

MISKOLCI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR



**RAKTÁROZÁSI FOLYAMATOK HATÉKONYSÁGNÖVELÉSI
MÓDSZEREINEK ELMÉLETI MEGALAPOZÁSA ÉS KIDOLGOZÁSA
VALÓS IDEJŰ HELYMEGHATÁROZÁSI RENDSZER (RTLs)
ALKALMAZÁSÁVAL**

Ph.D. értekezés

Készítette:

Bátori Tamás István
okleveles gépészmérnök

Hatvany József Informatikai Tudományok Doktori Iskola
Anyagáramlási rendszerek és logisztikai informatika tématerület
Logisztikai Intézet

DOKTORI ISKOLA VEZETŐ
Prof. Dr. Kovács László
egyetemi tanár

TÉMAVEZETŐ
Prof. Dr. habil. Tamás Péter
intézetigazgató, egyetemi tanár

TÁRSTÉMAVEZETŐ
Prof. Dr. habil. Illés Béla
professor emeritus

2025

NYILATKOZAT

Alulírott **Bátori Tamás István** kijelentem, hogy ezt a doktori értekezést magam készítettem és abban csak a megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, amelyet szó szerint, vagy azonos tartalomban, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a forrás megadásával megjelöltem. A dolgozat bírálatai és a védésről készült jegyzőkönyv a későbbiekben, a Miskolci Egyetem Dékáni Hivatalában lesz elérhető.

Miskolc, 2025.12.01.

Bátori Tamás István

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretnék köszönetet mondani mindazoknak, akik támogatásukkal, biztatásukkal hozzájárultak az értekezésem elkészítéséhez.

Az értekezés a Miskolci Egyetem, Logisztikai Intézetében készült a Hatvany József Informatikai Tudományok Doktori Iskola képzésének keretein belül. Először is szeretnék köszönetet mondani **Dr. habil. Tamás Péter és Prof. Dr. habil. Illés Béla** tudományos vezetőimnek, hogy szakmai iránymutatásukkal, segítőkész munkájukkal és támogatásukkal segítették munkám elkészültét.

Köszönet illeti Prof. Dr. Kovács László és Prof. Dr. Szigeti Jenő professzor urakat, akik a Hatvany József Informatikai Tudományok Doktori Iskola vezetőiként mindvégig támogatták munkámat, hasznos tanácsaikkal és szakmai iránymutatásukkal segítették munkámat.

Köszönöm a Miskolci Egyetem Logisztikai Intézet valamennyi kollégájának, akik a szakmai és erkölcsi támogatásukkal lehetővé tették dolgozatom megírását.

Hálás vagyok Homonnai Emesének, a Gépészmérnöki és Informatikai Kar Dékáni Hivatalának dolgozójának, aki segítségemre volt valamennyi adminisztratív ügyem intézésében a doktori képzésem és a kutatásaim folyamán is.

Köszönettel tartozom továbbá Feleségemnek Ritának, Gyermekeimnek, Szüleimnek, Öcsémnek és a Barátaimnak, a türelmükért, a biztatásukért, melyről munkám során folyamatosan biztosítottak és végig mellettem álltak.

Tartalom

1.	Tématerület vizsgálatának gazdasági és tudományos aktualitása.....	4
1.1	Személyes motivációm a kutatási téma iránt	4
1.2	A tématerület vizsgálatának gazdasági és tudományos aktualitása.....	8
1.3	Komplex rendszer fejlesztésénél figyelmet érdemlő területek	10
2.	Szakirodalmi áttekintés és célkitűzés	11
2.1	A szakirodalmi áttekintés módszertana.....	11
2.2	Az első szakirodalmi vizsgálati terület összegzése.....	19
2.3	A második szakirodalmi vizsgálati terület összegzése.	35
2.4	A harmadik szakirodalmi vizsgálati terület összegzése.....	38
3.	A kutatás módszertana.....	43
4.	A vizsgált logisztikai rendszerváltozatok lehatárolása	44
5.	Raktározási folyamatok további vizsgálatához alkalmas RTLS rendszer technológiai szempontú kiválasztása	48
6.	Logisztikai folyamatfejlesztés lépései valós UWB-RTLS rendszer használatával.....	55
7.	Hatékonysági mutatószámok (KPI-k) RTLS technológiával támogatott raktárak esetében	77
8.	Hipotézisek összefoglalása	88
	Hivatkozások.....	90
	Ábrajegyzék	96
	A dolgozatban használt rövidítések, kifejezések, idegen szavak jegyzéke.....	98

1. Téma terület vizsgálatának gazdasági és tudományos aktualitása

1.1 Személyes motivációm a kutatási téma iránt

Gyakorlati szakember vagyok, több mint 20 éve egy magyarországi AIDC szektorban tevékenykedő és piacvezető közép vállalatnál dolgozom.

A munkám során több száz darab mobil adatgyűjtési-, azonosítás-technológiai, nyomkövetési projektet vezettem a logisztikai folyamat-tervezéstől a fizikai megvalósításig vagy éppen ezek továbbfejlesztésében. Láttam és napi szinten érintkeztem az egyes AIDC eszközök és technológiák látványos fejlődésével, neves globális ipari gyártók világszerte tartott tréningjein vettem részt és naprakész rálátásom lett az iparágban történt dinamikus és egyre gyorsuló fejlődésre. 2017-ben találkoztam először az RTLS technológiával egy neves európai autógyár intralogisztikai egységében. A technológia élő prezentációja után tudtam, hogy olyan innovációba kaphattam betekintést ami forradalmasíthatja az intralogisztika vagy termelés – kiszolgálás addigi ismert eszközeit, vetületeit, folyamatait a hatékonyság növelése érdekében. Azonnal belevetettem magam a technológia megismerésébe, valamint vállalatom támogatásával és gyors partneri kapcsolat felépítésének köszönhetően - 2018-ban már saját továbbfejlesztésű RTLS technológiát sikerült bevezetnünk egy észak-magyarországi nemzetközi autóipari Tier1 beszállító vállalat termelés-kiszolgáló logisztikai rendszerében. A rendszer mellőzte az addig ismert vonalkód és rádiófrekvenciás félautomata adatgyűjtő eszközöket és rádiós hálózatot. A telepített UWB (Ultra Wide Band = Szélessávú) alapú RTLS rendszer használata mellett 99,99% működési pontosságot és 20% erőforrás megtakarítást sikerült elérnünk a korábbi vonalkód alapú Auto ID rendszerhez képest. A telepített rendszer megtérülési ideje (ROI, Return Of Investment) 1 év alatti lett. Nem volt kérdés számomra, hogy olyan technológiai tudás és tapasztalás lett a birtokomban amely az eddigi technológiákat „forradalmasítja”.

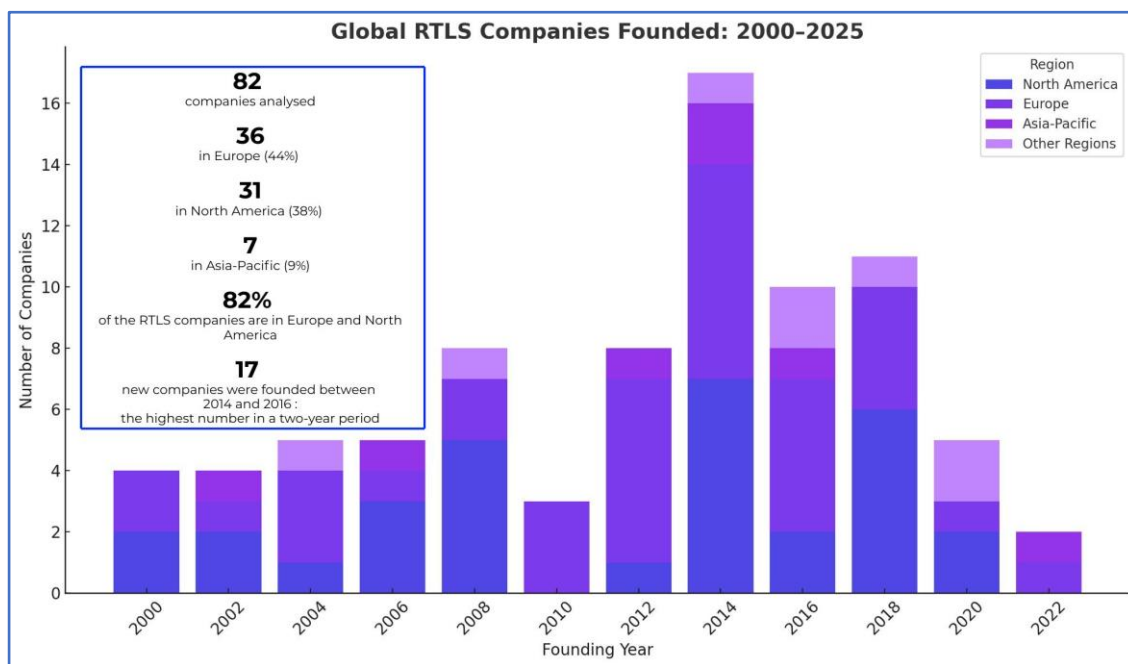
Közvetlen a projekt után - más felmerülő, a piac igényei által előhívott valós logisztikai feladatok esetében is - úgy gondolkodtam, hogy az RTLS technológia lehet minden esetben a legjobb megoldás.

Rá kellett jönnöm, hogy mint minden technológiának – az RTLS -nek is vannak korlátjai, és mivel a technológia még magyarországi KKV viszonylatban alapvetően drágának, azaz magas költségű kezdő beruházásnak számít, - nem minden esetben lehet időben megtérülő is.

Ekkor kezdtem el érdeklődni, kutatni az iránt, - hogy vajon milyenek a nemzetközi tapasztalatok a témában, melyek azok a kifejezett logisztikai területek vagy logisztikai kihívások, ahol az RTLS technológia bevezetésének időszerűsége és szükségessége „egyeduralmat” jelenthet az iparágban és ezzel egyidőben az a kérdés is foglalkoztat, hogy melyek azok a területek, kihívások, - ahol igazából nem jöhet szóba - a hatékonyságot vagy megtérülést szem előtt tartva.

