinak a valós rendszer teljesítménymutatóival való összehasonlításával értékelték a modell érvényességét. Ez azt mutatta, hogy a két rendszer teljesítménye és ciklusideje szinte egybeesett. Egy további átfutási időelemzés kimutatta, hogy a várakozási idők a teljes átfutási idő jelentős részét teszik ki, ami megerősíti a rendszer hatékonyságának hiányosságait. Végül a szerzők azt állítják, hogy a gyártósoron tapasztalt rendezetlen állapotok oka a nem megfelelő tervezési és ellenőrzési eljárások. A rendszer teljesítményének általános növelése érdekében azt javasolják, hogy szabványosítsák a munkafolyamatokat, osszák el egyenletesen a munkaterhelést az állomások között, és javítsák az ütemezési technikákat. Lassila a pontos emberi viselkedésmodellezés fontosságát mutatja be a termelési rendszerekben és a hatékony szervezeti eljárások szükségességét az emberi munkával végzett összeszerelési folyamatokban. (Lassila et al., 2005)

A digitális ikrek ötlete nagy figyelmet kapott az utóbbi időben, mivel a gyártási rendszerek Ipar 4.0 felé történő elmozdításával összefüggésben valós idejű adatintegrációval javítható a gyártástervezés és -irányítás. Lugaresi és Matta tanulmányában (2023) egy innovatív módszert mutatnak be a digitális ikrek automatikus létrehozására, amelyet bonyolult anyagáramlású gyártórendszerek, például összeszerelő sorok számára terveztek. Ebben a tanulmányban a hagyományos folyamatbányászati technikák korlátaival foglalkoznak. Ezek a technikák gyakran egyetlen alkatrészazonosítóra támaszkodnak, ami megnehezíti a gyártási folyamatokban részt vevő számos objektumtípus közötti összetett kölcsönhatásokat. A szerzők bemutatnak egy megközelítést a nem lineáris anyagáramlású gyártórendszerek felkutatására és modellezésére az objektumközpontú folyamatbányászat (Object-Centric Process Mining, OCPM) felhasználásával. A hagyományos adatreprezentációk által jelentett nehézségeket a javasolt megoldással lehet leküzdeni, amely az OCPM-et használja fel a különböző komponensek és az összeszerelt kimenetük közötti kölcsönhatások megfelelő kifejezésére. A tanulmány egy mindenre kiterjedő modellt mutat be, amely magába foglalja egy gráfmodell létrehozását az eseménynaplókból és egy gráfmodell-kiegészítési eljárást, amely tartalmazza az összeszereléssel kapcsolatos íveket, hogy garantálja, hogy a digitális reprezentáció hűen rögzíti a fizikai rendszer viselkedését. A technika érvényesítésére három különálló teszt szolgál, amelyek közül az egyik egy valós alkalmazás egy első szintű autóipari alkatrészgyártó rendszerben. Az eredmények szerint a javasolt módszer jól működik az összeszerelési tevékenységeket figyelembe vevő, pontos digitális modellek előállítására. A tanulmány hangsúlyozza, hogy mennyire fontos az alkatrészek rendelkezésre

állására vonatkozó blokkolási feltételek beépítése az összeszerelési eljárásokba, mivel ez nagy hatással van arra, hogy mennyire pontosak a teljesítménybecslések. Mindent összevetve, ez a tanulmány előrelépést jelent a gyártási rendszerek területén azáltal, hogy erős keretet kínál a digitális ikrek automatizált létrehozásához, ami javítja a működési hatékonyságot és a döntéshozatalt a bonyolult gyártási környezetben. Az eredmények rávilágítanak a kifinomult adatvezérelt technikák és a hagyományos gyártási módszerek kombinálásának lehetőségére a gyártási rendszerek reakciójának és rugalmasságának javítása érdekében.(Lugaresi, Matta, 2023)

Pabolu és Shrivastava tanulmánya (2021) a gépi tanulást és a dolgok ipari internetét (IoT) vizsgálja a munkások fáradtságának enyhítésére dinamikus munkakörváltás révén. A keretrendszer célja a termelékenység és a termékminőség javítása a fáradt munkások azonosításával és feladataik egyszerűsítésével. Ez a keretrendszer az ALWABP (Assembly Line Worker Assignment Balancing Problem) kiterjesztése. Az ismétlődő munkákból eredő munkások fáradtsága kézzel végzett hibákhoz és gyengébb minőségű termékekhez vezethet. A javasolt keretrendszer egy fáradtságosztályozót tartalmaz, amely több, fáradtságot okozó elemet használ fel, beleértve a feladat összetettségét, a kezelői készségszintet, az ismétlődést, a munka stresszét (pulzusszámmal mérve), a sor sebességét, a testtömegindexet (BMI), a feladat terhelésének súlyosságát, valamint demográfiai jellemzőket, mint az életkor és a nem. Az IoT-eszközök ezeket a jellemzőket figyelik, lehetővé téve a valós idejű adatgyűjtést és elemzést. A keretrendszer három fő részre oszlik: a munkavállalói fáradtság osztályozójának fejlesztése, a feladatváltási modell létrehozása és a fáradtság jellemzőinek mérése. A fáradtságosztályozó a korábbi adatok értékelésére és a dolgozók állapotának folyamatos nyomon követésére szolgáló gépi tanulási technikák alkalmazásával ajánlásokat tesz a munkakörök rotációjára a futószalag-felügyelők számára. A feladatrotációs modell biztosítja, hogy az összeszerelési folyamat zavartalan legyen azáltal, hogy megerősítési, helyettesítési és rotációs stratégiákat tartalmaz. Az érzékelők telepítése, az információgyűjtés, a fáradtságosztályozó betanítása, végül a munkakör-rotációs eljárás automatizálása az osztályozó előrejelzéseinek megfelelően mind része ennek a folyamatnak. A keretrendszer szabályozott futószalagon történő alkalmazását egy szimulációs gyakorlaton keresztül mutatják be, amely azt is kiemeli, hogy a keretrendszer mennyire jól képes azonosítani a kimerült munkavállalókat, és megfelelő feladatváltást javasolni. Az eredmények azt mutatják, hogy a gyártási környezetben a munkavállalók irányítása és a működési hatékonyság nagymértékben javítható a digitális ikertechnológiák, az IoT és a gépi tanulás integrálásával. Ennek eredményeképpen ez a tanulmány továbbfejleszti ismereteinket arról, hogyan kezeljük a munkások fáradtságát a szerelősorokon, és kiemeli a dinamikus feladatváltás értékét, mint a fáradt-

ság csökkentésének és az összteljesítmény növelésének taktikáját. A további kutatási törekvések az olyan akadályok kezelésére összpontosítanak, mint a skálázhatóság, az érintésmentes érzékelési technológiák és a fáradtsággal összefüggő extra jellemzők vizsgálata.(Pabolu, Shrivastava, 2021)

Pabolu et al. másik tanulmánya (2022) a munkaközösségek vezetőinek a feladatkiosztás maximalizálása során felmerülő nehézségeit a digitális ikertechnológián alapuló, az együttműködő összeszerelő rendszerekben a dolgozók feladatkiosztására vonatkozó paradigmát javasolva kezeli. Bemutatja a szerelőszalag-munkavállalók kiosztási és kiegyensúlyozási problémáját (ALWABP), amely a feladatok elvégzése során figyelembe veszi a munkások és az együttműködő robotok (CoBots) különböző teljesítménykapacitásait és készségeit. A módszertan a digitális ikertechnológiák felhasználásával igyekszik előre jelezni a feladatok végrehajtási idejét (task execution time, TET) mind az emberi munkások, mind a CoBotok számára, ezáltal lehetővé téve a hatékonyabb munkamegosztást. A keretrendszer három fő részből áll: egy „ember a hurokban" döntéshozatali rendszer, amely lehetővé teszi a futószalag-vezetők számára, hogy gyakorlatias megfontolások alapján validálják és módosítsák a javasolt megoldásokat; egy ALWABP a feladatkiosztás optimalizálására; és egy TET-előrejelzési keretrendszer, amely statisztikai tanulási technikákat és robotszimulációs eszközöket használ. Az adatgyűjtéshez és -elemzéshez integrált dolgok internete (IoT) technológiák tovább javítják a keretrendszer előrejelző képességeit. A tanulmány hangsúlyozza az ember-robot együttműködés (Human–robot collaboration, HRC) fontosságát az összeszerelési munkáknál, és módszertani javaslatot tesz a feladatok kisebb részfeladatokra való bontására, amelyeket a munkások és a CoBotok megoszthatnak egymással. A keretrendszer gyakorlati felhasználását egy olyan koncepcionális architektúrán keresztül mutatja be, amely összekapcsolja a tényleges összeszerelősorokat a digitális szimulációkkal, hogy lehetővé tegye a valós idejű döntéshozatalt és felügyeletet. Összegezve, ez a kutatás előrelépést jelent az ipari rendszerek témakörében, mivel olyan módszertani keretet kínál, amely maximalizálja a feladatmegosztást kooperatív környezetben, garantálva a munkavállalók jólétét és termelékenységét. A jövőre vonatkozó kilátások közé tartozik a feladatkiosztás finomítása és a keretrendszer tudásalapú rendszerekkel való kiegészítése a folyamatos fejlesztés érdekében. (Pabolu et al., 2022)

2.2. Lean menedzsment

A vállalkozások mindig keresik azokat a módszereket, amelyekkel javíthatják működésüket, és a mai rohanó, folyamatosan fejlődő világban mindig egy lépéssel riválisaik előtt járhatnak. A termelékenységre és hatékonyságra való törekvés egyre nagyobb jelentőséget kapott.

Megjelent a tömegtermelés, ami nagy tételekben való szabványosított gyártást jelent. A második világháború Japán gazdaságára sajnos rányomta a bélyegét. Japán eleve nyersanyaghiányban szenvedett sziget jellegét tekintve, de a második világháború csak rontott a helyzeten. A harcok miatt a munkaerő is megcsappant. A Toyoda (a mai Toyota) eredetileg egy szövőgépgyártó üzem volt, ami ugyancsak megszorításokat élt át a világháború után. Ebben az időben a Toyota már motorgyártó üzemként is működött. Taichi Ohno, japán ipari mérnök is ennél a cégnél dolgozott, mint műhelyfelügyelő, később ügyvezető igazgató. Ő és társai felfigyeltek arra, hogy azelőtt nagy gépekkel, sok munkaerővel, sok nyersanyaggal tudták előállítani a termékek nagy részét, de a második világháború után munka és nyersanyag hiánnyal szembesültek, ezért át kellett alakítani a gyártási folyamatokat. Arra tették a hangsúlyt, hogy egy darabot jól le tudjanak gyártani, át kellett állni a tömegtermelésből egy teljesen más folyamatokat igénylő gyártásra. Ehhez nagy átrendezésre és fejlesztésre volt szükség, ami energia-, és költségbefektetést vont maga után. Ohno egészen a 70-es évekig fejlesztette tökélyre a Toyota Product System-et, melyet rövidítve TPS-nek nevezünk. A TPS célja az összes veszteséget eltávolítani a folyamatokból. A lean kifejezést maga James P. Womack, Daniel T. Jones és Daniel Roos fejtette ki a The Machine That changed the World könyvükben. Az 1970-es évektől kezdve japán tanácsadók járták a világot, amitől Womack-ék szeme elé is tárult ez az új szemlélet. Így született meg az előbb említett könyv és később a Lean Thinking, ami magyar kiadásban is elérhető Lean szemlélet néven.

Azt mondhatjuk, hogy mindenféle termék gyártásának folyamataira rá lehet húzni a Lean menedzsmentet. Nem függ a vállalat nagyságától, iparban betöltött szerepétől. A javaslat általában az, hogy U alakban történik a gyártást, és U alakú a raktár is. Ez a kiépítés fizikai kialakítására, elrendezésére akar utalni. Ha például egyenes kialakítású gyártósor birtokában lennénk, akkor az egyik oldalon elindul(nak) a nyersanyag(ok), másik végén megkapjuk a folyamat végtermékét. A késztermék visszahozatala lenne az időbeli veszteség ebben a folyamatban. Ezt az U alakkal lehet kiküszöbölni.

A Lean Thinking című könyv a gondolataival együtt uralkodó koncepcióvá vált, amely mindenféle vállalkozás számára alapként szolgál. Womack ebben az úttörő könyvben alapos keretrendszert kínál, amely átalakítja a folyamatmenedzsmentről alkotott elképzeléseinket, és nagy hangsúlyt fektet a pazarlás minden szinten történő kiküszöbölésére. Ebben a könyvben a Lean 5 stratégiai alapelven értelmezhető(Womack, Jones, 2009):

- **Érték:** Az értékteremtés a legfőbb feladat a vállalatoknál. A vevő azt vásárolja meg, azt fizeti ki, amit kap, és nem szeretne olyanért költeni, amit nem kért. Figyelni kell,

hogy a különböző folyamatok, feladatok mennyiben adnak értéket a termék elkészítéséhez és a vevőhöz jutásához. Meg kell tudnunk határozni pontosan ki a vevő, akinek szánjuk a terméket. Ő tudja megmondani, mi az igénye, milyen kerete van a termék megvásárlására. A felesleges lépéseket ki kell szűrni, amit a könyv „muda"-nak nevez, ami egyenlő a veszteséggel és pazarlással.(Losonci, 2010)

- **Értékáramlás:** Azokról a cselekvésekről beszélünk, amelyeket el kell végeznünk a termék előállításakor, nem hagyhatók ki. Három fajta tevékenységet különböztethetünk meg. Az értékteremtő folyamatok értéket teremtenek a vevők számára. A második a nem elhagyható, de értéket nem teremtő tevékenységek. Ez a vállalati és annak technológiáihoz köthető kötelező körök. A harmadik pedig a pazarló, azaz értéket nem teremtő feladatok. Minden tevékenységet az értékteremtő tevékenységeknek kell befolyásolnia hiszen, így tudjuk minimalizálni a pazarlást. Mindig annak a kérdésnek kell a szemünk előtt lennie, hogy ezért a folyamatért hajlandó-e fizetni nekünk a vevő, vagy sem. Hétféle veszteségforrást is megkülönböztethetünk, amiket meg kell figyelnünk a működés során. Elsősorban a várakozást és a felesleges mozgást, nem ergonomikus munkavégzést, nem célravezető tevékenységek, rossz kommunikáció, hibák utómunkálatai, és a kihasználatlan emberi tudást állapították meg. Várakozás lehet akár egy targoncásra való várakozás, hogy levegye a polcról a terméket. Egy rossz termék levétele felesleges mozgást eredményez. Az ergonomikus munkavégzés a feladatok súlyát, akár szó szoros értelmében osztja szét megfelelően a munkavállalók között azért, hogy ne essen ki munkaerő a nagy teher alatt. A nem célravezető tevékenységek lehetnek például egy termékcsomag újracsomagolása, mert elkevertük a terméklapokat. A rossz kommunikáció egy félrevezetés lehet. Ha rossz útvonalat mondunk a munkatársnak egy szerszám megtalálásához, az időbeli veszteséget von maga után. Régebben a sorozatgyártásban többször előfordult, hogy összeszerelés után derült ki, hogy egy alkatrész kimaradt, vagy nem jó az összeállítás. Ez a javítási idő ugyanúgy az időbeli muda a folyamatokban. Az utolsó az emberek tiszteletére vonatkozik, hiszen az emberek tudását ki kell használni, és meg kell becsülni. Egy folyamatfejlesztési megbeszélésre, minden érintett vezetőt és témához értőt be kell vonni, hogy a legtöbb információ birtokába jussunk.(Losonci, 2010)
- **Áramlás:** A hatékony áramlást az értékteremtő folyamatok között meg kell teremteni. A kellő változtatást a dolgozók és a munka szervezésében kell keresni. Egy

specifikus műveletet, mozdulatot, cselekményt, ha többször kell megcsinálnunk könnyebb egyszerre elvégezni, ezt érezzük „hatékonynak”, miközben a termék lassan halad a vevői igénytől kezdve a vásárlóig. Ha belépünk egy gyárba, és az emberek csak mozognak és tevékenykednek, úgy észleljük, hogy munka folyik. Miközben lehet, hogy ezeknek hetven százaléka felesleges sétálás, vagy keresése egy adott szerszámnak stb. Ezek nem adnak értéket a gyártási folyamatokhoz. Meg kell szüntetnünk az áramláshoz kapcsolódó akadályokat, amelyek túleshetnek az addigi hagyományos szervezeti határokon, és nagy kihívásokkal és problémákkal járhatnak. Az áramlást segíti még az átállási idők csökkentése és a cellarendszerű gyártás, ami csökkentheti a szállítással járó időket. Eszerint a cél az egy darabos sorozatnagyság, mellyel megközelíthetően az átfutási idő a műveleti idők összessége.(Losonci, 2010)