Valós idejű logisztikai adatok használatával a kinyerhető és rendelkezésre álló információk, valamint az erre alapozott és jól átgondolt funkcionalitás óriási értéket nyújthat egy korszerű és magasan innovatív vállalat számára; - akár a vállalkozás működésének és logisztikai jellegű folyamatainak fokozásában, - vagy éppen annak egyszerűsítése érdekében is. Korszerűbb és hatékonyabb logisztikai folyamatok azok, melyek jobb teljesítményt, erőforrás-kihasználást és hiba korrekciót eredményeznek, valamint egyidejűleg jelentősen csökkentik az üzemeltetési költségeket, mint például egy azonosítási vagy nyomon követési feladat elvégzésének idejét, vagy a statikus merev adatazonosítási pontokat használó logisztikai rendszerek magasabb fokú tehetetlensége miatti többletráfordításokat.

A hétköznapi életben már minden ember zsebében ott lapulnak sokféle műholdas technológiát használó „GPS alapú” kültéri helymeghatározást használó alkalmazások. Ezek általában valós idejű pozíciós (geometriai) adatok felhasználásával tesznek lehetővé egyszerűbb, költségkímélőbb, gyorsabb, megbízhatóbb, - vagy éppen a közösségi információk erő előnyét is kihasználó - előnyösebb életfeltételeket felhasználóik számára. Ezen hétköznapi rendszerek működésével párhuzamba állítható, - de annál sokkal precízebb és robusztusabb valós idejű helymeghatározó rendszerek (RTLS, Real Time Location System) jelentek meg és indultak robbanásszerű fejlődésnek az elmúlt 10-12 évben a vállalat „4 falán belül”. Ha egy pillantást vetünk az elmúlt időszakban ezzel a technológiával foglalkozó és létrejövő vállalatok számosságára a világban [1], látható hogy a 2014-es üzleti évtől kezdve indult robbanásszerű útjára a technológia.



1. ábra – 82 darab RTLS szállító vállalat jött létre az elmúlt 25 évben

2014 előtt a rádiós alapú RTLS technológia létezett, - de drága volt és főként nagy ipari vagy katonai környezetben használták. A chipok magas költsége és korlátozott elérhetősége akadályozta az elterjedését számos olyan ágazatban, amelyek precíz beltéri helymeghatározási szolgáltatásokat igényelnek. A 2014-es „korszak indító trigger” a Decawave nevű ír vállalatcsoport által kifejlesztett DW1000 [2] nevű chip piaci megjelenése volt: Ez volt az első, széles piacra tervezett chip, amely megfizethetőséget és a különféle gyártók saját eszközeibe történő integrációt kínált. Csökkentette a technológia pénzügyi, műszaki belépési korlátait és praktikussá tette a rádiós alapú RTLS-t a kisebb vállalkozások és a különféle alkalmazások számára. Lehetővé tette a vállalatok számára, hogy szintén rádiós RTLS rendszereket fejlesszenek ki és telepítsenek a pontos helymeghatározáshoz olyan területeken, mint a gyártás, a raktározás vagy a logisztika. A DW1000 chip által lefektetett alapok utat nyitottak a további fejlesztéseknek, beleértve az új szabványok kidolgozását és az UWB integrálását a normál fogyasztási eszközökbe is (például az okostelefonokba).

Ugyanakkor más összefüggések is megállapíthatók a historikus szakirodalom áttanulmányozása közben [1] ;

- A 2014–2016-os fellendülésben 17 darab új RTLS szállító indult a világpiacon mindössze 24 hónap alatt – ez az RTLS történetének legnagyobb koncentrált belépési hulláma. Ez az időszak az „innováció-első” jellegű piaci aktivitás csúcspontját jelentette, a helymeghatározó technológiák gyors kísérletezésével.
- Szállítói lemorzsolódás : A 2014–2016-os korszak szállítóinak jelentős része ma már nem működik vagy más vállalatcsoport „bekebelezte”. A túlélő szállítók általában azok, akik erős vertikális fókuszúak és jól kimutatható megtérüléssel rendelkeznek a valós telepítéseknél.
- Földrajzi koncentráció : Az összes szállító 82%-ának székhelye Európában vagy Észak-Amerikában található. Az ázsiai-csendes-óceáni térség – annak ellenére, hogy a globális gyártási kapacitás ~35%-át teszi ki – az RTLS gyártók mindössze 9%-ának ad otthont. Más régiók együttesen kevesebb mint 10%-ot reprezentálnak.

A 2014 utáni időszakot tehát méltán nevezhetjük az RTLS technológia progresszív szakaszának, a 2014-2018 időszakban - ahány gyártó majdnem annyi verziójú - működési mód jellemezte a rádiós alapú RTLS rendszereket. Ebben az időszakban minden gyártó igyekezett a saját termékét és megoldását propagálni és a leghatékonyabbnak hirdetni.

2018-ban fogalmazódott meg először, - 13 RTLS gyártó részvételével, hogy egységes szabványosított mederbe kellene terelni a pozíciós adatok kezelését és hozzáférhetőségét a különféle rendszerekben. A csatlakozott gyártók megalapították az OMLOX [3] nevű szervezetet, ahol egységesen deklarálták a szabványos OMLOX kimenetet, amely szabványos hozzáférést ígért minden RTLS-t használó felhasználónak. 2020 februárjában az OMLOX csapata egy virtuális Go-Live eseményen az alapító tagok körülbelül 60 partnerükkel közösen bemutatnak egy szabványos adathozzáférhetőséget az ipari helymeghatározási technológiák számára. Az első nyílt helymeghatározási szabvány lehetővé teszi az összes meglévő technológia, például az UWB, BLE, RFID, 5G vagy GPS integrálását, és egységes interfészen keresztül biztosítja a helymeghatározási adatokat.

2025-ben már az „OMLOX 8 Ready piktogram” certifikáció jelzi a különböző RTLS szállító termékein a szabványosított kinyerhető pozíció adatok meglétét és kinyerhetőségét.

Ha ránézünk a Gartner „2024 Market Guide for Indoor Location Services” szokásos éves összefoglaló dokumentumába (fizetős szolgáltatás, [4]), akkor objektív és széles spektrumú (gazdasági, kereskedelmi, technikai, innovációs, stb.) összegyűjtött adatok alapján összeállított „magic quadrant”-ot láthatunk a piac mára (2024-re) fennmaradt és vezető RTLS szállító vállalatairól, melyek releváns szolgáltatásokat kínálnak;



2. ábra - Gartner® Magic Quadrant™ for Indoor Location Services

A megjelenített vállalatok közül a ZEBRA, HID Global és UBISENSE vállalatok termékeivel volt már eddigi karrierem során szerencsém dolgozni, mindhárom vállalatról elmondhatóak az előzőekben leírt megállapítások és olyan innovatív technológiákkal rendelkeznek, melyeket a „Magic Quadrant” további szereplői gyakorlatilag inkább követnek.

Röviden összefoglalva azt mondhatom, hogy piacvezető és kimagasló termékek és rendszerek használata és ismerete mellett, az RTLS technológia egy abszolút felívelő, dinamikus fejlődő, - viszont az alkalmazáson még kételkedő és gondolkodó vállaltok életében mégis még úttörő korszakában lévő technológiával sikerült munkám során olyan egyedi tapasztalatokra és ismeretekre szert tennem, amely megalapozza jelen dolgozat megírásának jelentőségét és aktualitását. Magyarországon belül pár tucat bevezetés reprezentálja 2025-ben az RTLS piacot, amely véleményem szerint óriási fellendülés előtt áll. Jómagam és pár tucat szakember azon dolgozunk hazánkban, hogy ezt a technológiát megismertessük és érthetővé tegyük a logisztikai szolgáltatók és más gyártó cégek szakemberei számára. Bízom benne, hogy jelen dolgozat egy számottevő lépés lehet annak érdekében, hogy ezt a személyes kitűzött célt elérjem.

1.2 A tématerület vizsgálatának gazdasági és tudományos aktualitása

Az említett technológiai forradalom figyelembevételével kutatásom során egyrészt arra fókuszálok, hogy a tudomány milyen segítséget tud adni annak érdekében, hogy hosszú távon, gazdasági szempontokra alapozva fenntartható legyen az RTLS technológia használata, másrészt keresem azokat a sarokpontokat, melyek alapján eldönthető, hogy melyek azok a területek, ahol gazdasági vagy technológiai korlátokba ütközik a rendszer validációja, azaz nem hoz hatékonyság növelést vagy időbeli megtérülést a bevezetés.

A logisztikai iparágban a 2022 utáni években számos olyan globális és lokális tényező és kihívás változtatta meg a szektor működési modelljét, amelyről itt röviden szót kell ejtenem. A téma legfrissebb hazai releváns szakirodalmát átolvasva [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12] körvonalazódik néhány fontos és alapvető gondolat, megállapítás amely jelenleg is alakítja a logisztika, raktározás mindennapjait;

- továbbfejlesztett és valós információkra, adatokra alapozott és felgyorsított döntéshozatal igénye,
- gyorsabb és hatékonyabb információ -elosztás és -reagálás, hibakorrekció a versenyképesség fokozása érdekében,
- átláthatóságra, hatékonyabb működésre, digitalizációra való törekvések,
- működtetési, üzemeltetési költségek folyamatos csökkentése,
- energetikai szempontú folyamatoptimalizáció,
- reziliens működtetés, azaz a hirtelen felmerülő logisztikai, információ-áramlási vagy érték-áramlási jellegű változásokra (pozitív vagy negatív irányban egyaránt) adott gyors és hatékony reakciók - a technológia felhasználásával,
- egyre hektikusabb vevői igények, egyre differenciáltabb (individuális)vevőkiszolgálás fejlesztési igénye a logisztikai központokban,
- előrejelzések lehetősége mesterséges intelligenciával, - az összegyűjtött adatokon alapuló gépi tanulás segítségével,
- fenntarthatósági kritériumoknak megfelelő működés például a papíralapú nyomkövetés mellőzésével,
- covid és járványok hatásai például a hirtelen felfutó 2021-2023 üzleti évek utáni termelési volumenek visszatérése a 2017-2019-es volumenekhez,
- munkaerő és szakember hiány a versenyképes piac miatti erős fluktuáció következtében, ezzel egyidőben elbocsátási hullámok a lefutó rendelési állományok miatt,
- minőségi, - a digitalizációs törekvéseknek megfelelő készségekkel rendelkező - munkaerő cseréje, jó munkaerő megtartása,
- új munkaerő betanulási idejének jelentős csökkentése és automatizálása,
- multilingvális folyamatok leképzése, azaz nyelvfüggetlen folyamatok adaptációja,
- Európa egyre fokozódó versenyhátránya, ezzel egyidőben erős ázsiai irányú beszerzési stratégiák átgondolása,
- világgazdaság széttöredezése (Kína-USA-EU-India-BRICS), - melyből Magyarország akár nyertes is kijöhet (több cégnél most is aktív gyártás áttelepítés zajlik Nyugat-Európából),
- dinamikus árazási modellek (nyersanyagok esetében akár heti szintű) megjelenése,

A felsorolás persze nem teljes körű, de reprezentatívan mutatja, hogy olyan időszakban állnak szemben a sokféle irányból érkező és kiszámíthatatlan kihívásokkal a logisztikai szakemberek, amikor valamelyik állítás igaz, - és ennek az ellenkezője is igaz. Egyszerre kell megélniük felgyorsult és aztán hirtelen lelassuló érték- vagy anyagáramlási folyamatokat. Egyszerre kell tudniuk lekezelni a többletet (rendelést és igényt) és a hiányt (kapacitás és rendelés), egyszerre kell tudniuk többlet erőforrást használni, majd ugyanebben az időszakban kell megoldaniuk az egyik percről a másikra kialakuló termelésmegállás miatti új optimális erőforrás gazdálkodását.

Ebben a nehezen kezelhető időszakban biztos támpont az olyan technológiák adaptációja a logisztikai folyamatokban, - amelyek bizonyíthatóan és garantálhatóan 1 év vagy az alatti megtérüléssel számíthatóak, a felsorolt megállapítások és kihívások döntő részében olyan támogatást, gazdasági előnyt, kiszámíthatóságot nyújtanak a felhasználói számára melyek lefedik a felsorolt kihívások nagy részét és ezzel legalább középtávú (3-5 év) versenyelőnyt biztosítanak. [9], [5]

Az RTLS 2014 utáni széleskörű megjelenésével és erőteljes térnyerésével kimagasló és új távlatokat nyitó logisztikai fejlesztési lehetőségek nyíltak meg előttünk. Az ellátási lánc szereplőinek nyújtott RTLS rendszer bevezetési ajánlatok komoly, -legalább középtávú versenyelőnyt biztosíthatnak a korai alkalmazók számára.

Ahogy a bevezetőben is említettem, - jómagam is részt vettem olyan projektben, melyben 20%-os erőforrás megtakarítást értünk el autóipari Tier1 vállalat RTLS bevezetése után. Ez óriási megtakarítás, hiszen a beruházás megtérülése 8 hónap lett, azaz a 9. hónaptól már „pénzt” termelt a technológia. A felszabaduló erőforrások pedig átcsoportosíthatóvá váltak például a termeléshez, mellyel tulajdonképpen a technológia érkezése HR jellegű előnyöket is adott a vállalatvezetés kezébe. Ezek tisztán gazdasági és humán erőforrás gazdálkodásból származtatható előnyök, de rendszerezhetőek további járulékos hozzáadott értékek is;

- térben és időben valós adatokra támaszkodott a raktármenedzsment a korábbi egymástól távol lévő - diszkrét pontokra (térben és időben) alapozott adatok helyett.
- nem kellett a továbbiakban külön erőforrást allokálni arra, hogy adatbeviteli, információbeviteli feladatokkal foglalkozzon külön a munkaerő a raktárban, hiszen a tevékenységek valós idejű követésével ezek minden másodpercben követhetővé és visszakereshetővé váltak ; átláthatóságot és digitalizációt végeztünk el, működtetési, üzemeltetési költségek folyamatos csökkentése mellett,
- a papíralapú nyomkövetést teljesen mellőztük, éves szinten 2 tonna papír (címke) és az ehhez kapcsolódó teljes infrastruktúra (nyomtatók, fénymásolók, vonalkód olvasók, vonalkód nyomtatók stb.) vált feleslegessé a működtetéshez,
- új munkaerő betanulási idejének jelentős csökkentése és automatizálása valósult meg, hiszen a rendszer használata nem igényel betanítást; csak végezni az anyagmozgatási műveleteket és az üzleti logika háttérben észrevétlenül dolgozik,
- nyelvfüggetlen folyamatok adaptációja történt meg, nem szükséges a magyar nyelvtudás az RTLS rendszer használatához.

Úgy gondolom sikerült röviden érzékeltetnem, hogy a technológia bevezetése mennyire fedésben van az iparágra jellemző gazdasági aktualitásokkal ezen a rövid példán keresztül. Dolgozatomban a továbbiakban ezt a komplex szempontrendszert szem előtt tartva igyekszek rávilágítani azokra a kérdésekre, melyek kulcsfontosságúak lehetnek egy RTLS kiválasztása és adaptációja, valamint működtetése során.

Természetesen - mint minden új technológia bevezetésekor – az RTLS technológia bevezetésének hasznossága is minden esetben előzetesen átgondolandó, megvizsgálandó, hiszen nem minden logisztikai feladatban használható hatékonyan, eredményesen. Ebből a komplexitásból fakadóan pedig elengedhetetlen egy szofisztikált logisztikai, matematikai és informatikai modell, amelynek segítségével optimális működést tervezhetünk a vállalat számára. Az optimalizáción tehát azt értem, hogy törekedni kell a logisztikai egységben bevezetendő RTLS rendszer 1 év alatti megtérülésének elérésére, amely mind technikailag, munkaerő szempontjából és gazdaságos, fenntartható a vállalat esetében. Az ismertetett célok eléréséhez az önmagukban is bonyolult rendszerek összekapcsolása szükséges, ami meglátásom szerint az Ipar 4.0 módszertanával megvalósítható. [13], [14]

Ahhoz hogy le tudjuk határolni és megérteni az intralogisztikában vagy termelés kiszolgáló logisztikában alkalmazható technológiákat, szükséges megismerni az RTLS alapvető technológiai működését és működésének feltételrendszerét.

1.3 Komplex rendszer fejlesztésénél figyelmet érdemlő területek

Az RTLS-rendszerek fejlesztése és bevezetése komplex megközelítést igényel, amely figyelembe veszi a technológiai, gazdasági és jogszabályi környezetet egyaránt. A sikeres implementációhoz az alábbi tényezők kulcsfontosságúak:

1. **Szabályozási megfelelés:** Az EU és a hazai szabványok (pl. IEEE, CE, ETSI) betartása biztosítja a rendszerek kompatibilitását és jogszerű üzemeltetését.
2. **Energiahatékonyság:** A rendszerek üzemeltetése során az energiafogyasztás minimalizálása, valamint a fenntarthatósági szempontok érvényesítése elengedhetetlen.
3. **Környezeti és ergonómiai integráció:** A raktári infrastruktúrához illeszkedő rendszerkialakítás és a munkafolyamatok támogatása növeli az implementáció hatékonyságát.

Ezek a tényezők együttesen biztosítják, hogy az RTLS-technológia bevezetése ne csupán technológiai innovációt, hanem gazdaságilag is fenntartható fejlesztést jelentsen a logisztikai rendszerekben.

2. Szakirodalmi áttekintés és célkitűzés

A fejezet célja a kutatási témához kapcsolódó tudománytörténeti ismeretek és műszaki-technikai definíciók rendszerezett összegyűjtése. Emellett bemutatja azokat a kutatási irányokat, amelyek a nemzetközi és hazai szakirodalom tematikus feldolgozása révén kerültek feltárássra és elemzésre, ezzel megalapozva a vizsgált témakör objektív értékelését és a releváns következtetések levonását.

2.1 A szakirodalmi áttekintés módszertana

A szakirodalom áttekintésének elsődleges célja a vizsgált tématerülettel kapcsolatos releváns hazai és nemzetközi kutatási eredmények, valamint a kulcsfontosságú megállapítások rendszerezett bemutatása. E folyamat során különös hangsúlyt kapnak azok a bizonyítékok, amelyek az elemzés tárgyát képező tudományos eredmények alátámasztására vagy – adott esetben – cáfolatára alkalmasak.

Az EU Exact External Wiki honlapja [15] által megfogalmazott irányelvek alapján a szisztematikus szakirodalmi feldolgozás alapvető lépései a következők:

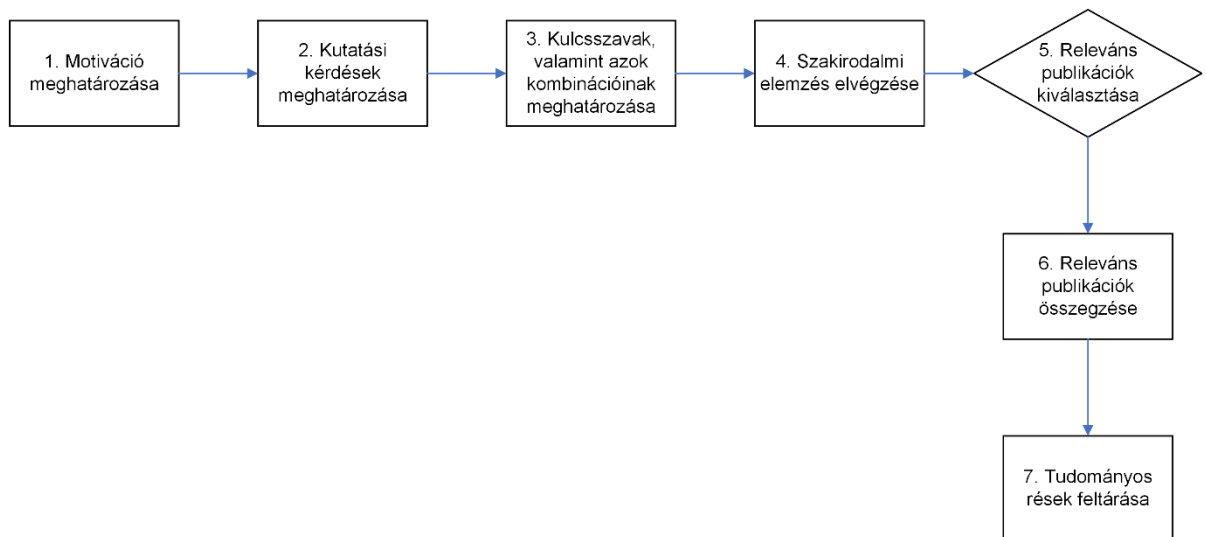
- a kutatási kérdések pontos és célorientált meghatározása,
- a megfelelő módszertani keret kidolgozása,
- szisztematikus keretrendszer alkalmazása a releváns szakirodalom azonosítására és kiválasztására,
- a bizonyítékok minőségi és hitelességi kritériumokon alapuló értelmezése és elemzése.