- **Húzóelv:** A húzóelv mind a mai napig nem mindenhol van jelen. Ennek az ellentéte a push rendszer, ami úgymond egy hagyományos rendszer. Nagyon sok terméket piacra dobnak, amelyre rákaphat a vevő, de ez nem kifizetődő a vevői bizonytalanság miatt. Sok termék halmozódhat fel, ami ezek után a raktárban áll vagy kukába kerül, a pénzveszteség pedig így garantált. A push rendszer nem tud rugalmasan reagálni a vevői igényekre, hiszen a nagy készletmennyiséghez hosszú átfutási idő kötődik. Ezzel szemben a pull elv, azaz húzóelv úgy működik, hogy a vevői igények szerint állítja elő a terméket a vállalat. Beleértve a termék funkcióit, de legfőképpen a darabszámot. Amíg nem fizet a vevő a termékért, addig nem is kezdjük el gyártani a terméket. Természetesen, ha van már egy vevői kör, előre lehet tervezni, becsülni, kalkulálni, mennyi termékre lehet szükség.(Losonci, 2010)
- **Tökéletesítés:** Mindent, amit csak lehet, próbáljunk meg még kevesebb idő alatt elvégezni, és minél jobbra készíteni. A folyamatok fejlesztésében nagy potenciál lakozhat. Azt a célt kell magunk elé helyezni, hogy sose elégedjünk meg a jelenlegi állapottal. Gyártósoron lévő gépek esetén a hatékonyság növelését tesszük a lista legtetejére. De szem előtt kell tartani a gépleállások megfelelő ütemezését, átállási időket, karbantartási időket. Váratlan probléma esetén hatalmas bevételkiesést okozhatnak maguknak a vállalatok.(Losonci, 2010)

1. ábra: Lean menedzsment 5 alapelve

2.3. Folyamatfigyelés, statisztika

A legyártott alkatrészek nem mindig a végterméket jelentik, hanem egy összeszerelés összetevői is lehetnek. Beszélhetünk egyedi, anyagonként különböző, vagy betöltött szerepükhöz csoportosított elemekről. A kézi szerelés egy nagyon egyedi szerelési formát jelent, ha nem készítünk hozzá rendszert, követhetetlen a folyamat. A több állomásból összetevődött összeszerelési folyamatot a nagyobb vállalatok használják, ahol a legtöbb folyamat végén már a kész terméket kapjuk. A nagyobb cégek keresik azokat a módszereket, lehetőségeket, amivel növelhetik a bevételt. Ezt úgy érhetik el, ha minél hamarabb készítik el a rájuk szánt munkát. Amikor összpontosítunk egy feladatra, hogy jól és gyorsan sikerüljön, először megfigyeljük és elemezzük. Ez az összeszerelési folyamatokban sincs másképp. Ahhoz, hogy meg tudjunk figyelni egy rendszertelen folyamatot, célszerű rendszerezni, megtervezni, ergonómiai szempontból kiépíteni a szerelőállomásokat. Lehetetlen monitorozni az állandó szerszámkeresést és a mindig más helyről hozott alkatrészeket. Az alkatrészeket, a szerszámokat és az emberi mozgást is képesek lehetünk figyelni különböző kamerákkal, szenzorokkal, érzékelőkkel. Az érzékelőkhöz szükségesek markerek, melyek a megfelelő felületeken, tárgyakon szükséges elhelyezni. Kamerák mély tanulásos technológiával képesek lehetnek megtalálni és szeparálni a felvett tárgyakat. Az érzékelők helyzeteket és időpontokat érzékelnek annak érdekében, hogy megfelelő mennyiségű adatot szolgáltassanak azok kiértékeléséhez, és statisztikák felállításához. Az ilyen típusú fejlesztéseknek nagy kezdeti anyagi vonzata van, ami pozitív kimenetelek után megtérülhet. A versenyképesség fokozásához nagyobb figyelmet kell fordítani a folyamatok nyomon követésére és elemzésére, a hatékonyság fejlesztésére.(Gonnermann et al., 2022; Nausch et al., 2021; Yinhua and Rui, 2019)

Ezek után már beszélhetünk az M&E-ről, mely rövidítés a *„Monitoring and Evaluation”* angol kifejezés együttesből ered. A *„monitoring”* a folyamatos figyelést szolgálja, míg az *„evaluation”* a kiértékelést jelenti. Egy példán keresztül egy busz útját monitorozással tudjuk követni, hogy a cél felé halad-e. A kiértékelés azt mutatja, hogy busz elért-e a célig és az elvárásainknak megfelelően ment-e. Ez jelentheti azt, hogy a megállókhoz időben ért-e oda, vagy a végállomáshoz, vagy esetleg egy hiba történt az utazás során, mint például egy útlezárás miatti kerülés beiktatása. A két tevékenység együttesen éri el a kívánt eredményt, azaz a folyamatok folyamatos fejlesztését.

Számos irodalom bemutatja, mekkora befolyással vannak a folyamatfigyelési modellek a termékminőségre különböző kritériumok figyelembevételével. (Chengjun et al., 2020; Ge et al., 2013) A konklúzió mindegyiknél az, hogy a vállalatoknak jelentős megtakarítást tesz lehetővé a folyamataiknak monitorozása és a kapott adatok feldolgozásával ezeket nagy mértékben fejleszteni tudják és az esetleges hibákat képesek kiküszöbölni.

2.4. Folyamatoptimalizálás

Az optimális szó azt jelenti, hogy pont megfelelő nekem egy adott tárgy, dolog, alkalmazás, funkció, gondolat. Az optimalizálás a vállalati környezetben pontosabb meghatározást igényel. A kérdés az, hogy mire is optimalizálunk, mit akarunk növelni vagy épp csökkenteni. Időt, költségeket, feladatköröket? Egy GPS alapú térkép útvonal generálása mentén bemutatom a különbségeket. Szeretnénk elindulni autóval egy kiindulópontból egy végcélba. Az utak adottak, amiken mehetünk. A mai mobilalkalmazások vagy a járművekbe beépített térkép funkciók több útvonalat is felkínálnak a sofőr számára. Melyik útvonalat válasszuk? Általában minél hamarabb oda akarunk érni az adott helyszínre, így a nagy forgalmat kikerülve találhat nekünk útvonalat. És ha a vezető úgy dönt, hogy inkább azt az utat használja, ami a legrövidebb? Hiszen lehet olyan eset, amikor nagyon nagy a két útvonal hosszának különbsége, és általában ahhoz viszonyítva tudjuk kalkulálni az üzemanyag fogyasztásunkat. Ezt a döntést természetesen a dugóban állással figyelembe véve kell meghozni. Lehet az is, hogy van egy köztes megoldás. Ebből is látszik, hogy az optimális kifejezést külön kell definiálnunk minden esetben. Fel kell tennünk a kérdést, hogy milyen szempontokat vegyünk figyelembe egy javítási kezdeményezésnél. A folyamatoptimalizálásnak nem szabad a folyamat alaplogikáját, alapfeladatát megváltoztatnia. A lefektetett fő gondolatnak mindig a szemünk előtt kell maradnia, de nem szabad soha megelégednünk, mindig jobbra kell törekednünk. Ezért a folyamatok folyamatos javítását annak érdekében, hogy optimális, kedvezőbb legyen a cég számára folyamatoptimalizálásra

van szükség. Ezt a tevékenységet a Lean ötödik alapelve közé sorolhatjuk.(Demoly et al., 2010; Rowlands et al., 2000)

2.5. Folyamatfejlesztés

A folyamatfejlesztés és optimalizálás hasonló kifejezések, vannak átfedések az értelmezésükben, mégis különbséget kell tenni köztük. A folyamatos fejlesztést úgy jellemezhetjük tágabb értelemben, mint olyan szervezeti kultúrát, amely folyamatos fejlesztéssel törekszik a pazarlás kiküszöbölésére minden rendszerben vagy folyamatban. Az eljárás nem feltétlenül igényel kiadásokat, és a szervezet minden tagját bevonja. Lehet egy hirtelen technológiai váltás vagy találmány eredménye, de lehet egy lassú, de fokozatosfejlődés következménye is. Továbbá, az apránként végrehajtott rendszerszintű fejlesztések jelentős változásokat eredményeznek. Bármilyen szintű javulás a pazarlás, a problémák és a variációk megtalálására és csökkentésére irányuló módszerek és eszközök eredménye. A múltban a folyamat fejlesztés számos aspektusát tanulmányozták és kutatták. Egészen a 19. századtól kezdve kezdeményezték a különböző vállalatok vezetői, hogy a munkatársak minél lelkesebben álljanak folyamataik figyeléséhez és fejlesztéséhez. A 20. század elejére képesek voltak már tudományos stratégiák felállítására a például a gyártósorok folyamatainak javítása érdekében. Míg régebben inkább a hibák javítása volt a hangsúlyos, mára strukturáltabb, szervezett stratégia mentén teszik jobbá a vállalatok a folyamataikat.(Asiri et al., 2014)

Guzman et al. (2010) bemutatja, milyen fontos felállítani egy stratégiát a feladatok javítására. Megvizsgálják a környezetet, felállítják a stratégiát és végezetül ezt elemzik és ellenőrzik, megneveznek egy úgynevezett kiegyensúlyozott objektív-kvantitatív módszertant, ami egyfajta folyamatvezérlő.

A következőkben néhány folyamatfejlesztési megközelítést, módszert, stratégiát szeretnék bemutatni:

- **Statisztikai folyamatszabályozás (SPC):** Az 1920-as években a statisztikai folyamatszabályozást (SPC) annak a felismerésnek az eredményeként fejlesztették ki, hogy a minőségellenőrzésnek a termékek helyett az alapvető folyamatokra kell összpontosítania. Az úttörő munkát Dr. Walter A. Shewhart végezte, aki megalkotta a jól ismert ellenőrző kártyákat. Lépésről lépésre bemutatja az SPC ipari alkalmazására vonatkozó módszert. Az SPC nem annyira egyetlen kimeneti jellemzővel, mint inkább a mögöttes folyamatokkal foglalkozik. Az módszer elsődleges célja a folyamatból adódó variancia felismerése és csökkentése. (De Mast et al., 2000)

- **Taguchi:** Az 1980-as években a minőségügyi mérnökök és statisztikusok nyugaton jelentősen nagyobb érdeklődést mutattak a varianciacsökkentés iránt. Azok közül, akik elsőként fejlesztették ki ezt az érdeklődést, a japán mérnök, Genichi Taguchi a legnevezetesebb. Taguchi (1924-2012) a második világháború után úgy vélte elavultak már a módszerek a kísérlettervezés és a minőség ellenőrzés területén, ezért kidolgozta saját gondolatait a témában, amit Taguchi-filozófiaként ismerünk. Taguchi számos megközelítést és ötletet dolgozott ki és népszerűsített, köztük a termékek és folyamatok (újra)tervezésének három szakaszát, ami a következőképpen áll fent:

  1. A rendszer tervezése
  2. A paraméterek tervezése
  3. A tűrések tervezése.

  A megközelítést eredetileg egy gyártási folyamat javítására fejlesztették ki, bár elméletileg az áruk és folyamatok széles körére alkalmazható, beleértve a prototípus- és ellenőrzési fázisokat is. Az alapgondolat egy olyan minimális érzékenységű tervezés megvalósítása, amely a kimeneti változókat a véletlenszerű bemeneti változékonyság ellenére is képes szabályozni. Taguchi kvantitatív kísérleti módszertana szolgál e stratégia alapjául. A variáció csökkentésére két módszer létezik. A folyamatparamétereket úgy választják ki, hogy a folyamat egy kísérlet eredményei alapján ellenálló legyen a "zajparaméterek" változásaival szemben. Abban az esetben, ha ez nem elegendő, a variáció további csökkentését a tolerancia-tervezés alkalmazásával érik el. A Taguchi-módszertan a tervezési fázisban nagyon kedvelt, de a gyártási szakaszban is használható a termékek és folyamatok javítására. Mivel ez egy kísérleten alapuló technika, robusztus eljárásra van szükség, ami két célt ért el. Csökkenti a termék funkcionalitásának eltéréseit a környezethez képest és biztosítja, hogy a laboratóriumban hozott döntések a termelés és az alkalmazás szempontjából is megmaradjanak. Mérnök lévén, Taguchi olyan szókincset használ, amely a mérnökök körében elterjedt, és némileg eltér a hagyományos minőségellenőrzésben használt statisztikai szókincstől.(De Mast et al., 2000; Freddi and Salmon, 2019)

- **Shainin:** Dorian Shainin számos - jól ismert és újonnan kifejlesztett - módszert ötvözött egy logikus, lépésről lépésre felépített tervben a gyártási folyamatok optimalizálására. A Shainin stratégia a Taguchi technikák és az SPC alternatívájaként szolgál. A stratégia célja, hogy a folyamat kimeneti problémájából kiindulva a lehetséges okok közül azonosítsa az eltérés egy, két vagy három elsődleges okát. A Shainin rendszer elkerüli a

bonyolultabb eljárások használatát, mivel olyan eszközök gyűjteményére összpontosít, amelyek egyszerűen érthetők és alkalmazhatók. Az elmélet magyarázatához világos szaknyelvet, szakzsargont használnak.(De Mast et al., 2000)

- **Six Sigma:** A Six Sigma vállalatszintű minőségfejlesztési megközelítés. A Motorola hozta létre, és az SPC és a kísérleti tervezés elvein alapul. Lehetetlen minden egyes összetevőjét mélyrehatóan tárgyalni, mert jogi védelem alatt áll. A programot a költségmegtakarításra, az ügyfélközpontú módszertanra és a mennyiségi adatokon alapuló döntéshozatalra való összpontosítás jellemzi. Ez a három gondolat adja a projektkiválasztási folyamat alapját. A Six Sigma megközelítésben szereplő "áttörési stratégiák" egyike a változások elindítására szolgál. Négy szakaszban közelíti meg a problémákat: ellenőrzés, fejlesztés, mérés és elemzés A Six Sigma program tartalmazza a problémák rangsorolására és az ügyfélpreferenciák felmérésére szolgáló technikákat. Magába foglal szinte minden hasznos eszközt és módszert, amelyet az ipari statisztika területén létrehoztak, beleértve a robusztus tervezést, a tűréstervezést, az ellenőrző diagramkészítést és a kísérlettervezést. A programot úgy tervezték, hogy a legkülönbözőbb iparágakban, többek között a szolgáltatásokban és a gyártásban is használható legyen.(De Mast et al., 2000)

2.6. Célok

A szakirodalmi hiányosságokat figyelembevéve ebben a kutatásban a következő célokat tűztem ki.

1. Szeretnék átfogó képet mutatni a szerelősor monitorozó rendszerről és annak előnyeiről.
2. Kísérletek elvégzésével szeretném bemutatni az adatok gyűjtését és feldolgozását, ezzel láttatva a dolgozók trendjeit és optimalizálási lehetőségeket.
3. A szerelők betanulási és későbbi fáradási fázisát kívánom igazolni
4. Rá szeretnék világítani arra, hogy az utólagos optimalizálás helyett, miért lenne szükségünk egy dinamikus, szerelés közbeni optimalizáláshoz.

3. IPAR 4.0 TECHNOLÓGIAI KÖZPONT

A dolgozat témáját az Ipar 4.0 Technológiai Központ biztosította nekem, amely a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen található. A Központ fő célja az Ipar 4.0 technológiák kutatása, fejlesztése és bemutatása. Az ipari digitalizációt támogató több, mint 20 bemutatóalkalmazás, berendezés található a BME I épületében, 250 m^2 területen. A kutatások és fejlesztések célja az, hogy az ipar 4.0 alkalmazások segítségével tudják a versenyképesség javítását segíteni. Lehetőség nyílik a hallgatók, oktatók, és az érdeklődök számára bemutatókat, tréningeket tartani, mellyel hozzájárulnak a digitalizációs átalakulás megismeréséhez.