A bizonyítékok többféle forrásból származhatnak, ideértve az elektronikus és internetes adatbázisokat, a nyomtatott publikációkat, valamint az úgynevezett „szürke irodalmat” (pl. kiadatlan anyagok). A globális gazdasági, társadalmi és technológiai változások – különösen a digitalizáció – alapvetően átalakították az információszerzés folyamatát a tudományos kutatásokban. A legfrissebb adatokhoz való hozzáférés iránti igény a kutatókat a nyomtatott források (tankönyvek, monográfiák, tudományos folyóiratok) felől a digitális tartalmak felé terelte, amelyben kiemelt szerepet játszanak az indexált publikációkat tartalmazó egyetemeken és kutatási intézményekben működő dokumentumszerverek (repozitóriumok).

Mengist és szerzőtársai 2020-ban egy ilyen módszert mutatnak be a szisztematikus irodalmi áttekintés (SLR = systematic literature review) elvégzésére [16]. Az SLR-t egy olyan folyamatként értelmezik, amely lehetővé teszi az adott témában előre meghatározott alkalmassági kritériumoknak megfelelő releváns bizonyítékok összegyűjtését, és így a megfogalmazott kutatási kérdések megválaszolását [14]. Az SLR alkalmasságát a kutatott témakör mélyebb feltárássra *Kamarási és Mogyorósy* már 2015-ben megerősítették [17].

A vizsgált terület fejlődésének, valamint az aktuális tudományos rések, fejlesztési lehetőségek feltárássra tehát a szisztematikus irodalomkutatás módszerét (SLR) alkalmaztam [18].

A módszer lépései a következő ábrán tekinthetők meg;



3. ábra - Az SLR irodalomkutatás folyamata

A szisztematikus irodalomkutatás lépései:

1. Motiváció meghatározása

1. **Motiváció meghatározása:** A helymeghatározási technológiák robbanásszerű technológiai átalakuláson mentek keresztül, így az aktuális típusok, valamint azok integrációs lehetőségeinek feltárása, alkalmazása új - eddig nem ismert – előnyökkel járhat logisztikai alkalmazások tekintetében.

2. Kutatási kérdések meghatározása

2. **Kutatási kérdések definiálása:** A kutatási téma szakirodalmi elemzése során a következőkre keresem a választ:
 - Melyek azok az RTLS rendszerek, melyeket intralogisztikában, raktározásban alkalmaznak ?
 - Melyik rendszerváltozat(ok), technológiai változat(ok)) alkalmas(ak) az RTLS technológiák közül kifejezetten raktározási folyamatok fejlesztésére ?
 - Milyen lépésekben történik a folyamatfejlesztés raktárban, intralogisztikában RTLS technológia használata mellett ?
 - Milyen hatékonysági mutatószámok reprezentálják az RTLS technológia relevanciáját a technológiával támogatott raktárak esetében ?

3. Kulcsszavak, valamint azok kombinációinak meghatározása

3. **Kulcsszavak, valamint azok kombinációinak meghatározása:** Az előző pont alapján megállapítható, hogy a tematikus irodalomkutatás rendkívül komplex, hiszen négy kutatási tématerületen és három részterületen összesen 27 kulcsszó alapján tártam fel releváns publikációkat (1. táblázat). Az egyes kutatási területeken a hivatkozott publikációk időrendi sorrendben következnek, ami lehetővé teszi a téma evolúciójának és trendjeinek nyomon követését, az egyes megállapítások időtállóságán keresztül a publikáció relevanciájának megítélését.

	Kutatási téma / részterület	Kulcsszavak száma
1	RTLS rendszerek raktárban, intralogisztikában	6
2	Raktározási folyamatok fejlesztésére alkalmas RTLS technológiai szempontú kiválasztása	4
3	Folyamatfejlesztés raktárban, intralogisztikában RTLS technológia használatával	8
4	Hatékonysági mutatószámok RTLS technológiával támogatott raktárak esetében	9
	Mindösszesen :	27

1. táblázat - A tématerületek és a kulcsszavak áttekintése

Fontos feltételezéssel indulva majd nagy számú (120 darab) forrásanyag gyors elővizsgálata után megállapítottam, hogy

- a fellelhető források esetében minden esetben az 'RTLS' és 'Real Time Location System' címszavak keresése ugyanazt az eredményt hozza. A legtöbb szerző az absztraktban már definiálja a rövidítés jelentését, de a forrásanyagok mindegyikében használják legalább egyszer a hosszú és a rövidített formátumot.
- A kereséséből kizártam néhány fontos kulcsszavat is : **RTL**, Return To Launch Site (RTLS), **R.T.I** mert ezekre a kifejezésekre egészen más tudományterület anyagai jönnek elő.
- A témában kis számú (3 darab) magyar nyelvű forrásanyag található (és ezeknek egyúttal létezik az angol verziója is), ezért a kulcsszavakat kizárólag angol nyelven definiáltam.

Az ismertetett módszertan alapján a következő kutatási területekre és azokhoz tartozó **kulcsszavakra** terjedt ki az SLR:

- RTLS rendszerek raktárban, intralogisztikában ;
kulcsszavak : **'RTLS' + Logistic, Warehouse, Storage, Implementing, Developing, Adopting,**
- Raktározási folyamatok fejlesztésére alkalmas RTLS technológiai szempontú kiválasztása
kulcsszavak : **'RTLS' + Selection, Selection Method, Suitable for Warehouse, Fit for Warehouse**
- Folyamatfejlesztés lépései raktárban, intralogisztikában RTLS technológia használatával
kulcsszavak : **'RTLS' + Process Efficiency, Operational Efficiency, Development Process, Advantages, Simplifying Process, Time Saving, Saving Money, Resource Saving**
- Hatékonysági mutatószámok RTLS technológiával támogatott raktárak esetében
kulcsszavak : **'RTLS' + Material Flow, Value Stream, Efficiency Indicators, KPI, ROI, TCO, CAPEX, OPEX, Dashboard**

4. **Szakirodalmi elemzés elvégzése:** A kulcsszavakra történő idősoros keresés céljából több lehetőséget is megvizsgáltam ;

A **JSTOR** nevű repozitóriumot célszerűnek tartottam a kereséshez és a keresést a következőképpen végeztem el:

- Vizsgált időszak 2000-2025,
- Összes content (tartalom), összes tudományág, összes nyelv
- Kereső kulcsszó : 'RTLS' - NOT 'RTL'

A **JSTOR** **356 darab** találatot adott ki összesen, de a teljes találati eredmény absztraktjainak gyors átnézése után rájöttem, hogy nem releváns tartalmakat kaptam eredményhalmaznak, azaz a **JSTOR** nem adott ki értékelhető eredményt 'RTLS' kulcsszó alatt.

A **Web of Science**-ben csak szerzőkre illetve intézményekre lehet keresni, a kulcsszavaskeresés csak fizetett csomagban elérhető funkció, ezért ezt nem használtam.

További találatok érhetők el az **ieeexplore.ieee.org** oldalon, azonban sajnos itt is éves díj befizetése ellenében lehet az anyagokba betekintést kapni. Mindenesetre néhány fontosabb itt talált forrásanyag segített az SLR módszertanban tovább kutatni [19].

A **Scopus**-ban intézményi affiliációval lehet keresni (University of Miskolc). A legfőbb érv, amely a kiválasztás mellett szerepelt a nemzetközi tudományos közösségben való elfogadottsága, valamint az, hogy szinte minden minőségi tudományos folyóirat **Scopus** által indexelt, amely széleskörű vizsgálatot tett lehetővé. Az adatbázisok nyújtotta keresési funkciók alkalmazásával a cikkek címét, absztraktját és kulcsszavait egyszerre vizsgálva a kulcsszavas keresés látványos és felhasználóbarát eredményfeldolgozással párosul, az eredményeket a későbbiekben ismertetem (kutatási kérdésenként), illetve a SLR.xlsx állományban található. Az 'RTLS' kulcsszóra, további feltételek megadása nélkül **918 darab** találatot kaptam a **Scopusban**. A 4 darab kutatási irányra vonatkozó találatokat tovább szűkítettem a következő statisztikai kiértékelésekben (4) szereplő szűrőfeltételek és az egyes tudomány területi találatok (pl. biológia, sebészet stb.) kizárásával.

Megvizsgáltam még a **ResearchGate** nevű oldal keresőmotorját is, azonban az első 10 találati oldalon (100 találat) teljes átfedést tapasztaltam a **Scopus** találataival.

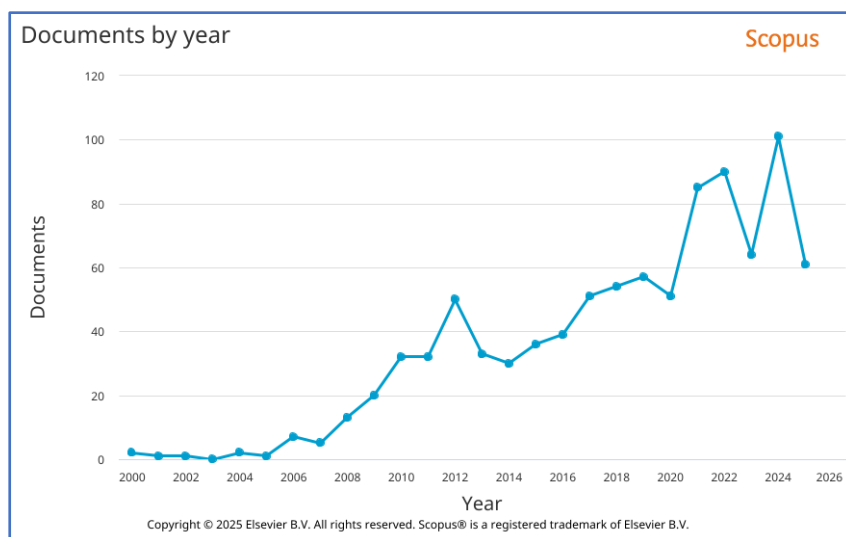
További releváns tartalmak érhetők el az **RTLS szállító vállalatok** saját weboldalain vagy saját mikroblogjain is, nagy számú esettanulmány segíti a szélesebb perspektívát a kutatásban. A kulcsszavakat AND, illetve OR logikai operátorokkal kapcsoltam össze a következő dokumentációnak megfelelően.

Statisztikai kiértékelés 1. kutatási téma : RTLS rendszerek raktárban, intralogisztikában

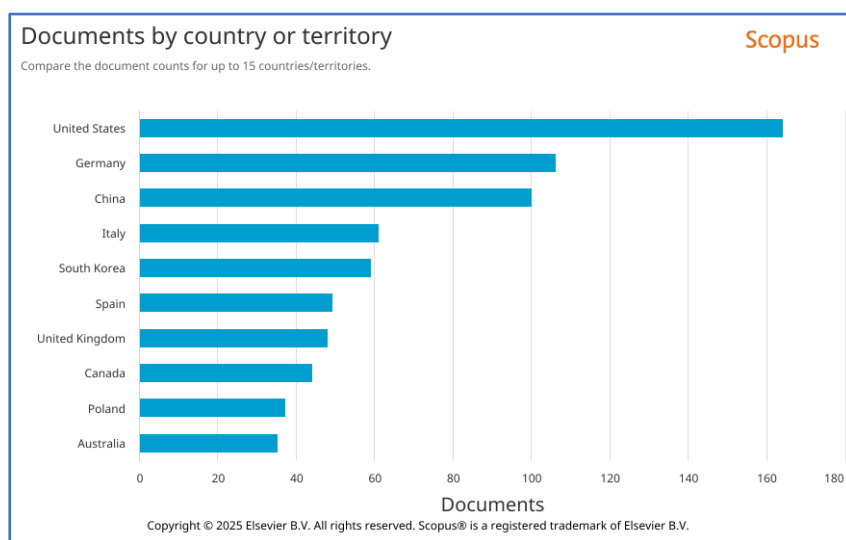
Kulcsszavak : 'RTLS' + Logistic, Warehouse, Storage, Implementing, Developing, Adopting

Keresés : (ALL (RTLS) AND ALL (Warehouse) OR ALL (Logistic) OR ALL (Storage) OR ALL (implementing) OR ALL (Developing) OR ALL (Adopting)) AND PUBYEAR > 1999 AND PUBYEAR < 2026

Összes találat száma : **918 darab**



4. ábra - Keresési találatok száma (2000-2025) - RTLS rendszerek raktárban, intralogisztikában



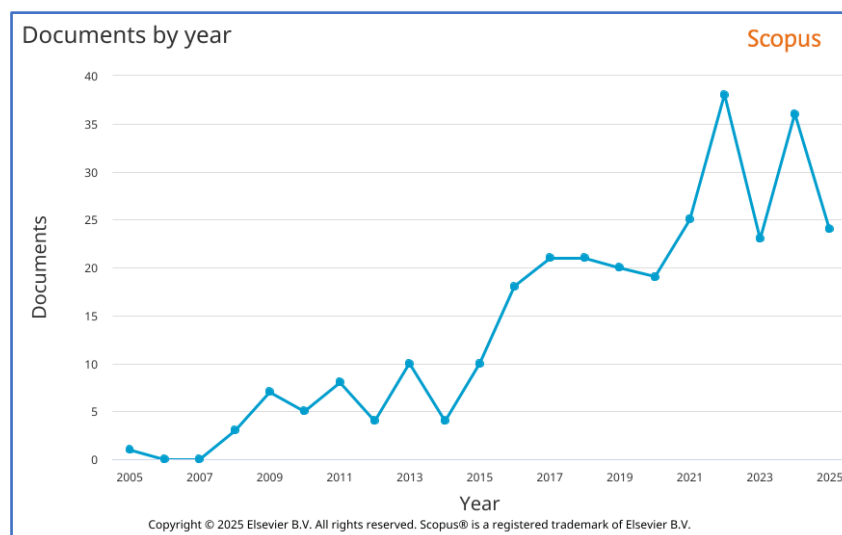
5. ábra - Keresési találatok száma (2000-2025) - RTLS rendszerek raktárban, intralogisztikában

Statistikai kiértékelés 2. kutatási téma : Raktározási folyamatok fejlesztésére alkalmas RTLS technológiai szempontú kiválasztása

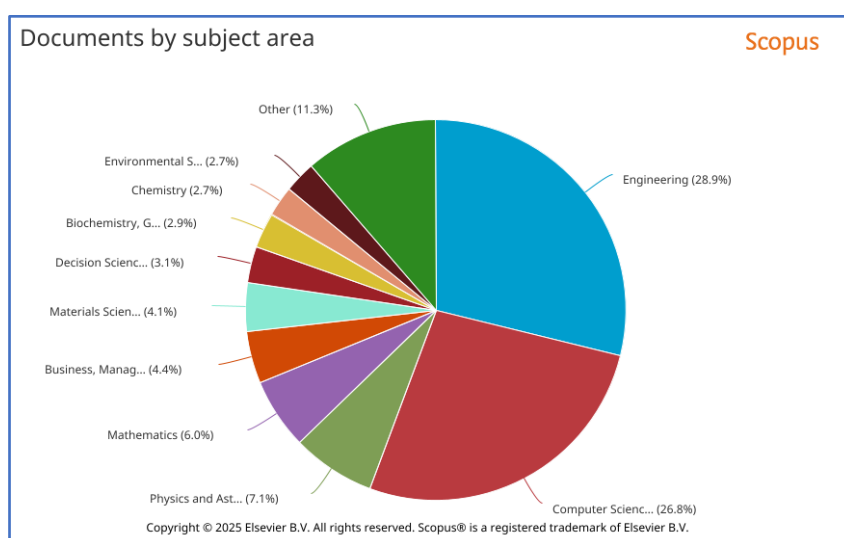
kulcsszavak : 'RTLS' + Selection, Selection Method, Suitable for Warehouse, Fit for Warehouse

keresés : (ALL (RTLS) AND ALL (Selection) OR ALL (Selection Method) OR ALL (Suitable for Warehouse) OR ALL (Fit for Warehouse)) AND PUBYEAR > 1999 AND PUBYEAR < 2026 AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENGI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "COMP") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "PHYS") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "MATH") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "BUSI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "DECI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENVI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENER"))

Összes találat száma : **297 darab**



6. ábra - Találatok száma (2000-2025) Raktározási folyamatok fejlesztésére alkalmas RTLS technológiai szempontú kiválasztása



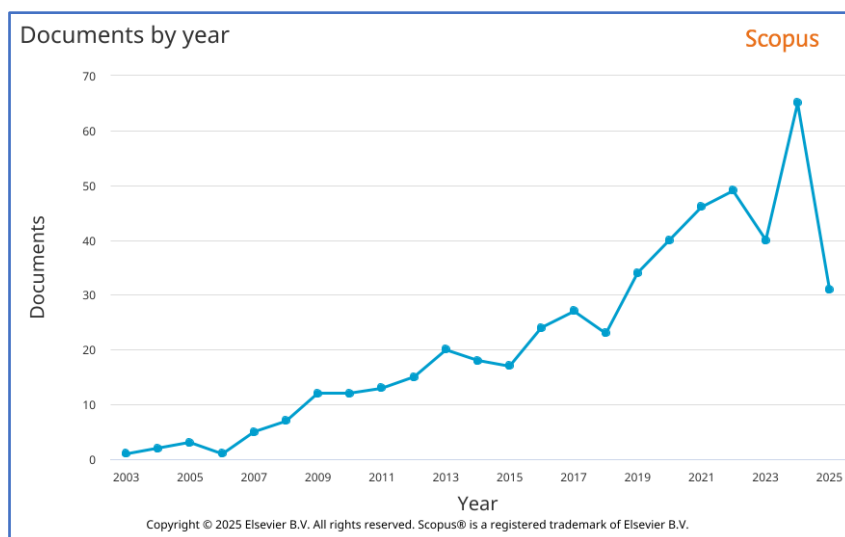
7. ábra - Találatok eloszlása (2000-2025) Raktározási folyamatok fejlesztésére alkalmas RTLS technológiai szempontú kiválasztása

Statistikai kiértékelés 3. kutatási téma : Folyamatfejlesztés raktárban, intralogisztikában RTLS technológia használatával

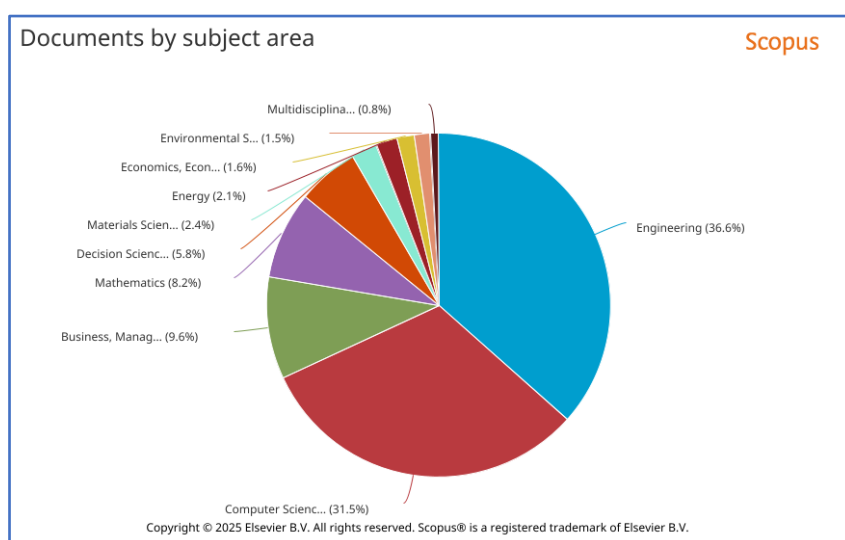
kulcsszavak : 'RTLS' + Process Efficiency, Operational Efficiency, Development Process, Advantages, Simplifying Process, Time Saving, Saving Money, Resource Saving

keresés : (ALL (RTLS) AND ALL (Process Efficiency) OR ALL (Operational Efficiency) OR ALL (Development Process) OR ALL (Advantages) OR ALL (Simplifying Process) OR ALL (Time Saving) OR ALL (Saving Money) OR ALL (Resource Saving)) AND PUBYEAR > 1999 AND PUBYEAR < 2026 AND (EXCLUDE (SUBJAREA , "HEAL") OR EXCLUDE (SUBJAREA , "AGRI") OR EXCLUDE (SUBJAREA , "NURS") OR EXCLUDE (SUBJAREA , "ARTS") OR EXCLUDE (SUBJAREA , "PSYC") OR EXCLUDE (SUBJAREA , "IMMU") OR EXCLUDE (SUBJAREA , "CENG") OR EXCLUDE (SUBJAREA , "CHEM") OR EXCLUDE (SUBJAREA , "BIOC") OR EXCLUDE (SUBJAREA , "MEDI") OR EXCLUDE (SUBJAREA , "PHYS") OR EXCLUDE (SUBJAREA , "SOCI") OR EXCLUDE (SUBJAREA , "EART"))