Az együttműködések is segítik a központban zajló munkákat nemzetközileg és belföldön is. Intelligens gyártássegítő rendszerek, folyamat fejlesztéshez szükséges monitorozási és adatgyűjtő rendszerek képezik a Központ projektbankját legtöbbször kisebb bemutatóállások, makettek képében. Kis-, és középvállalkozásoknak nyújt segítséget abban, hogy a projektjeik bemutatásra kerüljenek nagyobb cégeknek, vállalatoknak az Ipar 4.0 Technológiai Központban rendezett bemutatókon. A demonstrációkat kiállításokra is elviszik, ahol a résztvevők maguk kipróbálhatják és megismerhetik az új technológiákat.

4. SZERELŐSOR MONITOROZÓ RENDSZER

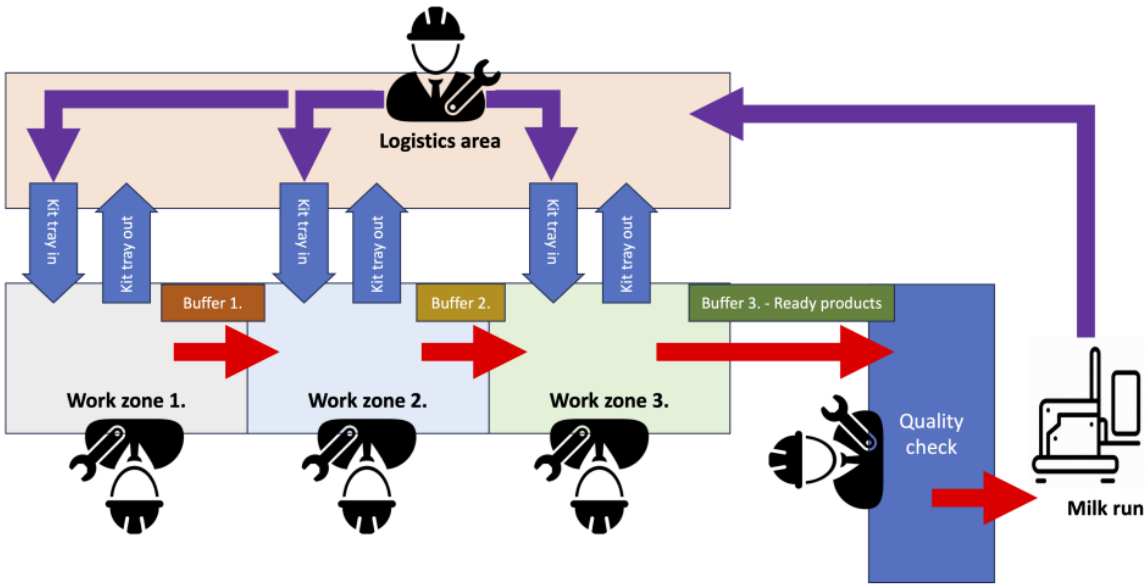
A szerelések nagy részét az iparban nem tudjuk minden esetben gépek használatával megoldani, így emberi kézre van szükség. Minden dolgozó más és más attitűdökkel bír, ezért a termelés sebessége eltérő lehet, így az nem mindig optimális. A termelést befolyásolhatja még a rendszertelen folyamatok megléte, ezalatt azt értjük, hogy a dolgozók változó sorrendben végezhetik a különböző műveleteket (különböző termékek, különböző alkatrészei). Egy folyamat fejlesztésénél és optimalizálásánál megfigyelésekre van szükségünk, amiből következtetéseket levonva javaslatokat tudunk tenni a javításra. Erre a célra lett kifejlesztve a szerelősor monitorozó rendszer, ami a gépi látás segítségével képes adatokat gyűjteni, és ezeket kiértékelni, majd azt megjeleníteni a monitorokon. Célja, hogy végig kövessen egy adott szerelési folyamatot, amit beállítottunk neki, és a szerelésben soron következő objektumról eldöntse, hogy ott van-e vagy nincs, majd kiadja a következő utasítást (melyik a következő alkatrész a folyamatban). Ezen kívül adatokat szolgáltat egy alkatrész beszerelési idejéről ennek a módszernek a segítségével. Végső célunk a szerelés folyamatos optimalizálása három szerelőállás esetében úgy, hogy figyelembe vesszük az alkatrészek és egyben egy termék szerelési idejét is, minél kevesebb hiba, várakozási/átállási idő és megfelelő gyorsaság mellett.

2. ábra: A szerelősor

4.1. Kialakítás

A Knorr-Bremse nagyvállalat által, amely elsősorban fékrendszerek gyártásával foglalkozik, a Központ hozzájutott egy 3 szerelőállásból álló szerelősorhoz, egy minőségellenőrző asztalhoz, illetve két szervergéptároló egységhez. Tartalmaz görgőkkel ellátott csúszdákat, négy

darab monitort, három darab monitorozó kamerát (Raspberry Pi), egy számítógépet, és Smart-Light lámpákat, és tárolófiókokat. A tárolófiókokban pót alkatrészek és szerszámok foglalhatnak helyet. A különböző összeszerelésekhez szükségünk van az alkatrészeik alapján tervezett úgynevezett kit tálcákra, ezeken a tálcákon nem csak alkatrészek lehetnek, hanem akár a szereléshez használatos szerszámok is. Ez mind egy speciálisan erre a célra kialakított asztalon helyezkedik el. A csúszdák az anyagmozgatást segítik. A monitorokon a dolgozók nézhetik a kamera által vezérelt utasítássorozatot, és a szerelősor monitorozó rendszer szoftverének kezelőfelületeit. A monitorozó kamerákkal élő felvételt biztosítunk a szerelési folyamatról, ezzel is segítve a soron dolgozókat, illetve az adatgyűjtés szempontjából is fontos lesz az optimalizáció során. A folyamat figyelése gépi látás segítségével valósul meg, amelyhez felhasználunk több ezer annotált képet, az adott tálcáról és az azon elhelyezett objektumokról. A képeket a Raspberry Pi kamerájának segítségével készítjük a CMD-n belül egy parancssor futtatásával. Ezeket többféle külső behatással tesszük különbözővé, ezzel is segítve a gépi látás feltanítását többféle esetre is (Például: fényviszonyok változtatása, ahol lehet alkatrészek fordított elhelyezése és ezeknek hiányos kombinációi). A képeket a Roboflow weboldalán annotáljuk (kijelöljük és ezzel megkülönböztetjük az egyes objektumokat és azoknak hiányát). Az annotált képeket egy saját készítésű feltanító program segítségével dolgoztatjuk fel. Majd az új modell fájlt feltöltjük a használni kívánt Raspberry Pi miniszámítógépre. A szoftver elindításakor egy új munkafolyamatot kezdünk el. Egy befotózás után lehetőségünk van kijelölni, milyen keretek között detektálja a különböző alkatrészeket a Raspberry Pi, illetve be lehet állítani a szereléshez tartozó utasítássorozatot. Ezek után a Start detection gomb megnyomásával elkezdődik a folyamat.



Logistics area: logisztikai terület Kit tray in/out: kit tálca be/ki Buffer: puffer Work zone 1./2./3.: munkaterület 1./2./3. Quality check: minőségellenőrzés Milk run: elszállítás/utántöltés

3. ábra: A szerelősor logikai elrendezése

A 3. ábrán látható a folyamat logikai elrendezése fenti nézetből. Egy operátor, azaz Logistics area-ban tartózkodó munkatárs biztosítja a dolgozók számára a kit tálcák eljutását a görgős csúszda segítségével. Egy neki szánt monitoron látja az utasítást, milyen kombinációban kell a kit tálcákra elrendezni az alkatrészeket, amiket végül eljuttat a kollégákhoz. A képen Bufferek jelentik a kész szerelés tárolóegységét. Az optimalizálással szeretnék azt is elérni, hogy minél kevesebb időt és minél kevesebb összeállítás várakozzon ezekben a tárolókban. A három szerelő által készített termékeket a Quality check pozíciót betöltő személy vizsgálja, ellenőrzi.

5. FOLYAMAT PRÓBÁJA, STATISZTIKA ÉS KONKLÚZIÓK

Elsősorban a gépi látással segített monitorozást és az egy szerelőállásban lévő műveleteket teszteltük. A terméket, ami egy szelep volt, 15 objektumra választottuk szét, és a 4. ábra szerinti elrendezésben rendeztük el a kit tálcán. A 16. elem egy dummy alkatrész, ami szükséges az utolsó komponens beszerelési idejének a számításához, hiszen a sorrendben következő alkatrész elvételével tud egy időkülönbséget számítani a program, ami maga az objektumok szerelési ideje lesz.

4. ábra: A kit tálcán elrendezett objektumok

A gépi látásnak egy olyan funkcióját is használatba vettük, ami a színkombinációk alapján ismeri fel a tárgyakat. A kezünk bőrszíne miatt fellépő problémák lehetnek a detektálás közben, ezért a szereléshez kék kesztyű használatát javasoltuk, amit egy a színeket megkülönböztetni tudó program segítségével állítottunk be. Ha szerelés közben bekerül a látótérbe a kék szín, ami jelen esetünkben a gumikesztyű, a képernyőn jelzi felkiáltójel és tenyér szimbólum kombinációjával.

Egy szerelőálláson 3 személy 1-1 órás szerelését követtük nyomon ugyanolyan szerelési sorrend szerint. Az egyszerűbb kiértékelés érdekében négy feltételezés alapján végezzük el a tesztet, ami a következők:

- Az összeszerelések lineáris folyamatnak tekintendők, tehát mindenki egy ugyanazon sorrend használatával végzi el a feladatot
- Az alkatrészek és az egész termék összeszerelési ideje változó lehet
- A termék egyféle típusát szereljük össze, nincsenek változatok

- Mint ahogy előbb is felvázoltuk, egy szerelőállomáson mennek végbe a szerelések, és egy operátor segíti a szerelő munkáját.

Az 5. ábrán az első alkatrész zöld kerettel látszik, míg a 6. ábrán már a harmadik objektum beszerelését kéri a szoftver. A próba során így mentünk végig a valós szereléseken, mindenki olyan tempóban, amilyenben csak tudott.

5. ábra: Első beszerelésre váró objektum

6. ábra: Harmadik beszerelésre váró objektum

A teszt során egyes alkatrészek és a végső termék szerelési idejét szeretnék mérni, ami több tényező is befolyásolhat, amik a következők:

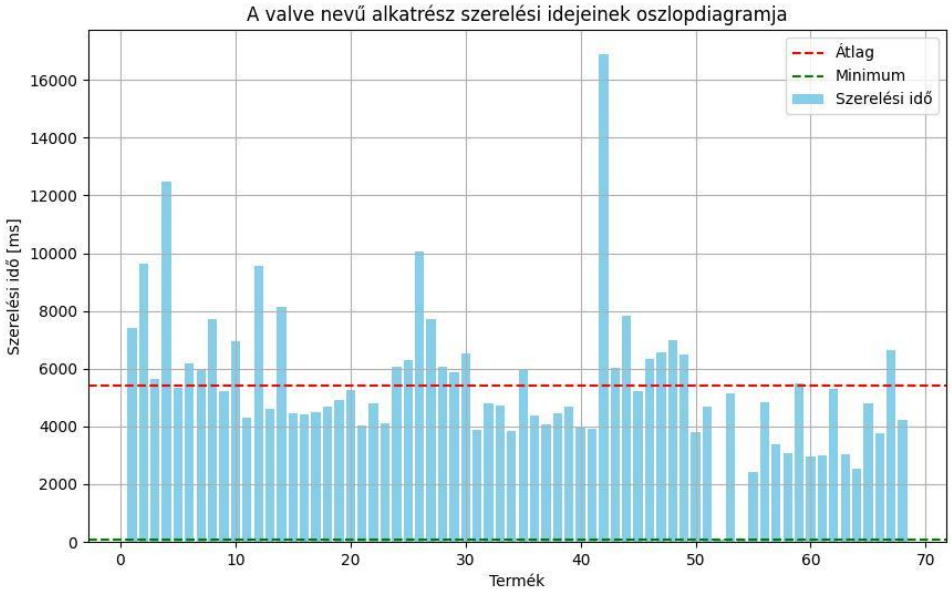
- Gyakorlás: Amikor egy dolgozó először szereli össze az utasítások alapján a termé-ket, feltételezhetően lassabban végzi ezt el, mint mikor már begyakorolta a lepése-ket.
- Az eltelt idő: Ha egy szerelő több órán keresztül dolgozik, akkor elfáradhat, ezért nőhet a szerelés ideje. A műszak elején gyorsabban tudja elvégezni a munkát, ter-mészetesen a begyakorlás után, ha erre szükség van. Míg a műszak végére már ki-sebb lesz a teljesítménye.
- Anyagellátás: Felmerülhet, hogy az operátor nem tudja időben a kit tálcát eljuttatni a szerelőhöz. Ez lehet a logisztika miatt, de lehet készlethiány miatt is.
- Alkatrészhiba: Lehetséges, hogy a folyamat közben egy alkatrész hibásnak tekinte-nek a szerelők, ami cserére szorul. Ez nagy időveszteséggel járhat.
- Műszaki hiba: Előfordulhat, hogy a folyamat közben a szerszámok elromlanak. Ez lehet egy sima kézi szerszám, de lehet elektromos szerszám is. Például: Egy akku-mulátorral ellátott csavarbehajtó akkumulátora lemerül.
- Szerelők általi hibák: A dolgozó véletlen rossz sorrendben veszi el a tálcáról az objektumokat, vagy épp nem jól szerel össze valamit. Ezt a minőségellenőrzési asz-talon észreveszik és utómunkával ki kell javítani.

Az folyamat monitorozás közben a szoftver eltárolta azokat az időadatokat, amikor az ob-jektumot a helyéről kivettük és ezeknek a különbségét meghatározta, illetve egy csv kiterjesz-tésű fájlban tárolta el.

A kiértékeléshez Python programozást vettünk igénybe az adatok elemzéséhez és vizuális kiértékeléséhez.

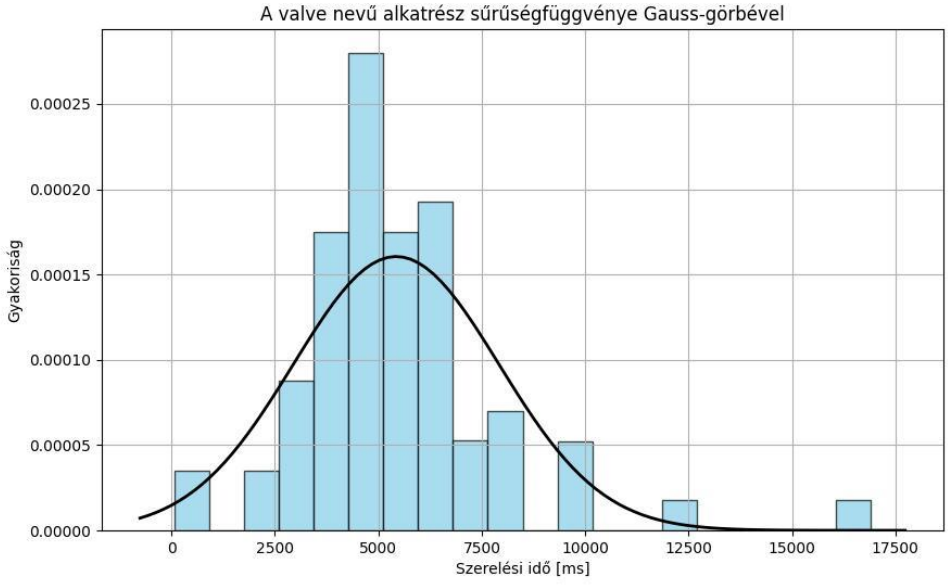
Először minden alkatrész beszerelési idejét feltüntettük 1-1 diagramon. Egy példán keresz-tül bemutatva, a 7. ábrán szereplő oszlopdiagramon az Y tengelyen értelmezhető az eltelt idő milliszekundum [ms] mértékegységben, míg az X tengelyen az összes szerelés látható szá-mozva. Jól mutatja a szerelési idő folyamatos változását a vizsgálat során. Jelen esetben a valve nevű alkatrésznek vannak nagyon kiugró magas és nullához közelítő eredményei is. Az előbbi annak köszönhető, hogy a szerelő elejthette a munkadarabot, vagy épp egy műszaki hiba is jelentkezhetett. Az alacsony értékek pedig arra utalhatnak, hogy a kezelő mikor elvette az egyik

darabot, már rutinszerűen elvette következőt is, pedig még be sem szerelte az előzőt. Az átlagot és a minimum értéket is jelöltük a diagramon.



7. ábra: A valve nevű alkatrész szerelési idejeinek oszlopdiagramja

Ha az összeszerelési időt valószínűségi változónak tekintjük, akkor a 8. ábra szerint tudjuk ábrázolni egy alkatrész beszerelési idejének sűrűségfüggvényét. A várakozásoknak megfelelően közel Gauss-görbét kapunk, ami normális eloszlást feltételez az összeszerelési folyamatokra.



8. ábra: A valve nevű alkatrész eloszlásfüggvénye Gauss-görbével

Ezek alapján az egész termékre, vagy akár külön az objektumokra képesek vagyunk számolni várható értéket, ami igazából az adatok átlaga, és a korrigált tapasztalati szórást, amiket az 1. táblázat is bemutat. A számolás a következőképpen történik az (1) és (2) képlet szerint:

$$\overline{T_{Ai}} = \frac{\sum_{j=1}^{m} t_{Aj,i}}{m} \tag{1}$$

ahol $\overline{T_{Ai}}$: az i -edik alkatrész összeszerelési idejének átlaga, i: az alkatrész sorszáma, j: a termék sorszáma m: gyártott termékek száma, $t_{Aj,i}$: a j -edik termék i -edik komponensének összeszerelési ideje

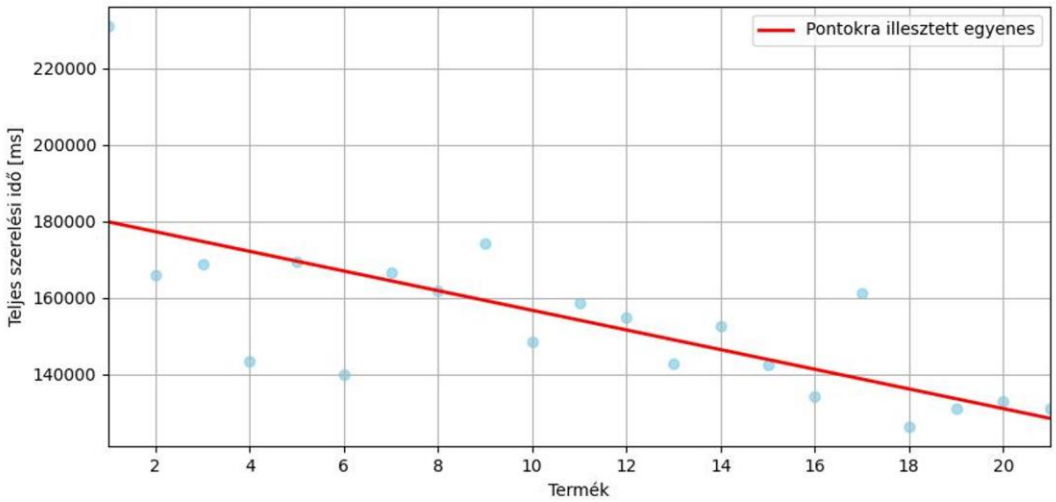
$$D(\overline{T_{Ai}}) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{m} (t_{Aj,i} - \overline{T_{Ai}})^2}{m-1}} \tag{2}$$

ahol $D(\overline{T_{Ai}})$: az i -edik alkatrész összeszerelési idejeinek korrigált tapasztalati szórása

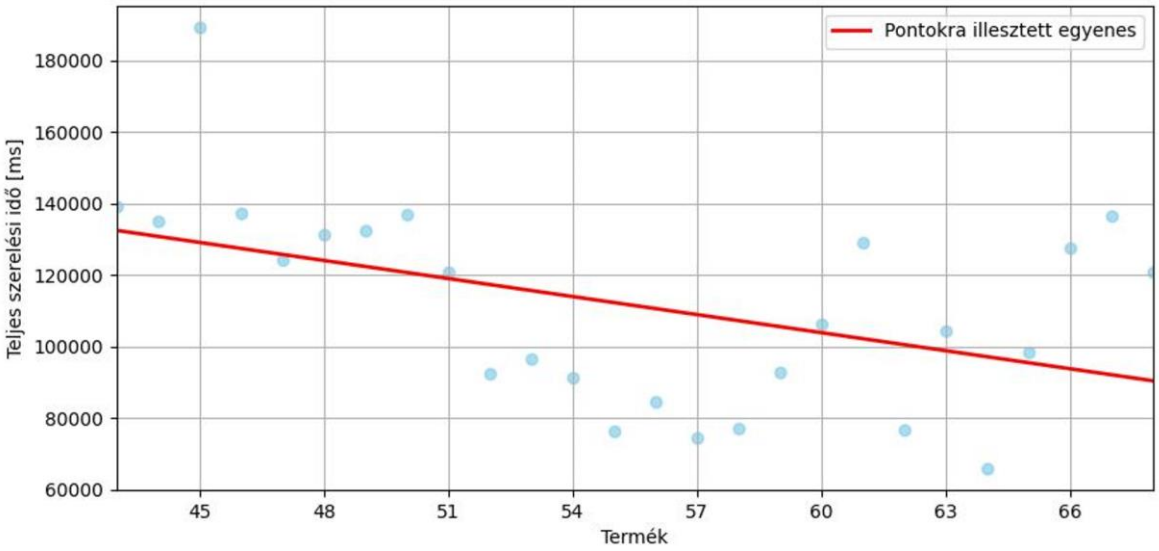
1. táblázat: Az alkatrészek beszerelési idejének várható értéke és korrigált tapasztalati szórása

Név	Várható érték (T_{Ai}) [ms]	Korrigált tapasztalati szórás $D(\overline{T_{Ai}})$ [ms]
Bottom	2528	909
Cap	11356	4759
Hex piston	7498	4026
Hex screw 1	14073	6539
Hex screw 2	15102	5742
Large spring	10426	10546
Piston	4594	2045
Ring	10540	4893
Scew 2	12927	6798
Scew 3	10831	5186
Scew 4	9683	3671
Screw 1	16514	6488
Small spring	3373	1446
Top	4108	7463
Valve	5430	2485

Nagyon jól megfigyelhető a különböző kezelők szereléshez való hozzáállása, teljesítménye. A 9. és 10. ábra az első és harmadik személy termékösszeszereléseiről mutat pontdiagramot. Az első személy a betanulást követően gyorsabban végezte el a feladatot, egyenletesen csökkenő időkkel. A harmadik kezelő nagyobb különbségekkel dolgozott a betanulást követően és a lelassulás jeleit mutatta. Végeredményben mindketten növekvő teljesítmény tanúsítottak a ráillesztett trendvonal szerint.



9. ábra: Az 1. tesztelő termékösszeszerelési idejeinek pontdiagramja



10. ábra: A 3. tesztelő termékösszeszerelési idejeinek pontdiagramja

A teszt rávilágít arra, hogy minden szerelő más tendenciával dolgozik és érdemes minden pillanatban monitorozni a szerelési folyamatot. Az elkövetkezendőkben a 3 szerelőállásra kiterjesztett folyamatos optimalizálás a cél a szerelési idők figyelembevételével. Ennek érdekében 3 dolgozó szimultán munkája szükséges például egy 8 órás műszak keretein belül, így átfogóbb képet kaphatunk.

6. EGY LEGO ÖSSZESZERELÉSÉNEK KÍSÉRLETE

Az előző teszt után más típusú alkatrészek összeszerelését kívántuk előtérbe helyezni. Kutató és fejlesztő társaimmal együtt úgy gondoltuk, hogy egy kisebb LEGO lesz a választott termékünk. Az összerakásukhoz nem szükséges szerszám, így kiaknázhatjuk az esetleges szerszám és szerszámhasználati hibákat a szerelési időkben. Emellett a LEGO-val, mint térbeli elemmel, minden ember számára megfelelő és érthető szerelés prezentálható a későbbiekben. A 42148-as számmal sorszámozott termékre, azaz a hótakarítóra esett a választás, mivel még a későbbiekben egy másik kialakítást is létre lehet hozni ezekből az alkatrészekből, ami a Snowmobil. Ezeknek a képei a 11. ábrán és a 12. ábrán látható. Az elkövetkezendő leírásban bemutatásra kerül, hogyan tudunk új terméket bevezetni a demonstrált szerelősor birtokában.

11. ábra: LEGO Snow Groomer, azaz hótakarító (“LEGO,” n.d.)

12. ábra: LEGO Snowmobil, azaz motorosszán (“LEGO,” n.d.)

6.1. Tálca tervezés

Az előző termékkel ellentétben, aminél már a kit tálca is adott volt a kísérlethez, csak a szerelősor állt rendelkezésre. Az komponensekhez új tálca tervezésére volt szükség, amit 3D nyomtatóval készítettünk el. A tálca főbb méreteit az összeállított csúszda és az alkatrészek

nagyságához képest kellett meghatároznunk. A kivitelezésnél figyelembe vettük még az alkatrészek súlyát is. E szempontok mentén a vizsgáltuk a könnyű és kicsi LEGO elemeket. A tálcát elég vastagra terveztük ahhoz, hogy olyan mélyedéseket alakítsunk ki, amelyben a komponensek nem szorulnak meg, de a nagyobb rázkódástól és gyors rakodáskor ne essenek ki, ne mozduljanak el a kijelölt helyükről. Az egyértelműség érdekében számozás javasolt a tálcán található összes alkatrész helye mellé, ezzel segítve a szerelők, operátorok és fejlesztők munkáját.

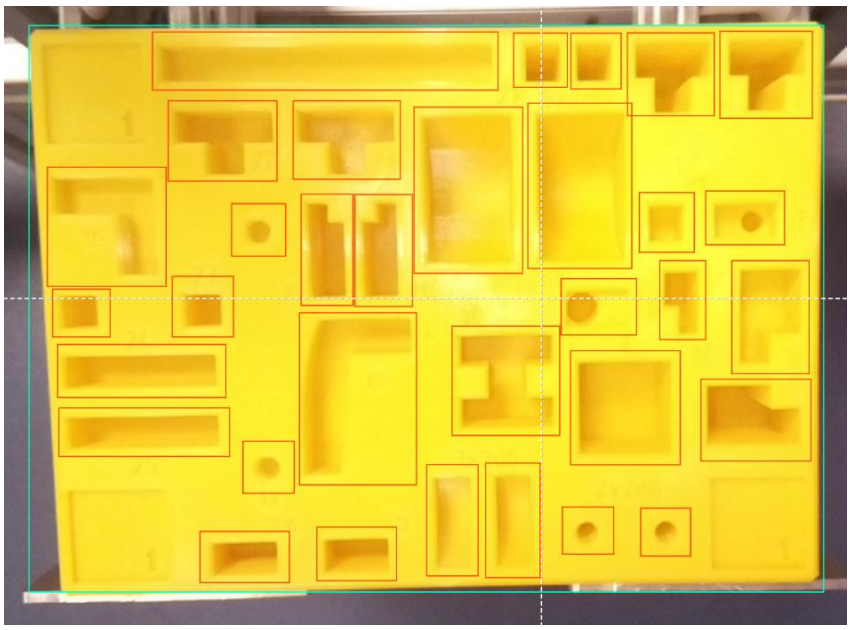
A szín kiválasztás is szükséges lépés. Nem előnyös olyat választani, ami megegyezik valamelyik, vagy valamennyi alkatrész színével, mivel könnyen beleolvadhatnak, ezáltal a komponensek felismerése nem tud megtörténni. A Snow Groomer esetében citromsárga színt választottunk, mert nincs olyan komponens, ami ezzel a színnel rendelkezne.

Bármely hasonló szerelésekkel foglalkozó vállalatnál nem olyan fontos tényező, hogy pontosan mennyi alkatrészt tartalmaz a folyamat. A mi esetünkben 30 komponensre osztottuk a terméket, hogy a teszt folyamán mindhárom szerelő ugyanannyi alkatrészt szerelhessen, jobban láttatva azt, hogy különböző beszerelési idő tartozik, hozzájuk, és nem a komponensek számától függenek az időkülönbségek.

6.2. Annotálás

A komponensek felismerése érdekében egy mesterséges intelligenciával ellátott programot használunk, ami a kit tálcáról készített képek és azokon tárolt címkék, bélyegek alapján tárolja el és osztályozza őket. Tapasztalataink alapján 1000-2000 kép elkészítése már elegendő ahhoz, hogy a beolvasás és csoportosítás kiváló legyen. Javasolt, ahogyan mi is tettük, a fotókat különböző kombinációkban és fényviszonyokban elkészíteni. A komponenseken kívül magát a tálcát, a képekbe belelógó kezeket és a hiányzó alkatrészek helyét is címkézni kell. A tálca a behatárolt területet jelöli, ahol a gépi látás történik, azaz az alkatrészfelismerés. A kezek felismerése azért fontos, hogy még véletlenül se zavarjon be a folyamatba. A hiányzó (missing) bélyegek a legfontosabbak. Ezzel tudjuk, hogy a folyamatlépéseknél az alkatrész elkerült-e a helyéről és jöhet a következő. A következő 13. ábra és 14. ábra mutat néhány variációt. A Roboflow oldalán készítettük el a címkézést.(“Roboflow,” n.d.) Mindent egyesével volt lehetőségünk kijelölni, ami az előkészítés egyik leghosszadalmasabb feladata. A címkéket a konzisztencia érdekében a tálcán jelölt számokkal neveztük el. Mesterséges intelligencia által feldolgozva már a szerelőállásokon felhasználható a gépi látás segítéséhez.

13. ábra: Az összes komponenssel ellátott tálca címkékkel



14. ábra: A komponensek hiánya is címkézve vannak a tálcán

6.3. Szerelési folyamat tesztelése

A szerelőállásra helyezett tálca monitorozása kezdetét vehette. Élő kép alapján bejelöltük, hogyan keretezze a program a különböző alkatrészeket az utasítás során.

Az előző kísérlet alapján bemutatott kék kesztyűs megoldás ennél már nem volt célravezető a sötétkék LEGO darabok miatt. Megannyi gondolkodás után találtunk rózsaszín gumikesztyűt, ami már eléggé elütött a piros komponensektől is, így a beállítást követően a folyamat érzékeli ennek a színnek a jelenlétét, és a detektálási folyamat addig szünetel.

Ezek után az utasításoknak megfelelően végrehajtottuk a szerelést, melynél a legfőbb szempont az, hogy minden egyes komponenst felismeri-e és azt is, ha már nincsen ott. Ennek sikerességét úgy lehet felismerni, hogy a komponensek körül lévő zöld keret addig nem ugrik át, amíg nem vesszük el az alkatrészt.

6.4. A LEGO tálcával történő szerelési kísérlet

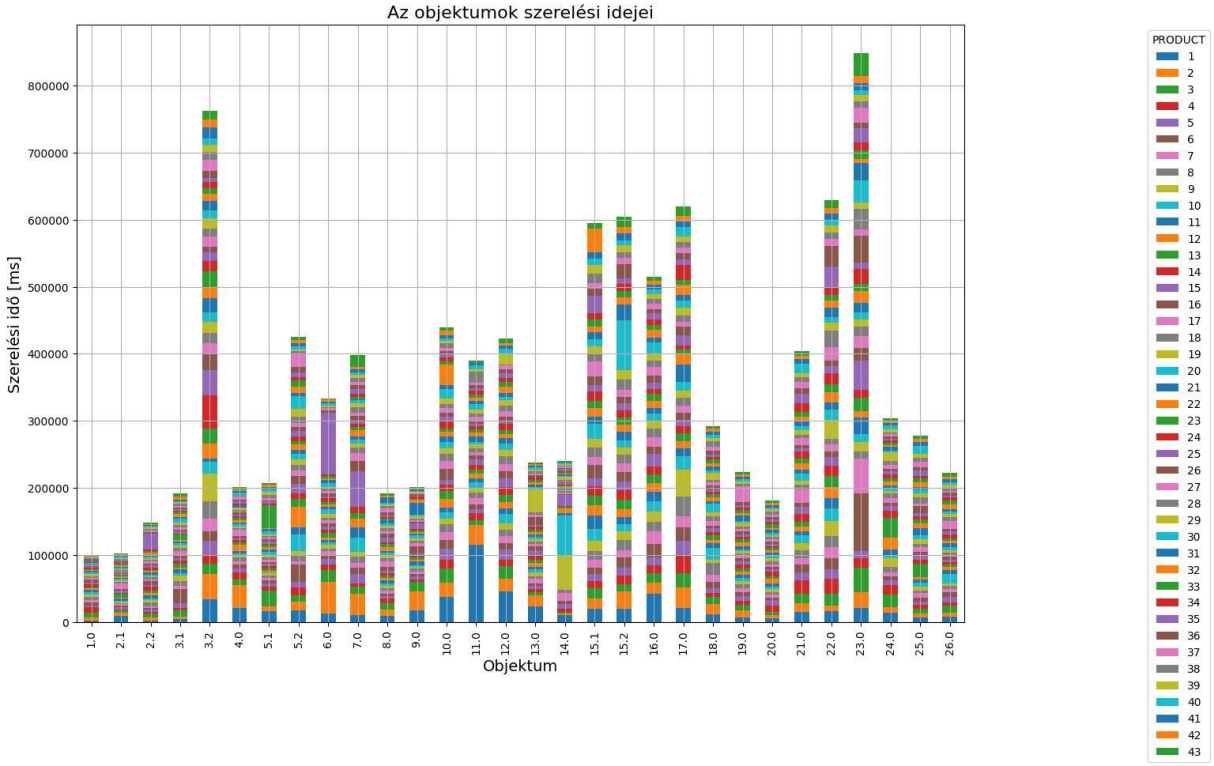
Ehhez a kísérlethez 12 LEGO Snow Groomer termék állt rendelkezésünkre. A kísérlet előkészítése végett összeállítottam a különböző komponenseket és szétszortíroztam őket. Ez azért fontos, hogy a hátsó operátoroknak könnyebb legyen a tálcák kiosztását véghez vinni. A kísérletet két külön alkalommal 4 órán át akartuk végezni, melynek első időpontja 2024.10.16-án történt. Rajtam kívül 5-7 kolléga segítségével elkezdtük a szerelést úgy, hogy a 3 szerelőállason 3-an szereltünk, és nem váltottunk. Az állandó személyek azt a tényezőt zárták ki, hogy a dolgozók általi szerelési trend nem változtat a mérési adatokon a folyamaton belül.