Találatok száma : **505 darab**



8. ábra - Találatok eloszlása (2000-2025) Folyamatfejlesztés raktárban, intralogisztikában RTLS technológia használatával



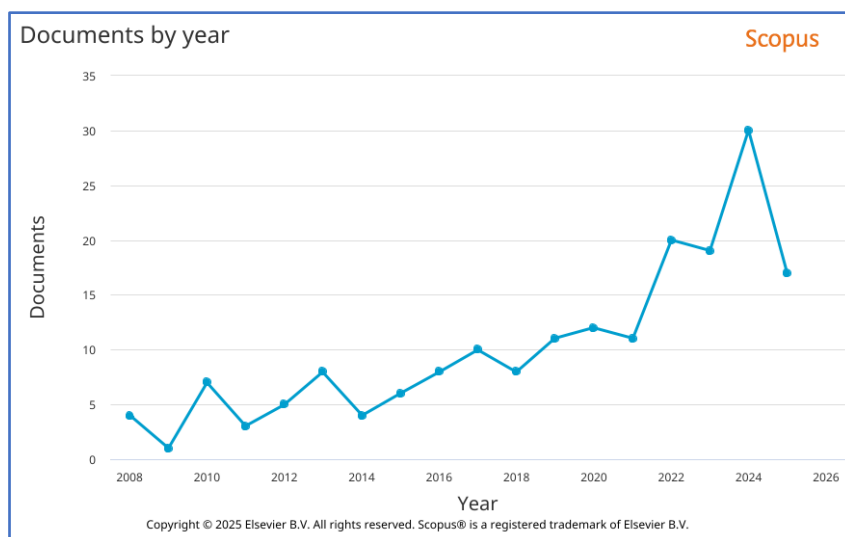
9. ábra - Találatok eloszlása (2000-2025) Folyamatfejlesztés raktárban, intralogisztikában RTLS technológia használatával

Statistikai kiértékelés 4. kutatási téma : Hatékonysági mutatószámok RTLS technológiával támogatott raktárak esetében

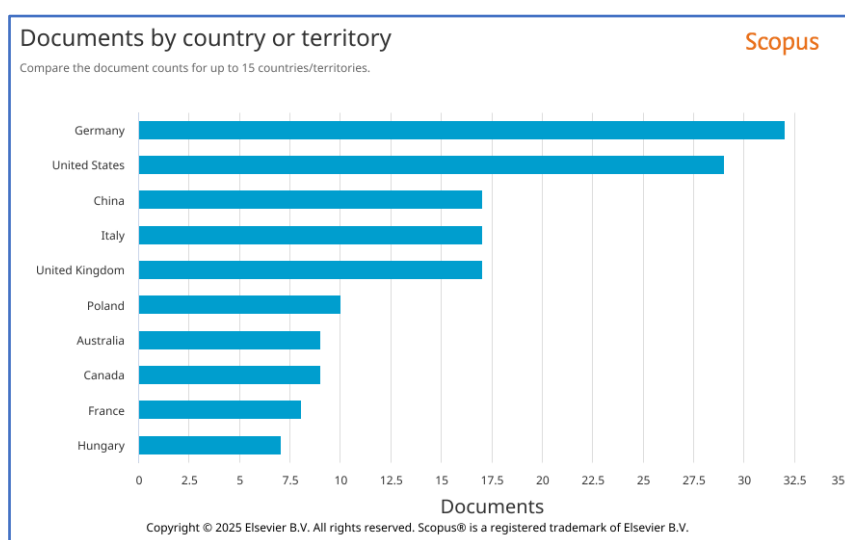
kulcsszavak : 'RTLS' + Material Flow, Value Stream, Efficiency Indicators, KPI, ROI, TCO, CAPEX, OPEX, Dashboard

keresés : (ALL (RTLS) AND ALL (Material Flow) OR ALL (Value Stream) OR ALL (Efficiency Indicators) OR ALL (kpi) OR ALL (roi) OR ALL (tco) OR ALL (capex) OR ALL (opex) OR ALL (dashboard)) AND PUBYEAR > 2007 AND PUBYEAR < 2026 AND (EXCLUDE (SUBJAREA , "CHEM") OR EXCLUDE (SUBJAREA , "CENG") OR EXCLUDE (SUBJAREA , "BIOC") OR EXCLUDE (SUBJAREA , "PHYS") OR EXCLUDE (SUBJAREA , "MEDI"))

Találatok száma : **184 darab**



10. ábra - Találatok eloszlása (2000-2025) Hatékonysági mutatószámok RTLS technológiával támogatott raktárak esetében



11. ábra - Találatok eloszlása (2000-2025) Hatékonysági mutatószámok RTLS technológiával támogatott raktárak esetében

5. Releváns publikációk kiválasztása

5. Releváns publikációk kiválasztása: Az SLR kutatási elemzés folyamatának negyedik pontja tehát tartalmazta az előzőekben meghatározott kutatási területekre kiterjedő tematikus irodalomkutatás során feltárt publikációkból megismerhető statisztikákat.

Az idősoros statisztikákból sok információ vonható le, néhányat kiemelek;

- ahogy a bevezetőben is megfogalmaztam az RTLS rendszerek ugrásszerű piaci robbanása 2014-től indukálta igazán a kutatásokat, **a 2020-as években fogantak a tudományos anyagok döntő többsége,**
- az RTLS dokumentációk legjellemzőbb földrajzi **forrásai** valóban **Európa és Észak-Amerika,**
- számosságát tekintve nem túl gazdag a téma irodalma. Ritkán lehet 1000-es darabszám alatti dokumentációt találni más tudományterületek kereséseiből.

- magyar szerzőktől származó releváns irodalmak is feltűnnek, melyeket elemzek a következő fejezetben is.

A szűrések eredményeként kapott publikációk absztraktjainak áttekintését **követően 54 darab publikáció került kiválasztásra**, valamint részleteiben tanulmányozásra.

6. Releváns publikációk összegzése

6. Vizsgált publikációk összegzése: A vizsgált publikációk tartalmi áttekintése alapján három terület összegzésére került sor ;

- **Első szakirodalmi vizsgálati terület :** Olyan RTLS rendszerek összegyűjtése, melyek alkalmazhatóak raktárban vagy intralogisztikában általánosan. A szóba jöhető rendszerek közül olyan technológiák kiválasztása melyek alkalmasak logisztikai folyamatok fejlesztésére, azaz logisztikai hatékonyság növelésére.
- **Második szakirodalmi vizsgálati terület :** hogyan, milyen lépésekben történhet a logisztikai folyamatfejlesztés RTLS technológia használata mellett,
- **Harmadik szakirodalmi terület :** olyan hatékonysági mutatószámok összegyűjtése, amik leginkább reprezentálják az RTLS technológia relevanciáját a technológiával támogatott raktárak esetében.

2.2 Az első szakirodalmi vizsgálati terület összegzése.

Raktárban, intralogisztikában alkalmazható RTLS rendszerek összegyűjtése a szakirodalomból.

A korábban leválogatott 54 darab publikációból **23 darab** ehhez a találati halmazhoz tartozik, ezt az alfejezetet szántam a kiválasztott szakirodalom részletes feldolgozásához.

Előzetesen és összefoglalóan néhány megállapítást teszek az irodalmi feldolgozás során tapasztaltakról;

- ebben a kutatási témában összegyűjtött anyagok nagy része (**16 darab**) kifejezetten az általános geometriai helymeghatározási probléma matematikai és fizikai alapjaival (mérésével) foglalkozik. Az elméleti számítások a papíron jól működnek, azonban a valós fizikai világban sohasem határozható meg pontosan egy geometriai pont helyzete a térben. Mindig vannak mérést zavaró tényezők, amik miatt a nagy processzorsebességen működő számítási metódusokat (nanoszekundumonként számolt geometriai pozíciók) korrigálni szükséges. A rövid idő alatt számított pozíciók „ugrálnak” a térben nagyjából a keresett geometriai pont körül, ezért mindig szükség van valamilyen hipotézisen alapuló algoritmusra és / vagy szűrőkre, amelyek segítségével egyre jobban közelíthető a számított (vélt) pozíció a valódi geometriai pozícióhoz.
- A feldolgozásra került cikkekből **3 darab** foglalkozik kísérleti, egyetemi laborokban összeállított RTLS rendszerek hardveres felépítésével, működési metódusával és az elért eredményekkel. A cikkek döntő többsége részletes (matematikai megközelítésekkel) taglalja a felállított rendszer pontosságának finomhangolását, majd bizonyítja a finomhangolást helyességét.

- **2 darab** publikáció foglalkozik különféle AGV és AMR útvonal-követési (logisztikai) projektekkel, ahol az volt a feladat, hogy az AMR-t és AGV-t vezérlő WMS vagy FMS rendszerektől kapott pozícióadatokról független és objektív, - valamint ipar 4.0 szabványos digitális iker megalkotásához szükséges pozíció adatok álljanak rendelkezésre. A feladat megoldásához hívták elő az RTLS technológiát, amelyről bizonyításra és igazolására került, hogy stabil és megbízható historikus adattömeget biztosított a később feldolgozandó pozíció adatbázishoz.
- további **2 darab** publikáció foglalkozott a 2014-ben történt RTLS robbanásszerű felfutásának okairól, lehetséges jövőbeli felhasználási területeiről, hangsúlyosan megjelölve a logisztikai, termeléskiszolgálási és termelési területeket.

A leválogatott szakirodalom döntő része megalapozva vezet végig a valós idejű helymeghatározás elméleti hátterén. Azért is tartom fontosnak megismerni az elméleti hátteret, mert nagyban segíti a következő fejezetek megértését és az első hipotézisem is támaszkodik a valós idejű helymeghatározási elméleti alapjaira.

A helymeghatározás elméleti háttere.

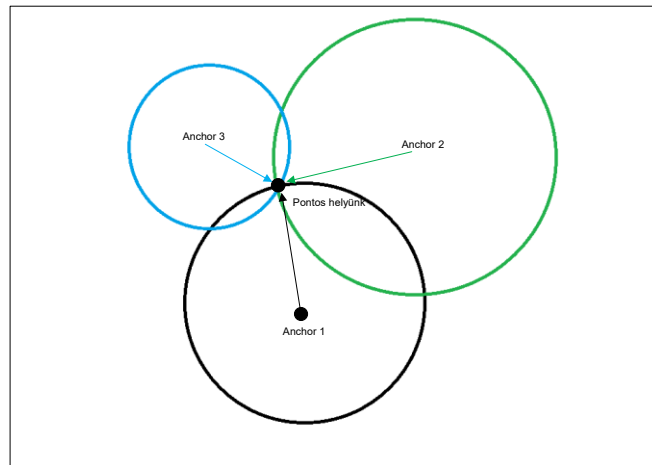
A helymeghatározás elméleti alapjainak „Bibliája”, *Zekavat és Buehrer (2019)* által kidolgozott kézikönyv, amely közérthetően leírja a helymeghatározás matematikai (geometriai) modelljéből származtatott, majd a fizika törvényeinek segítségével működtetett és a mérnökök által konstruált rendszer lényegét. [20] A helymeghatározás alappillérei az ún. referenciapontok. Csak fix referenciapontokhoz viszonyítva lehet meghatározni egy másik, mérendő aktuális pozíciót. Fix referenciapont például az univerzumban a sarkcsillag vagy más égitest, de a raktáron vagy csarnokon belüli („négy falon belüli”) referenciapont csak „elmozdíthatatlan” pont lehet. A raktárban általában tartógerendák, keresztgerendák szokták ezt a funkciót betölteni, melyek tehát „elmozdíthatatlanok” és állandó pozícióval rendelkeznek. Minden referenciapont közös jellemzője a mozdulatlanság, a mozdíthatatlanság - az állandó stabil geológiai helyzet.

Kössünk az előzőleg definiált referenciapontokhoz meghatározott hosszúságú kötelet, ajánlja *George Oguntala (2018)* egy összefoglaló tanulmányban [21]. Ekkor síkban egy pont köré adott hosszúságú (sugarú) kört, míg térben adott hosszúságú gömbfelületet tudunk a köté végével „felrajzolni” a fix referenciapont köré. A kapott alakzat a referenciaponttól mért, az adott távolságnak megfelelő lehetséges pontok halmazát adja, melyeket a referenciaponttal együtt „horgonynak” vagy az iparágban **Anchor**-nak nevezünk.

Három darab Anchor segítségével lehetséges egy **síkbeli kétdimenziós koordináta-rendszerben egy tetszőleges pont aktuális pozíciójának definiálása**, a háromdimenziós (térbeli) pozicionáláshoz azonban már 4 darab Anchor-ra van szükségünk. *George Oguntala (2018)* [21] anyagában részletesen kifejti trigonometriai egyenletekkel, hogyan lehet a koordinátákat számolni, ezt itt most nem részletezem, mert kívül esik a dolgozat témáján.

A pozicionálás leggyakrabban alkalmazott módszere tehát a **geometriai alapelveket** használja a helymeghatározáshoz. Több (síkban legalább 3 darab), - ismert helyzetű Anchor távolságának megméréseivel meg lehet határozni egy adott pont helyzetét. Ha meg tudunk valamilyen módszerrel mérni egy távolságot, akkor már ismertté válik, hogy egy megfelelő sugarú körön helyezkedik el a mérendő helyzet az Anchor körül (síkban). Ha három darab Anchorral végezzük el a távolságmérést, akkor **pontos helyzetünket a három kör**

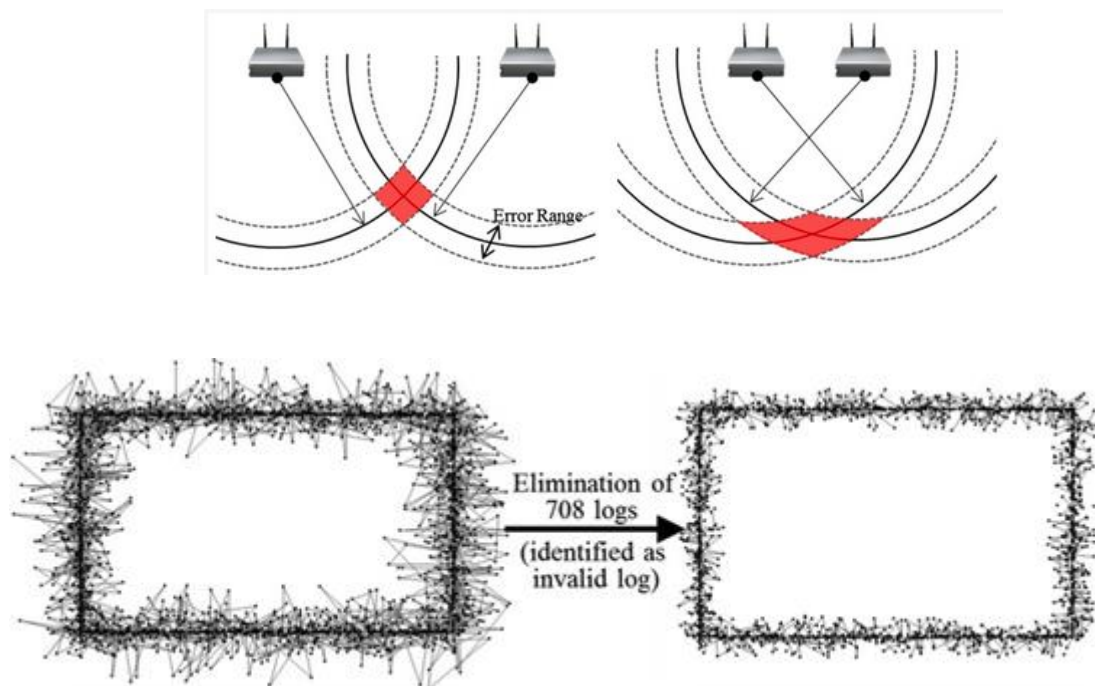
metszéspontja határozza meg. Ezt a módszert nevezzük háromszögelésnek (vagy „sokszögelésnek”, ha 3 darab vagy több Anchor használunk a mérésre).



12. ábra – Helymeghatározás síkban, 3 darab Anchor segítségével, ideális esetben

Ennek a közelítésnek a nehézsége abban rejlik, hogy a raktári környezetben a **technológiával támogatott távolságmérések** nem lesznek pontosak, mert nem az ideális „laboratóriumi körülmények között” mérünk. Egy raktárban a valósághoz közelebb álló távolságmérések során mindig lesz valamekkora zavaró jel (zaj) és emiatt a fenti körök nem pontosan fogják egy pontban metszeni egymást.

A metszéspont helyének meghatározásában *Hyunsoo Kim (2018)* leírása szerint különböző algoritmusok és filterek segítségével lehet igénybe, amelyek segítségével leginkább megközelíthető az a pont, amely a valóságban a tényleges pozíció. [22] A filterek használatával külön szakirodalom foglalkozik, - ez is kívül esik a dolgozat fókuszán.



13. ábra - Nem pontos távolságmérés esetében algoritmus vagy szűrő segítségével becsülhető meg a pont pozíciója

Hogyan mérhetőek meg gyorsan és hatékonyan távolságok egy raktári környezetben?
Küpper-Janina-Herwig(2022) BMW alkalmazottak és egyben kutatók is részletesen leírják a módszer menetét és körülményeit [23];

Különböző alapanyagok, csomagolóanyagok, késztermékek, raktári anyagmozgató eszközök, mozgó emberek, raklapok, állványrendszerek gátolhatják, nehezítik a mérést. Vizuális vagy optikai elven működő mérőeszközök ezért nem jöhetnek szóba, hiszen a legtöbb pont esetében a fenti raktári objektumok „takarnák” a mérésnél használt tartományt. A méréshez legalább deciméteres (10-30cm) pontosságot szükséges elérni, hiszen egy raktáron belül szükséges és elégséges megkülönböztetnünk raklapokat vagy 80 cm szélességű tárolóhelyeket egymástól. Az életszerű működtetésben a 10-30 cm-től nagyobb pontosságra általában nincs szükség, *Küpper-Janina-Herwig(2022)* [23] fejtik ki részletesebben egy BMW gyár és az azt kiszolgáló logisztikai egység vonatkozásában.

Rádióhullámokat használhatók a távolságmérési kérdés megválaszolására. Az ötlet az, hogy rádióhullámokat indítva és elküldve egyik ponttól a másikhoz (az aktuális pozícióból az elérhető Anchorokig) lemérhető a „repülés ideje” (ToF = Time of Fly). A rádióhullámok fénysebességgel haladnak ($c = 299\,792\,458 \frac{\text{m}}{\text{s}}$), így egyszerűen összeszorozva a repülés idejét (TOF) ezzel a sebességgel, megkapható a kérdéses és megméréendő távolság;

$$s [\text{m}] = c * \text{TOF} = 299\,792\,458 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] * \text{TOF} [\text{s}] = \dots [\text{m}]$$

A rádióhullámok gyorsan haladnak, egyetlen nanoszekundum alatt - egy hullám csaknem 30 cm-t tesz meg. Tehát ha deciméteres pontosságú távolságmérés a cél a raktárban, akkor alkalmas lehet a rádióhullám erre, viszont nagyon pontosan kell mérni a repülési időt!