A kísérlethez 31 komponenst használtunk fel. A tálcák 11 objektumot tartalmaztak. Az első és második álláshoz egy dummy, azaz a részösszeszerelés befejezésének jelzésére szolgáló alkatrészt tettünk. ez volt a 21-es alkatrész. Ez azért volt fontos, hogy az idők detektálásából számított időkülönbségekből meg tudjuk határozni a komponensek szerelési idejét. A 3. állomáson az utolsó 27-es számú komponens volt a szerelést lezáró objektum. A szerelők számára egy szerelési utasítás (11.1. Melléklet) és a komponenseket tartalmazó táblázat (11.2. Melléklet) került összeállításra, ami mellékletben található.

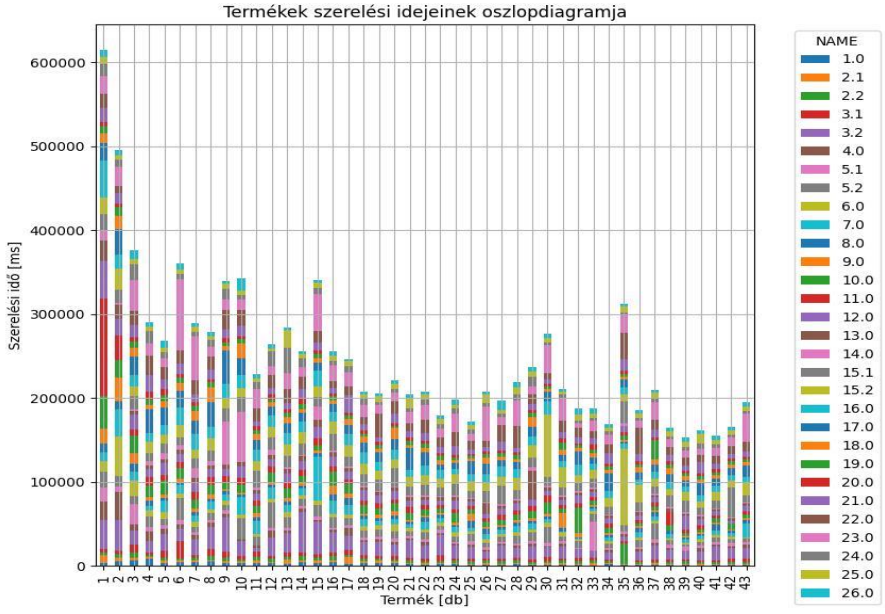
A szerelés jól kezdődött, az adatok jól kerültek rögzítésre és a detektálás is remekül ment. A probléma az operátorok másodlagos munkájával volt, ami nem más, mint a késztermékek szétszerelése, ami nagyon nehézkesen ment. Eleinte a termékek és komponensek ismeretlenek voltak az operátorok számára. Emellett még a LEGO sajátosságai is bonyolították hótakarító szétszerelését. A komponensek nem épp úgy jöttek szét, mint ahogy össze voltak rakva. Így a sok szétszedési idő miatt, nem jutottak a szerelők tálcához, illetve a folyamat sajnos nem volt folyamatos szerelésnek tekinthető. A 4 óra helyett két és fél óra alatt 43 terméket készítettünk el. Ebbe beletartozott a szétszedés miatti várakozás, ezért majd csak az adatokkal létrehozott szimuláció alapján tudhatjuk meg a tényleges szerelési időt.

A komponensek szerelési idejeinek birtokában létrehoztam pár statisztikai diagramot, mely jól szemlélteti a szerelők munkáját. Az adatok feldolgozása ugyanúgy ment, mint a szelep összeszereléses kísérletben. A csv fájl feldolgozása Python Jupiter Notebook programozás segítségével történt, aminél felhasználtam a pandas könyvtárat az adatok statisztikai felhasználására és a matplotlib könyvtárat a diagramok elkészítéséhez.

Az alkatrészekre szánt idő a 15. ábrán látható. Itt is bemutatható az, hogy komponensenként változhatnak a szerelési idők, a legtöbb szerelést igénylő a 23-as számú, míg a legkevesebb időt igénylő az egyes számú alkatrész volt. Az utóbbi azzal, magyarázható, hogy az első komponens elvétele után már jöhetett rögtön a második, aminek az ideje a nullához konvergál.



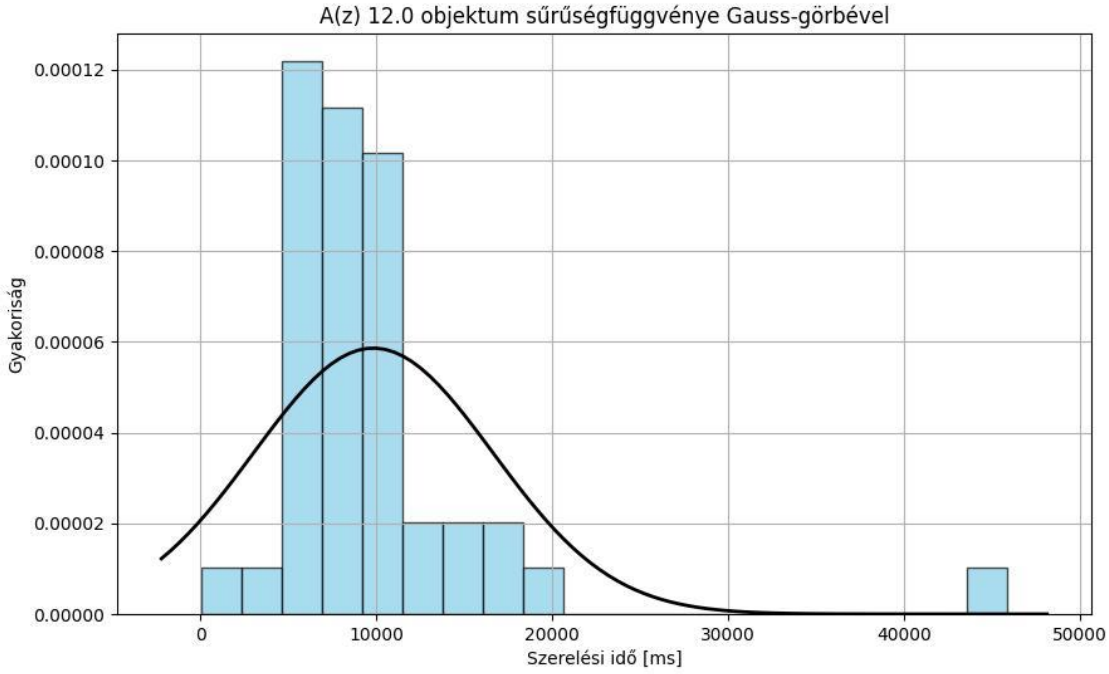
15. ábra: Az objektumok szerelési idejei



16. ábra: A termékek szerelési idői

A következőkben szemléltetem a termékek szerelési időit oszlopdiagram formájában. A 16. ábrán látható az X tengelyen a termékek számozása és az Y tengelyen a szerelési idők milliszekundum értékei. A különböző komponensek más-más színt kaptak a vizuális bemutatás érdekében. Jól látszik, hogy egyre gyorsabban készültek el a termékek, azaz a betanulás megtörtént. A kiugró értékek azzal magyarázhatók, hogy épp kieshetett a munkadarab a szerelő kezéből, vagy a szerelés közben valamit nem jó helyre rakott, és ezt gyorsan helyrehozta.

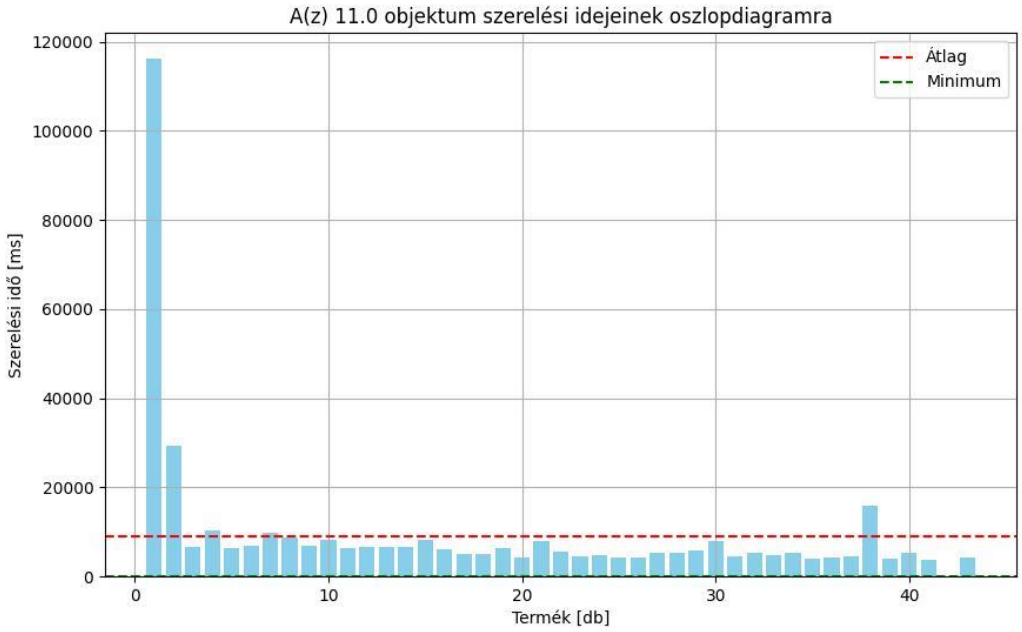
Minden objektumról készült egy sűrűségfüggvény, mely megmutatja a 43 darab terméken keresztül, milyen várható értéket vehetett fel. Ha a szerelési időt valószínűségi változónak tekintjük, akkor a 17. ábra szerint tudjuk ábrázolni egy alkatrész beszerelési idejének sűrűségfüggvényét. A várakozásoknak megfelelően közel Gauss-görbét kapunk, ami normális eloszlást feltételez az összeszerelési folyamatokra.



17. ábra: A 12.0 objektum sűrűségfüggvénye Gauss-görbével

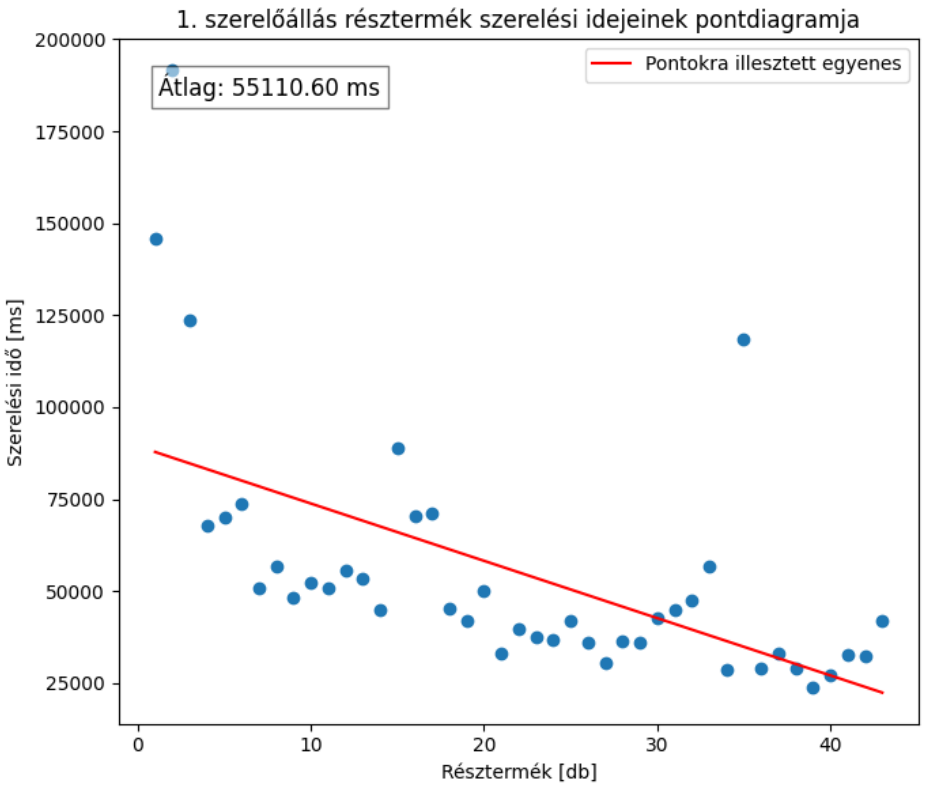
Minden objektum szerelési idejéről készítettem 1-1 diagramot. Egy példán keresztül bemutatva, a 18. ábrán szereplő oszlopdiagramon az Y tengelyen értelmezhető az eltelt idő milliszekundum [ms] mértékegységben, míg az X tengelyen 43 termék számozása. Jól mutatja a szerelési idő folyamatos változását a vizsgálat során. Jelen esetben a 11.0 objektumnak van nagyon kiugró magas és nullához közelítő értékei is az oszlopdiagramon. Az előbbi annak köszönhető, hogy a szerelő eleinte nem ismerte a szerelést és időbe telt mire betanulta azt. Ez az első és

második termék esetében fordult elő. A többi szerelésnél már stabilizálódott az objektum beszerelési ideje. Az alacsony értékek között észrevehető az utolsó előtti szerelésnél egy közel 0 érték, ami a detektálásban létrejött hiba miatt történt. Az átlagot és a minimum értéket is jelöltük a diagramon.

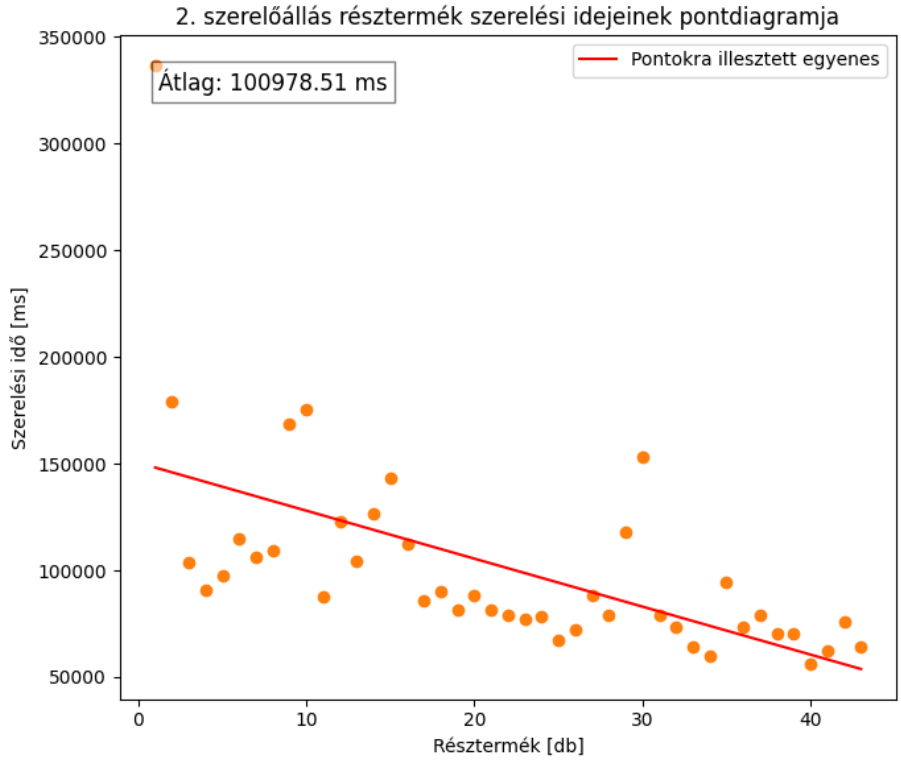


18. ábra: A 11.0 objektum szerelési ideijeinek oszlopdiagramja

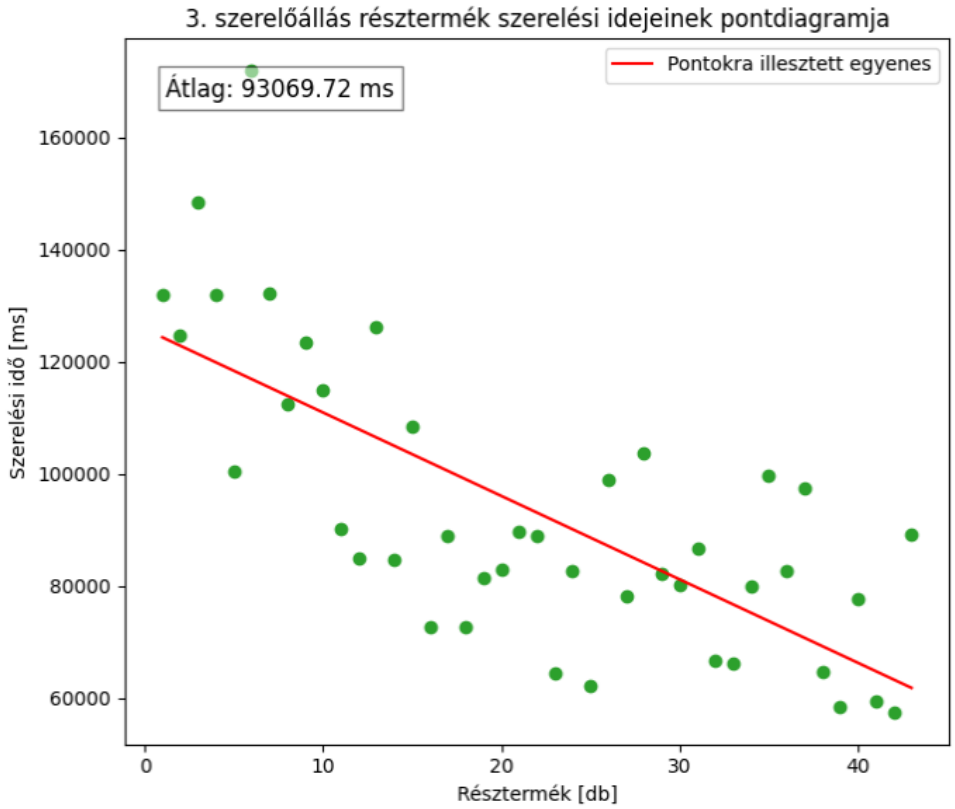
Megfigyelhető ennél a tesztnél is a különböző kezelők szereléshez való hozzáállása, teljesítménye. A 19., 20. és 21. ábra mindhárom személy részösszeszereléseiről mutat pontdiagramot. Az első személy a betanulást követően, azaz körülbelül 2 részösszeszerelés után, gyorsabban végezte el a feladatot, egyenletesen csökkenő időkkel. A második szerelő ugyanannyi időt töltött először a részösszeszerelésével mint az első, de ő nem mutatottugrásszerű javulást. Míg a harmadik kezelő nagyobb ugrásokat képzett a betanulást követően, mégis a lassulás jeleit is bemutatta. Végeredményben mindhárman növekvő teljesítmény tanúsítottak a ráillesztett trendvonal szerint.



19. ábra: 1. szerelőállás résztermék szerelési idejeinek pontdiagramja



20. ábra: 2. szerelőállás résztermék szerelési idejeinek pontdiagramja



21. ábra: 3. szerelőállás résztermék szerelési idejeinek pontdiagramja

A pontdiagramokon feltüntetett átlagok alapján az első személy majdnem kétszer gyorsabb volt a másik két szerelőnél. A következő tesztet ezen statisztikák és a szimuláció alapján javaslom és tervezem meg.

Az egész termékre, vagy akár külön az objektumokra képesek vagyunk számolni várható értéket, ami igazából az adatok átlaga, és a korrigált tapasztalati szórást, amiket a 2. táblázat is bemutat. A korábban kifejtett (1) és (2) képletek alapján jött létre a számítás.

2. táblázat: Az objektumok beszerelési idejének várható értéke és korrigált tapasztalati szórása

Objektum név	Várható érték (T_{Ai}) [ms]	Korrigált tapasztalati szórás $D(\overline{T_{At}})$ [ms]
1	2326	1685
2,1	2384	1668
3,1	4473	3185
4	4693	5810
5,1	4834	6129
6	7756	14794
7	9269	8843
8	4469	2113
9	4689	5390
10	10218	6979
11	9075	17264
12	9831	6802
5,2	9894	6068
13	5537	5920
14	5605	11599
2,2	3462	3426
3,2	17717	9588
15,1	13832	5332
15,2	14053	10182
16	11973	6126
17	14404	7558
18	6798	3750
19	5210	3307
20	4218	1377
21	9391	3841
22	14620	6142
23	19709	14874
24	7062	5361
25	6471	2803
26	5188	2357

6.5. Szimuláció és optimalizálási javaslat

A szimuláció olyan folyamat, amely valóságos környezetben folyik, de nem valós eseményeket modellez, és célja különböző fogalmak, események vagy jelenségek gyakorlása és megértése. Szimulációs játékok is léteznek, amelyek tapasztalati tanulást biztosítanak a résztvevők számára. Az időadatokat felhasználva létrehoztam Python Jupiter Notebook programozással egy szimulációt, ami végigvezet az egész folyamaton, arra ad nekünk bepillantást, hogy mikor mi történt. Egy Excel fájlban gyűjtöttem össze az időadatokat, ahol az első oszlop az objektumok nevét, míg az első sor a termékek számát tartalmazták. Ezeknek keresztezésében a szere-

lési idők álltak. Elsőként az első szerelő időivel próbálkoztam, ami valójában egy ciklikus összeadásnak bizonyult. Minden oszlopban végigfutott, és összeadta az első tíz számot. A második szerelőnek az a kritérium jutott, hogy csak akkor kezdheti el a munkát, ha előtte az első szerelő végzett. Ez a harmadik szerelővel is így működött. Ezek a folyamatok szimultán tudtak haladni egymás mellett még végül „timer" segítségével a folyamat elejétől tudjuk a folyamat egyes részei hol járnak. A következőkben egy kis részletet mutatok be a szimuláció kiértékeléséből a folyamat során:

- *Személy 1 befejezte az 1. szerelés 1. alkatrészt 3.243 másodpercnél.*
- *Személy 1 befejezte az 1. szerelés 2. alkatrészt 12.582 másodpercnél.*
- *…*
- *Személy 1 befejezte az 1. szerelés 9. alkatrészt 107.815 másodpercnél.*
- *Személy 1 befejezte az 1. szerelés 10. alkatrészt 145.970 másodpercnél.*
- *Személy 2 várakozott 145.970 másodpercet.*
- *Személy 2 befejezte az 1. szerelés 11. alkatrészt 262.164 másodpercnél.*
- *Személy 2 befejezte az 1. szerelés 12. alkatrészt 308.008 másodpercnél.*
- *…*
- *Személy 2 befejezte az 1. szerelés 19. alkatrészt 439.441 másodpercnél.*
- *Személy 2 befejezte az 1. szerelés 20. alkatrészt 482.731 másodpercnél.*
- *Személy 3 várakozott 482.731 másodpercet.*
- *Személy 3 befejezte az 1. szerelés 21. alkatrészt 503.902 másodpercnél.*
- ...
- ...
- ...
- *Személy 3 befejezte az 43. szerelés 29. alkatrészt 4625.509 másodpercnél.*
- *Személy 3 befejezte az 43. szerelés 30. alkatrészt 4631.161 másodpercnél.*
- *Az egész folyamat vége: 4631.161 másodperc = 77.186 perc.*
- *Személy 2 összes várakozási ideje: 145.970 másodperc = 2.433 perc.*
- *Személy 3 összes várakozási ideje: 629.163 másodperc = 10.486 perc.*
- *Személy 1 várakozási ideje, amíg Személy 3 befejezi az utolsó szerelést: 2261.405 másodperc = 37.690 perc.*

- *Személy 2 várakozási ideje, amíg Személy 3 befejezi az utolsó szerelést: 143.115 másodperc = 2.385 perc.*
- *Összes várakozási idő: 3179.653 másodperc = 52.994 perc.*

A folyamat 77,186 perc tényleges szerelésből állt. Ebből az adatból egy átlagos termékösszeszerelési idő is számítható, ami a következő képlet alapján képződik:

$$\overline{T_m} = \frac{T_m}{m} = \frac{77{,}186}{43} = 1{,}795 \ \frac{perc}{termék} \tag{3}$$

ahol $\overline{T_m}$: az *m* darab termék szerelési idejeinek átlaga, m: gyártott termékek száma, T_m: az *m* darab termék szerelési idejének szummája.

3. táblázat: 1. termék és szummái

Termék / Sorszám	1	Összeg	Termék / Sorszám	1	Összeg
1	3243	3243	**16**	3019	364128
2	9339	12582	**17**	34585	398713
3	4623	17205	**18**	19877	418590
4	21543	38748	**19**	20851	439441
5	17309	56057	**20**	43290	482731
6	12900	68957	**21**	21171	503902
7	10595	79552	**22**	12011	515913
8	10033	89585	**23**	7359	523272
9	18230	107815	**24**	6230	529502
10	38155	145970	**25**	15817	545319
11	116194	262164	**26**	17183	562502
12	45844	308008	**27**	21388	583890
13	18363	326371	**28**	14675	598565
14	23624	349995	**29**	7964	606529
15	11114	361109	**30**	8031	614560

A célom az elkövetkezendőkben az, hogy ezt az átlagos termékösszeszerelési időt csökkentsük és így több terméket lehessen gyártani.

Első körben egy általános optimalizáláson gondolkodtam, ami nem csak erre a tesztre koncentrálódna, hanem akármelyik szerelésre és a dinamikus optimalizálást is bemutatná. Ezért termékenként más és mást kiosztást javasoltam. A kritérium az, hogy a sorrend megmaradjon és úgy osszam szét a szerelők között a munkát. A gondolatom az, ha időben mindenkire ugyanaz a teher, azaz szerelési idő hárulna, akkor a folyamat idején csökkenthetünk. Ez úgy oldottam meg, hogy a szimuláció mellé egy számítást is betettem a kiosztásokhoz. Azaz minden termékhez a komponensek idejeit összeadja és elharmadolja. Ahol a harmad a legközelebb van,

ott lesz a kiosztás határa. Erre az első terméken keresztül mutatok példát. A 3. táblázatban látható értékek alapján 614560 milliszekundum az első termék szerelési ideje, és ennek az egy harmada 204853 milliszekundum, míg a két harmada 409707 milliszekundum. A legközelebb álló értékek a 11. és a 18. komponensnél lesznek. Így a kiosztás az első szerelő esetében 1-től 11-ig, a második szerelő esetében 12-től 18-ig, és a harmadik szerelő esetében 19-től 30-ig tartó tartományba esik a kiosztás. Ezt mind a 43 termék esetében megtettem, és lefuttattam a szimulációt. Az eredmény jelentősen javított az összesített szerelési időn, mert 66,373 perc lett, melylyel majdnem 11 percet spórolhatnánk a folyamaton. Ez olyan fajta dinamikus optimalizálási kísérleteket igényel, ahol mindegyik terméknél más és más javaslatot tehetnénk. A javaslatok tételéhez a IoT-re lenne szükség, a különböző eszközök és alkalmazások kommunikálása végett. Ha egy ember figyelné a szerelési adatokat, akkor sem tudná időben kiértékelni és javaslatot tenni, így a folyamat nem lenne folyamatos. A tapasztalataim alapján a harmadolásos módszerrel a folyamaton belüli várakozásokat minimalizálhatjuk, ez magával vonhatja a teljes szerelés rövidülését. Emellett a pufferok állásának figyelésével lehetne a szerelést optimalizálni.

Utólagos kiosztási javaslat tételét javasoltam a szimuláció és a kiértékelt eredmény alapján. Ahogy a 19., 20. és 21. ábra is mutatja, az első szerelő átlagos részösszeszerelési ideje majdnem kétszer gyorsabb, mint a másik két dolgozó esetében. Ezért lefuttattam egy szimulációt 14-8-8 komponenskiosztással. Végeredményben a 77,168 perc helyett 72,843 perc összesített szerelési időt mutatott. Ennek értelmében a (3) képlet alapján az átlagos termék összeszerelési időt $1{,}795\ \frac{perc}{termék}$ -ről $1{,}694\ \frac{perc}{termék}$-re redukálhatjuk.

2024.10.22-én egy újabb kísérletet végeztünk a birtokunkban levő 12 termék összeszerelésével. A szerelők és pozíciójuk nem változott, hogy ezeket a tényezőket figyelmen kívül hagyhassuk. A célunk az volt, hogy egy újabb javaslat segítségével az átlagos termékösszeszerelési időt csökkentsük, és egy közel folyamatos szerelési folyamatot bonyolítsunk le. Minden szerelő a saját feladatát minden részösszeszerelésnél újra el kellett indítania, emiatt nem nevezhetjük a szerelést teljesen folyamatosnak. A mért adatokban feltüntetett dátumok alapján 17,34 perc alatt készítettük el a 12 terméket, ami $1{,}445\ \frac{perc}{termék}$ átlagos termékösszeszerelési időt jelent. A szimuláció alapján a tényleges szerelés 14,482 perc volt, ami $1{,}207\ \frac{perc}{termék}$-re redukálta ezt az értéket. Ez a növekvő tendencia azzal is magyarázható, hogy a szerelők jobban ismerték már a terméket és gyorsabban tudtak szerelni. Emellett az átlagos részösszeszerelési idők is kezdtek közelíteni egymáshoz. Az első szerelőé 45, a második szerelőé 64, míg a harmadik szerelőé 48 másodperc volt. Eszerint a továbbiakban kevesebb objektumot kell a második személynek adni

és maradékot kiosztani a másik két dolgozó között. A komponensek kiosztásának módosításával bemutatható, hogy csökkenthetjük a termékek átlagos szerelési idejét, és segíthet a teher, teljesítmény optimális eloszlatásában.

7. A SZERELŐSOR MONITOROZÁSA ÉS OPTIMALIZÁLÁSÁNAK MENEDZSMENT SZEMPONTÚ ELEMZÉSE

A célunk az, hogy Lean szemlélet segítségével történő folyamatfejlesztéssel hatékonyságjavítást érjünk el a szerelősor folyamataiban. 3 féle összeszerelési módszer összehasonlítását szeretném figyelembe venni. Bemutatom az általános összeszereléshez képest, miért jobb a kamerákkal megfigyelt szerelés, ami még az utasításban is segít és ezen túl a folyamat optimalizálása, hogy befolyásolja vagy befolyásolhatja a szerelési időt.

7.1. Átállási folyamatok

A LEGO darabjait egy termék összeszerelésekor egy csomagba teszik. Az összerakásnál a legtöbb időt az alkatrészek megkeresése adja. A kit tálca ezt a problémát orvosolja, mert így a szerelőnek az adott alkatrészekkel vagy komponensekkel kell dolgoznia. A poka yoke elv szerint nem csak hogy a monitoron mutatott utasítás, hanem a tálcákon lévő számok is segítenek, melyik számmal ellátott alkatrész következik. Így elkerülhetők az elcserélések és alkatrész meg nem találásából adódó hibák.

A tálcák nagyon egyediek, minden termékhez más lesz az ideális, így nehéz vagy lehetetlen olyan metódust vagy tervezési szabályt kialakítani, ami meggyorsíthatná mind a tervezési, mind a gyártási folyamatot. Ha egy termékcsoporton belül kívánunk átállni, ahol vannak közös komponensek, annak a helyeit érdemes átvenni a modellekből, ezzel gyorsítható az átállás.

Az annotálási és feltanítási folyamat idejét csak úgy lehet kalkulálni, hogy hány képet szeretnénk felhasználni és hány darab komponenst kell ellátnunk a címkékkel. A termékcsoportra visszatérve, amikor kicsit átalakítottuk a tálcán a mélyedések pozícióját, nem volt szükség az újabb annotálásra mert a gépi látás segítségével működő rendszer felismerte ugyanúgy az adott alkatrészt.

A szerelősoron a tálcáról alkotott élőkép segítségével bejelöljük az alkatrészeket, hogy milyen utasítási sorrenden menjen végig. A komponensek színeihez képest keresünk egy eltérő színű kesztyűt és a programban betápláljuk a megfelelő színkombinációkat.

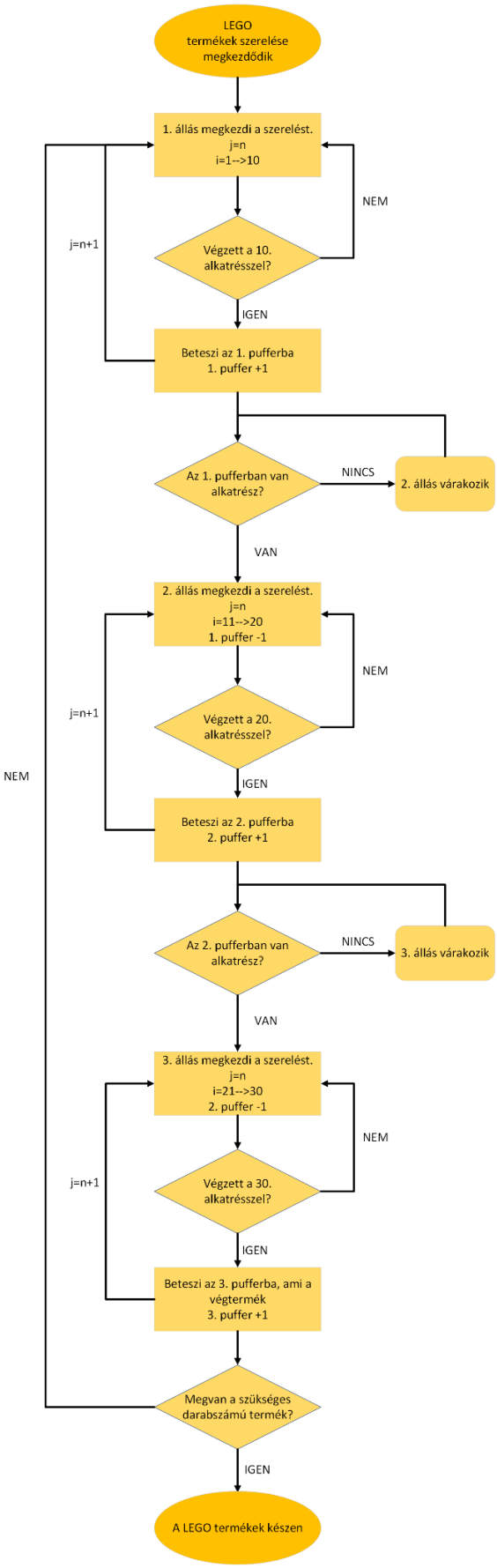
Mindezek után a szerelés elkezdődhet. A két legtöbb időt tartalmazó folyamat az átállásnál a tálcák gyártása és az annotálás. Későbbiekben ezeknek a folyamatoknak az idejét kellene csökkenteni. Az annotálásra szánt időt több személy bevonásával lehet csökkenteni. Minél kevesebb komponens tartozik egy adott kit tálcához, annál kevesebb az átállási idő. Egyelőre nagy sorozatban lévő termékek szerelése ajánlott a szerelősor monitorozó rendszer segítségével, hisz a termékek közötti váltás sok időt igényel.

7.2. Szerelési folyamat

A szerelősor kialakítása egysoros és ebben a projektben ezen nem is változtattunk, mert 3 munkaállomáson 1-1 ember dolgozik és nem kellő hosszúságú ahhoz, hogy más kialakítást kelljen alkalmazni.

A szerelési folyamat során meg volt kötve a kezünk, hiszen egy termék 3 részösszeszerelését szedtük szét, ami egymásra épül. A 22. ábrán látható miként játszódik le a még nem optimalizált folyamat. Az első állomás a szerelés első adag komponensét szereli. Amikor ezzel kész, akkor beleteszi a mellette látható pufferbe, ezek után ő elkezdi a következő terméknek szintén a hozzá tartozó elemekkel. Ha a második állomáson álló személy látja, hogy van az előtte lévő pufferben alkatrész, elkezdheti a saját szerelését. Amikor végzett beteszi az utána lévő pufferbe. A harmadik állomáson tartózkodó személy is ugyanúgy jár el, mint a második személy. A folyamat ebből a szempontból nagyon kötött, hiszen ezeket túlságosan variálni nem lehet, és második és harmadik személy függ az előtte lévőktől.

Egy termék szerelési idejének csökkentése érdekében a folyamat figyelésének segítségével tudunk előrébb jutni. Jelen esetben a folyamatnak optimalizálásra van szükség. Ezt úgy tudjuk megtenni, hogy javaslatokat teszünk a komponensek kiosztásával kapcsolatban. Az érdekünk az, hogy a várakozási időket, a pufferok torlódását és ezekkel együtt az átlagos termék szerelési időket csökkentsük. Az alkatrészek egy utasítás szerint állhatnak össze, nem cserélhetünk a sorrenden. Heijunka eljárással lehet a folyamatok kiegyensúlyozottságát rendezni úgy, hogy egyik csoportból a másikba mozgatunk át komponenseket az optimális idő érdekében. A sorrendiséget meg kell tartani, máskülönben a terméket nem tudjuk összeszerelni. A végső cél az, hogy ezek a javaslatok ne egy óra után, ne egy műszak után, hanem folyamatosan a szerelés közben megtegyük. Ezért kell nagy hangsúlyt fektetni a folyamat folyamatos figyelésére, amivel a szerelők trendjeit, a várakozásokat és a pufferek állását tudjuk figyelni az időben.



22. ábra: A szerelés folyamatábrája, ahol i a termék komponenseinek sorszám és j a termék sorszáma

7.3. Six Sigma és DMAIC ciklus elemzés

A Six Sigma módszertan és a hozzá kapcsolódó DMAIC ciklus (Define, Measure, Analyze, Improve, Control) hatékony eszközök a szerelősor folyamatának optimalizálására, hibák csökkentésére, a minőség javítására és a hatékonyság növelésére. Az alábbiakban bemutatom, hogyan lehet alkalmazni a Six Sigma és DMAIC ciklust a szerelősor elemzésére és fejlesztésére.

- **Define (Meghatározás)**

  A folyamat célja a szerelősor műveleteinek időbeli számszerűsítése, és a szerelési folyamat leegyszerűsítése. A numerikus értékek felhasználásával és statisztikai kiértékeléseivel javaslatot tudunk tenni a javításra, a hatékonyság növelésére.

  Fő cél: Egy termék szerelési idejének csökkentése

- **Measure (Mérés)**

  Az adatok gyűjtése a gépi látás segítségével történik. Amikor kiveszi a szerelő az utasításban mutatott komponenst, az észrevétel ideje és az alkatrész sorszáma és termék sorszáma is mentésre kerül ’csv’ kiterjesztésű fájlformátumban.

- **Analyze (Elemzés)**

  Az időadatok alapján minden alkatrész átlagos idejét, szórását és kiugró értékeit is meg tudjuk határozni. Elemezhetjük az emberek szerelési tendenciáját, és teszt alapján számolt átlagos termék összeszerelési időt.

  Szimuláció segítségével jobban megmutatható a személyek várakozási ideje és a pufferok állása az időben.

- **Improve (Javítás)**

  A szimulációval egy úgynevezett kísérlettervezést lehet végrehajtani, mellyel megoldási javaslatokat tehetünk utólagos optimalizálás gyanánt. Bemutatható hogyan változik a munkafolyamat, ha változtatunk a komponenskiosztásokon az egyes állások esetében.

- **Control (Ellenőrzés)**

  A rendszer hosszú távú nyomon követése és a fejlesztés megtérülésének mérése

8. KONKLÚZIÓK, JAVASLATOK

Ennek a kutatásnak a legnagyobb újdonsága az, hogy a gépi látás segítségével képesek voltunk monitorozni egy három szerelőállásból álló szerelési folyamatot, ami nagyban meg tudja gyorsítani az objektum szempontú folyamat figyelését, és adatainak felvételét. Ezzel lehetőség nyílt a további fejlesztésre a folyamat optimalizálását illetően. Ez megmutatkozik a tesztszerelésekkel és a szimulációkkal végzett kísérletekben. A kitűzött célok a várakozásnak eleget téve megvalósultak.

1. A szerelősor monitorozó rendszer használata nagyban megkönnyíti a szerelők munkáját. A kit tálcával való alkatrész elrendezéssel az elkerülhető hibákat ki tudtuk szűrni.
2. A szerelősor monitorozó rendszer a szerelni kívánt alkatrészek felismerése révén gyűjtött időadatokat. Ezek az adatfelvételek is sikeresen lezajlottak a tesztek során. A komponensek szerelési időinek birtokában a szerelők szerelési trendjei is sikeresen bemutatásra kerültek diagramok formájában.
3. A szerelők betanulási fázisát sikeresen igazoltam a diagrammok segítségével. A fáradási jelenség bemutatása érdekében további tesztek szükségesek, ami már egy tényleges munkanapot mutat be.
4. Ezek mellett az utólagos optimalizálással tudtunk javítani a folyamaton egy új komponenskiosztás javaslásával. Végül rávilágítottam arra is, hogy minden egyes termék szerelésekor új kiosztás javaslásával lehetne az átlagos termék összeszerelési időt még jobban csökkenteni, amit dinamikus optimalizálással lehetne elérni.

Ez egy forradalmi technológia, amit továbbfejlesztve vállalatok használhatnak és profitálhatnak belőle. Mint minden folyamatnak, ennek is megvannak még a hibái, amik később megoldásra, javításra szorulnak. A javaslataimat a témában két csoportra osztom, a szerelés előkészítésekor, és a szerelés közben felmerült problémák kezelésére.

8.1. Szerelés előkészítésének javaslatai

A szerelni kívánt termék komponenseinek, alkatrészének bemodellezése szükséges lehet annak érdekében, hogy a kit tálca elsőre megkaphassa a megfelelő kialakítását a tervezése során, ezzel anyagot és időt spórolva javításból.

A megfelelő kesztyű használatához kialakított felhasználóbarát alkalmazás, program fejlesztését javaslom. Ez a funkció a detektálást nagyban segíti, ezért nem elhanyagolható. A mi

módszerünk a detektálási programba van ágyazva, de egy megfelelő hozzácsatolt kezelőfelület segítségével bárki meg tudná oldani ennek a feladatnak az elvégzését.

8.2. Szerelési folyamat javaslatai, és tervezett fejlesztései

Minden állás tekintetében a részösszeszerelés detektálásának elkezdése a felettük lévő monitoron indítható el. Ezek a monitorok egybekötöttek, ezért egy egér használatával lehetett mindhárom állást indítani minden részösszeszerelésnél. Ez akadályozta a folyamatos szerelést, ezért én egy kihelyezett indítógombot vagy külön kezelést javaslok.

További fejlesztés, ami már elkészítés alatt áll, a három marker segítségével felismert tálca. A komponenseket tartalmazó tartó a csúszdában lecsúszva elmozdulhat és nem épp abban a pozícióban van, amiben lennie kell. Ennek megoldására három aruco marker kerül a tálca sarkaiba, ami alapján az elmozdulást a megfelelő alkatrészdetektálás érdekében fix pozícióba tudjuk tenni a felvételkor. Így a valóságban nincs a pontos helyén a tálca, de nem lassul a szerelés annak kézi helyretétele miatt.

A szerelők tendenciáit, szerelési idejeit monitorozva a rendszer kiegészítése javasolt egy optimalizálási javaslatot adó felülettel. A dinamikus optimalizálás érdekében az operátorok, azaz a kit tálcákat adó embereknek kihelyezett monitoron jelenhet meg a szerelési folyamat közben javaslat a kiosztásokat illetően. Ez a legfontosabb hosszútávú feladata a rendszer kiépítésének. Ezzel a megoldással nagyban csökkenthető lenne az átlagos termékösszeszerelési idő, ami a költségek csökkenését vonná magával.

9. Összegzés

A dolgozat első részében bemutattam különböző, a szerelősorokkal kapcsolatos kutatásokat. Ismertettem a folyamat figyeléséhez, fejlesztéséhez és optimalizálásához köthető technikákat, kiemelve a lean szemléletet.

A szerelősor monitorozó rendszer bemutatása után nyomon követtük egy szerelőálláson végzett folyamat figyelését egy szelep típusú termék esetében, amelyet három személy egy órán keresztül tesztelt. Az adatok rögzítésével arra a következtetésre jutottunk, hogy a betanulás után a szerelők átlagosan gyorsabban végezték el a termékek összeszerelésével.

Ezt követően egy LEGO termékkel került bemutatásra a három szerelő állásos szerelés. Ez a teszt az alacsony termékszám és a szétszerelés miatt csak részben eredményezett folyamatos összeszerelést. Az adatok feldolgozásával több következtetést is le tudtunk vonni a folyamat hibáiról. A szerelési folyamathoz készített szimuláció segítségével javaslatot tudtunk adni a komponensek kiosztására. Ezt tesztelve az eredmény javulást mutatott, az átlagos terméköszszeszerelési idő csökkent.

Az Assembly Line Monitoring System (ALMS), azaz szerelősor monitorozó rendszer célja nem csak a szerelési folyamat gépi látással való alkatrészfigyelése, hanem az adatok felhasználását felhasználó optimalizáló rendszer beépítése, ami egy dinamikus optimalizálásnak felelne meg. Ez a rendszer folyamatos figyelés mellett a szerelés közben adna javaslatot az alkatrészkiosztásra a termelékenység, és ezzel együtt a veszteségekből adódó költségek kiaknázásának érdekében.

10. IRODALOMJEGYZÉK

Asiri, M., Hamid, S., Alahmari, S., 2014. International Journal of Computer Applications Continuous Improvement – Development with Time.

Aslan, A., El-Raoui, H., Hanson, J., Vasantha, G., Quigley, J., Corney, J., 2024. Data-Driven Discovery of Manufacturing Processes and Performance from Worker Localisation. FAIM 2023 LNME Pp 592–602. https://doi.org/10.1007/978-3-031-38241-3_67

Battini, D., Finco, S., Sgarbossa, F., 2020. Human-Oriented Assembly Line Balancing and Sequencing Model in the Industry 4.0 Era. International Series in Operations Research & Management Science, 289 Scheduling in Industry 4.0 and Cloud Manufacturing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-43177-8_8

Boysen, N., Schulze, P., Scholl, A., 2022. Assembly line balancing: What happened in the last fifteen years? European Journal of Operational Research, 301, 797–814. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.11.043

Chengjun, C., Chunlin, Z., Wang, T., Dongnian, L., Guo, Y., Zhao, Z., Hong, J., 2020. Monitoring of Assembly Process Using Deep Learning Technology.

De Mast, J., A. J. Schippers, W., J. M. M. Does, R., R. Van Den Heuvel, E., 2000. QUALITY AND RELIABILITY ENGINEERING INTERNATIONAL STEPS AND STRATEGIES IN PROCESS IMPROVEMENT.

Demoly, F., Yan, X.-T., Eynard, B., Rivest, L., Gomes, S., 2010. An assembly oriented design framework for product structure engineering and assembly sequence planning. Elsevier Ltd Rights Reserv.

Freddi, A., Salmon, M., 2019. Design Principles and Methodologies From Conceptualization to First Prototyping with Examples and Case Studies. Springer Tracts in Mechanical Engineering.

Ge, Z., Song, Z., Gao, F., 2013. Review of Recent Research on Data-Based Process Monitoring.

Gonnermann, C., Hashemi-Petroodi, S.E., Thevenin, S., Dolgui, A., Daub, R., 2022. A skill- and feature-based approach to planning process monitoring in assembly planning.

Guzman, J.G., A. Mitre, H., Amescua, A., Velasco, M., 2010. Integration of strategic management, process improvement and quantitative measurement for managing the competitiveness of software engineering organizations.

Ivanov, D., 2023. The Industry 5.0 framework: viability based integration of the resilience, sustainability, and human-centricity perspectives International Journal of Production Research, 61:5, 1683-169. https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2118892

Krishna Rao Pabolu, V., S. Kulkarni, M., Shrivastava, D., 2022 A digital-twin based worker's work allocation framework for a collaborative assembly system IFAC PapersOnLine 55-10.

Krishna Rao Pabolu, V., Shrivastava, D., 2021. A dynamic job rotation scheduling conceptual framework by a human representing digital twin 54th CIRP Conference on Manufacturing Systems.

Lassila, A.M., Saad, S.M., Perera, T., Koch, T., Chrobot, J. (2005). Modelling and Simulation of Human-Centred Assembly Systems - A Real Case Study. In: Camarinha-Matos, L.M. (eds) Emerging Solutions for Future Manufacturing Systems. BASYS 2004. IFIP International Federation for Information Processing, vol 159. Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/0-387-22829-2_43

LEGO [WWW Document], n.d. URL https://www.lego.com/hu-hu/product/snow-groomer-42148?gclid=CjwKCAjwmaO4BhAhEiwA5p4YL32cL6zsKBmMUGjfKHOsCc-RDh9MA3BQHlOKvs0OZkCwGog-voN0xq4xoCuEwQAvD_BwE&ef_id=CjwKCAjwmaO4BhAhEiwA5p4YL32cL6zsK

BmMUGjfKHOsCcRDh9MA3BQHlOKvs0OZkCwGog-voN0xq4xoCuEwQAvD_BwE:G:s&s_kwcid=AL!933!3!674028459251!!!g!!!20556814510!152893541425&cmp=KAC-INI-GOOGEU-GO-HU_GL-HU-RE-PS-BUY-EXPLORE-TECHNIC-SHOP-BP-MM-ALL-CIDNA00000-NOVELTIES-TECHNIC&gad_source=1 (2024.10.15.)

Losonci, D., 2010. Bevezetés a lean menedzsmentbe – a lean stratégiai alapjai.

Lugaresi, G., Matta, M. 2023. Automated digital twin generation of manufacturing systems with complex material flows: graph model completion Computers in Industry. https://doi.org/10.1016/j.compind.2023.103977

Nausch, M., Hold, P., Sihn, W., 2021. A Methodological Approach for Monitoring Assembly Processes. 54th CIRP Conf. Manuf. Syst.

Rekiek, B., Delchambre, A., Dolgui, A., Antoneta, 2002. ASSEMBLY LINE DESIGN: A SURVEY. 15th Trienn. World Congr.

Roboflow [WWW Document], n.d. URL https://roboflow.com/

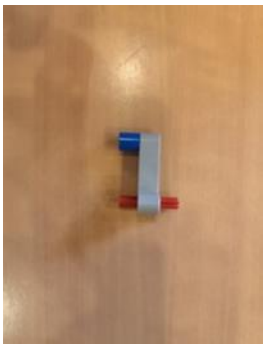
Rowlands, H., Antony, J., Knowles, G., 2000. An application of experimental design for process optimisation. TQM Mag.

Womack, J. P, T. Jones, D., 2009. Lean szemlélet. HVG könyvek.

Yinhua, L., Rui, S., 2019. A survey on data-driven process monitoring and diagnostic methods for variation reduction in multi-station assembly systems.

11. Mellékletek

11.1. Melléklet

	Darabszám: 1 **1** Lépésszám: 1 Alkatrészek: 3 4211758 3 4211807 1 4666579 1 4640536 1 6299413 1 6100030 1 4645730		Darabszám: 2 **2** Lépésszám: 2 16 Alkatrészek: 1 370526 1 4640536
	Darabszám: 2 **3** Lépésszám: 3 17 Alkatrészek: 1 454155 1 6357599		Darabszám: 1 **4** Lépésszám: 4 Alkatrészek: 1 6271831 1 4206482 1 6392879 1 6209519
	Darabszám: 2 **5** Lépésszám: 5 13 Alkatrészek: 1 4645730		Darabszám: 1 **6** Lépésszám: 6 Alkatrészek: 1 4142865 1 6296859 1 6271831 1 4206482 2 6279875 1 6170293
	Darabszám: 1 **7** Lépésszám: 7 Alkatrészek: 1 4158923 1 6321745 1 6299413 1 6209519		Darabszám: 1 **8** Lépésszám: 8 Alkatrészek: 1 4177431 2 6330205 3 6331723 1 6282158 2 6271820 1 6271165 1 6083620 1 6089119 1 370526

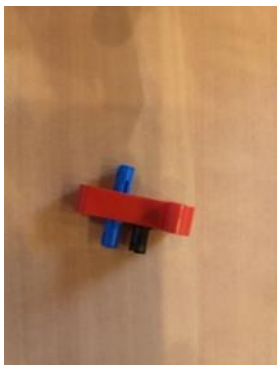
	Darabszám: 1 **9** Lépésszám: 9 Alkatrészek: 1 6271831 1 6299413 1 4206482 1 6392879		Darabszám: 1 **10** Lépésszám: 10 Alkatrészek: 2 4211807 1 4210751 1 6271831 1 6299413
	Darabszám: 1 **11** Lépésszám: 11 Alkatrészek: 1 6329052 1 6299413 1 6279875 1 4211862		Darabszám: 1 **12** Lépésszám: 12 Alkatrészek: 1 6244698 1 4211375 1 6360104
	Darabszám: 1 **13** Lépésszám: 14 Alkatrészek: 1 6299413 1 4211862		Darabszám: 1 **14** Lépésszám: 15 Alkatrészek: 3 4211758 2 4211807 1 4666579 1 4640536 1 6299413 1 6100030 1 4645730 1 6321305
	Darabszám: 2 **15** Lépésszám: 19 20 Alkatrészek: 28 6047885		Darabszám: 1 **16** Lépésszám: 21 Alkatrészek: 2 6271810 1 6209519 1 6299413 1 6100030 1 4142865
	Darabszám: 1 **17** Lépésszám: 22 Eredeti alkatré-szek: 1 4210751		Darabszám: 1 **18** Lépésszám: 23 Eredeti alkatré-szek: 1 6331026 2 4142865

Darabszám:	1	**19**
Lépésszám:	24	
Alkatrészek:	2	6279875
	1	4142135
	1	6319983

Darabszám:	1	**20**
Lépésszám:	25	
Alkatrészek:	2	6279875
	1	4142135
	1	6316923

Darabszám:	1	**21**
Lépésszám:	26	
Alkatrészek:	1	6130007
	1	6343986
	1	6340601

Darabszám:	1	**22**
Lépésszám:	27	
Alkatrészek:	1	6271827
	1	6299413
	1	6279875
	1	6130007



Darabszám:	1	**23**
Lépésszám:	28	
Alkatrészek:	1	6271827
	1	6299413
	1	6279875

Darabszám:	1	**24**
Lépésszám:	29	
Alkatrészek:	1	6130007
	1	6285599
	1	6408165

Darabszám:	1	**25**
Lépésszám:	30	
Alkatrészek:	1	6130007
	1	6285599
	1	6408166

Darabszám:	1	**26**
Lépésszám:	31	
Alkatrészek:	1	6261371
	1	6274747
	1	6347715
	1	6271820

Darabszám:	1	**27**
Lépésszám:	32	
Alkatrészek:	1	4211639
	2	6285599

11.2. Melléklet

Lépés száma	Komponens szám	Lépés leírása, utasítás
1	1	Vegyük ki az 1-es alkatrészt! Ez a két kerekes szerelék közül az, amelyik nem rendelkezik drap tengellyel.
2	2	Helyezzük be a 2-es alkatrész fekete csapját a fogaskerék oldala felől a szabad furatba az 1-es alkatrészbe! Így a fogaskerekeknek egy oldalt kell lennie.
3	3	Húzzuk rá a 3-as alkatrészt az előzőleg beszerelt 2-es alkatrész fekete csapjára, ameddig nem ütközik fel a sötétszürke rúdra! Vigyázzunk, hogy a fekete csap csak a gumis kerék oldalán lógjon ki, de a másik vége legyen egy síkban a fogaskerék végével!
4	4	Helyezzük be a 4-es alkatrész piros hengeres tengely részét a kerék és a sötétszürke henger közé az 1-es sötétszürke alkatrész üres furatába úgy, hogy az L alak rövidebb oldala nézzen az előbbi henger felé!
5	5	Helyezzük fel az 5-ös alkatrészt úgy, hogy a piros kereszt a középső furatba illeszkedjen, illetve a kék és a fekete tengely is benne legyen valamelyik furatban! Ilyenkor a kerék után 1 lyuk maradjon ki, a sötétszürke hengeres rész után pedig kettő kifelé!
6	6	Szereljük be a 6-os alkatrészt úgy, hogy a fekete tengely a 4-es világos szürke alkatrész alsó, sötétszürke rúdhoz legközelebbi furatába menjen bele a kék hengerrel ellentétes oldalra!
7	7	Helyezzük fel a 7-es alkatrészt úgy, hogy a piros kereszt és a kék csap az 5-ös sötétszürke alkatrész szélső két szabad furatába illeszkedjen a kék tengely után, a fekete furatba pedig a 6-os világos szürke alkatrész kék keresztje menjen bele!
8	8	Toljuk be a 8-as alkatrész két szürke tengelyét az 5-ös alkatrészbe úgy, hogy a 4-es alkarész piros keresztje a két tengely közötti helyre mutasson és a fekete kilógó rész az eddig szereltektől elfelé és a piros kiemelkedés a kék 7-es alkatrész felé mutasson!
9	9	Szereljük be a 9-es alkatrészt az 5-ös alkatrészbe! A kék tengely a 8-as alkatrész melletti furatba menjen, a kék henger ilyenkor pedig felfele álljon és nézzen ellentétes irányba, mint a másik kék henger!
10	10	Szereljük be a 10-es alkatérsz kék tengelyét az 5-ös sötétszürke alkatrész szabad furatába és a szürke tengely a 9-es alkatrész alsó, 5-ös alkatrész melletti furatába!
11	11	Helyezzük fel a 11-es alkatrészt úgy, hogy a szürke furata a kék L-alakú 7-es alkatrész fekete tengelyére illeszkedjen rá és az alkatrész kék tengelyének közepe essen egybe a 7-es alkatrésszel!
12	12	Helyezzük be a 12-es alkatrész szürke kereszt alakú csapját a fekete fogaskerékkel ellentétes irányból a 8-as alkatrész kilógó fekete részének a kereszt alakú furatába ütközésig!

13	5	Szereljük fel az 5-ös alkatrészt a másik 5-ös alkatrésszel párhuzamosan! Ilyenkor a két szélső furatba két kék tengelynek kell mennie.
14	13	helyezzük be a 13-as alkatrészt az előző 5-ös sötétszürke alkatrész középső furatába, amely melletti két furatba szürke tengelyek illeszkednek!
15	14	Tegyük félre az eddig szerelteket! Vegyük ki a 14-es alkatrészt! Ez megegyezik az 1-es alkatrésszel, csak egy plusz kilógó drap tengellyel több.
16	2	Helyezzük be a 2-es alkatrész fekete csapját a fogaskerék oldala felől a szabad furatba az 14-es alkatrészbe! Így a fogaskerekeknek egy oldalt kell lennie.
17	3	Húzzuk rá a 3-as alkatrészt az előzőleg beszerelt 2-es alkatrész fekete tengelyére, ameddig nem ütközik fel a sötétszürke rúdra! Vigyázzunk, hogy a fekete csap csak a gumis kerék oldalán lógjon ki, de a másik vége legyen egy síkban a fogaskerék végével!
18		Szereljük össze a 14. és 17. lépésben összerakott két munkadarabot! A 14-es alkatrész legyen párhuzamos az 1-es alkatrésszel, a két sötétszürke hengerük legyen egy tengelyen! A 14-es alkatrész drap tengelye illeszkedjen a 13-as kis világos szürke alkatrész szabad furatába!
19	15	Helyezzük fel a 15-ös lánctalpat az 1-es alkatrészre! Figyeljünk, hogy a fogaskerekek kapjanak bele a lánctalp középső vájatába! Pattintsuk össze a két szabad lánctalpszegmenst!
20	15	Helyezzük fel a 15-ös lánctalpat az 14-es alkatrészre! Figyeljünk, hogy a fogaskerekek kapjanak bele a lánctalp középső vájatába! Pattintsuk össze a két szabad lánctalpszegmenst!
21	16	Toljuk be a 16-os alkatrész piros tengelyét a 6-os alkatrész szürke furatába ütközésig ugyanabból az irányból, mint ahogy a szürke csapot toltuk a fekete kilógó részbe a 12-es lépésben!
22	17	Szereljük a 17-es alkatrész egyik szélső furatába a 12-es alkatrész piros tengelyét! A másik két furatba a 16-os alkatrész két tengelyét toljuk be!
23	18	Illesszük fel a 18-as alkatrészt a 17-es alkatrész kereszt alakú csapjára! Az íves oldal mutasson a ratrak felé!
24	19	Helyezzük a 19-es alkatrészt a 18-as alkatrész piros kereszt alakú csapjára úgy, hogy az íves oldala mutasson a ratrak felé és legyen egy síkban a 18-as alkatrésszel!
25	20	Helyezzük a 20-as alkatrészt a 18-as alkatrész piros kereszt alakú csapjára úgy, hogy az íves oldala mutasson a ratrak felé és legyen egy síkban a 18-as alkatrésszel!
26	21	Húzzuk le a 21-es alkatrész egyik oldalát és toljuk a sárga kereszt alakú tengelyt a 10-es alkatrész kereszt alakú furatába ütközésig! Majd helyezzük fel a másik oldalát is a 21-es alkatrésznek! Az alkatrészen található számok nézzenek felfelé és az egyenes oldal nézzen elfelé a ratraktól!

27	22	Szereljük fel a 22-es alkatrész azon oldalát a 7-es alkatrészre, amelyik oldalt nem jön ki a fekete tengely, csak a kék és a sárga! A sárga kereszt alakú csap menjen a többi alkatrészhez legözelebbi alsó szabad furatba, a kék tengely a kettővel felette lévő furatba! A 11-es szélvédő kék tengelye kerüljön az előre nyúló piros furatba, ne a többi tengely feletti furatba!
28	23	Szereljük fel a 23-as alkatrész azon oldalát a 7-es alkatrészre, amelyik oldalt csak a kék tengely látható, a fekete nem! A kék tengely menjen a 7-es alkatrész szabad furatába, a 11-es szélvédő kék tengelye pedig az előre nyúló piros furatba, ne a többi tengely feletti furatba! Toljuk be a sárga csapot a 22-es alkatrészről a 23-as alkatrészbe úgy, hogy egyik oldalt se lógjon ki!
29	24	Helyezzük fel a 24-es alkatrészt a 22-es alkatrészre (arra az oldalra, ahol a fekete tengely lent, a többi alkatrész felé található)! Az íves oldal nézzen kifelé, a számmal jelzett oldal befelé! A számozott alkatrész nézzen a 11-es szélvédő alkatrész felé!
30	25	Helyezzük fel a 25-ös alkatrészt a 23-as alkatrészre (arra az oldalra, ahol a fekete tengely fent, a többi alkatrésztől elfelé található)! Az íves oldal nézzen kifelé, a számmal jelzett oldal befelé! A számozott alkatrész nézzen a 11-es szélvédő alkatrész felé!
31	26	Rakjuk a 26-os alkatrész vékony szürke tengelyét a 8-as piros alkatrész kereszt alakú furatába úgy, hogy a fekete kiemelkedés a 22-es és 23-as alkatrész közé essen!
32	27	Húzzuk le az egyik karmot a 27-es alkatrészről, majd toljuk át a 22-es, 23-as és 26-os alkatrészen keresztül a szabad furataikon keresztül! Ezután helyezzük vissza a másik karmot is! A karmok a 11-es szélvédő alkatrész felé nézzenek! A szürke csap ne lógjon ki egyik oldalt se!