Tehát most már az a kérdés, hogyan mérhető meg „egy darab” rádióhullám repülési ideje a meghatározandó pozíciótól az Anchor kezdőpontjáig, azaz a referenciapontig ?

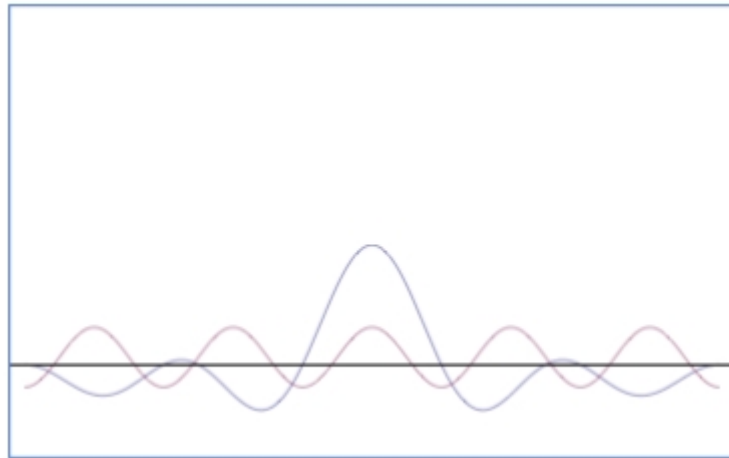
Természetesen az előző pontban vázolt modell ideális körülmények között működtethető, egy raktári környezetben viszont össze-vissza verődnek a rádióhullámok ; bizonyos anyagok (közegek) gyengítik ezeket, míg más anyagok szétszórják a térben ezeket a rádióhullámokat. Hogyan tehető mégis alkalmassá a mérés arra, hogy megmérhető legyen a repülési idő ?

A fizikából ismert *Heisenberg határozatlansági elve* [24]. A tétel kimondja, hogy lehetetlen egyszerre megismerni (mérni) egy jel impulzusát és helyzetét – még végtelenül pontos mérőműszer esetében sem. Minél pontosabb az egyik változó, annál pontatlanabb a másik. Vegyük például a szinuszoidot (szinuszgörbe alakú rádióhullámot, melyet a gyakorlatban használunk);

- ez egy jól ismert frekvenciájú, de nagyon rosszul meghatározható időzítésű jel,
- a szinuszoidnak nincs „kezdeté vagy vége”,

Ha azonban több érkező szinuszos jelet sikerül fogni (mérni) kismértékben eltérő frekvenciával (időzítéssel), akkor létrehozható egy „összegzett impulzus”, amelynek időzítése határozottabb, vagyis az impulzus csúcsa egyszerűbben vizsgálható már. Ez a jelenség látható a 14. ábrán, melyen szinuszoidokat szekvenciálisan összegzünk, annak érdekében hogy élesebb, kontúrosabb azaz mérhetőbb impulzust kapjunk. Az így transzformált jelet a

mérőműszerek diszkrét, határozott jelnek értelmezik - és ezzel kizárható a raktárban keletkező rádióhullámok visszaverődéseiből is torzulásból származó zaj.



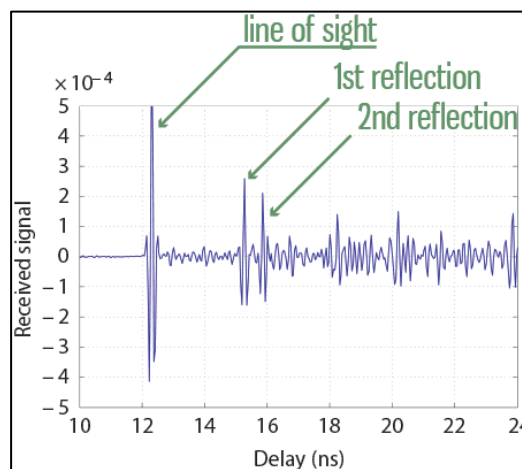
14. ábra - Rádiójelhez szekvenciálisan összegzett szinuszoidok eredője

A művelet kapcsán az előállítandó jelhez használt frekvenciatartományt, „ Δf ”-t - nevezzük el sávszélességnek. Heisenberg határozatlansági elvének alkalmazásával nagyjából behatárolható az impulzus „ Δt ” szélessége, a Δf sávszélesség alkalmazása mellett:

$$\Delta f * \Delta t \geq 1/4\pi$$

Az egyszerű képletből látható, hogy ha keskeny jól észlelhető és mérhető impulzust kívánatos használni a távolságmérésre - ami tehát a pontos időzítés megméréséhez szükséges-, akkor nagy rádiós sávszélességet szükséges használni a mérőrendszerben.

Az eddigi megállapítások alapján tehát olyan rádiófrekvenciás mérőrendszerre van szükség, amely a szokásosnál szélesebb sávszélességet használ. A *POZYX belga RTLS szállító cég aktuális weboldala* [25]tökéletes leírást találtam arról, hogy az UWB (Ultra Wide Band) szabványos technológiában a jelek sávszélessége legalább 500 MHz, aminek használatával 0,16 ns széles impulzusok előállíthatók az előző terminológia alapján. Ez az időzítési felbontás itt már olyan finom, hogy a vevőnél (Anchornál) képesek vagyunk megkülönböztetni az eredeti (méréndő) jelet (impulzust) annak többi reflexiójától (visszaverődéseitől).



15. ábra - UWB impulzusjel visszaverődései az Anchornál

Raktári környezetben minden mobil technológiát használó berendezés (kézi mobil adatgyűjtők, targonca terminálok, mobil nyomtatók, Pick by Voice eszközök stb.) optimális működtetéséhez ugyanarra van szükség: nagy sáv szélességre. A vezeték nélküli kommunikációs rendszerekben a nagyobb sáv szélesség gyorsabb fel/letöltést (azaz információ-átadást) jelent. Ha azonban minden mobil eszköz ugyanazon a frekvencián továbbítja a jeleket, akkor az összes jel zavarja egymást és semmilyen eszköz nem tudna értelmezhető fogadni. Emiatt a frekvenciaspektrum használata szigorú szabályozás alá került.

Miért lehetséges, hogy az UWB 500 MHz-es szabványos sáv szélességet kapott, miközben a többi más rádiós alapú rendszernek sokkal kevesebb kell beérnie (pl. a wifinek 20 MHz-el)?

A szabványos UWB rendszereknek deklaráltnak csak nagyon kis adóteljesítmény mellett lehet jeleket továbbítani (az energia spektrum sűrűségének $-41,3 \text{ dBm / MHz}$ alatt kell lennie a vonatkozó IEEE szabvány [26] szerint. A nagyon szigorú teljesítménykorlátozás azt is jelenti, hogy egyetlen impulzusok nem képesek messzire eljutni, azaz sűrűn (általában 15-25 méterenként) szükséges Anchorokat telepíteni a raktárban vagy intralogisztikai objektumban. A szabványos UWB rendszer további jellemzője a kis információértékű adattovábbítás, azaz a jeladó magáról általában 1 byte (8 bit) hosszúságú jelsorozatot küld, amely tovább segíti a rádiós jelek pontos szétválaszthatóságát az Anchoroknál.

Az UWB szabvány, amely lehetővé teszi a raktári távolságmérést

Az alacsony teljesítményű, vezeték nélküli személyes területi hálózatokra (WPAN, Wireless Personal Area Networks) vonatkozó IEEE 802.15.4 jelű szabvány számos, legalább 500 MHz széles UWB csatornát definiált. Ezt a szabvány a bevezetőben említett DecaWave D1000 chip megjelenése indukálta. Dieter Coppens (2022) [27] kitűnő és az egyik legátfogóbb anyagában összefoglalást készített az UWB összes szabványának evolúciójáról. Országtól függően ezek a csatornák valamelyike engedélyezett. Általában az alsó sávú csatornák (1–4) a legtöbb országban használható a frissítési sebesség bizonyos korlátozásai mellett (enyhítési technikák alkalmazásával). Az 5. csatornát a világ legnagyobb részén korlátozás nélkül elfogadták, Japán kivételével.

Csatorna	Közép frekvencia (MHz)	Sáv (MHz)	Sáv szélesség (MHz)
1	3494.4	3244.8 – 3744	499.2
2	3993.6	3774 – 4243.2	499.2
3	4492.8	4243.2 – 4742.4	499.2
4	3993.6	3328 – 4659.2	1331.2
5	6489.6	6240 – 6739.2	499.2
6	6988.8	6739.2 – 7238.4	499.2
7	6489.6	5980.3 – 6998.9	1081.6

16. ábra - IEEE 802.15.4 szabvány szerinti UWB csatornák kiosztása

2011-ben vezették be az IEEE 802.15.4–2011 verziót, amely az eredeti szabványok (2007) felülvizsgálataként adták ki annak érdekében, hogy mindent egyetlen dokumentumba (szabványba) foglaljanak, illetve erősen a DW1000 chip-re alapozták a szabványalkotók.

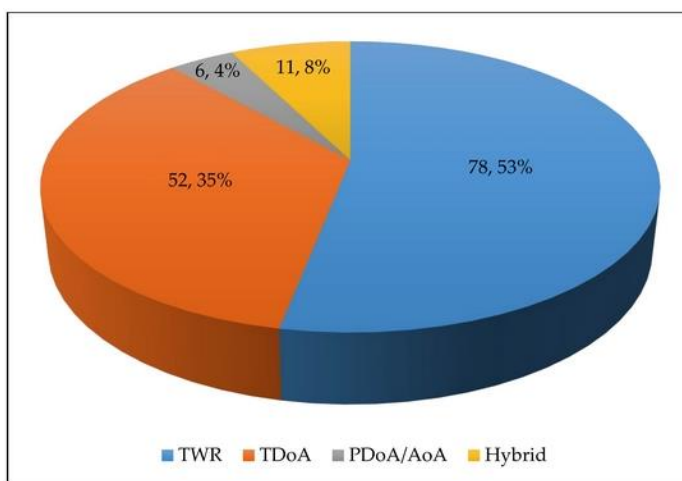
A szabvány három frekvenciasávot határoz meg, a szub-gigahertz, az alacsony és a magas sávokat, már összesen 16 darab rádiócsatornával. Négy adatsebességet is meghatároztak az UWB számára: 110 kbps, 850 kbps, 6,8 Mbps és 27 Mbps.

A jelenleg érvényes legfrissebb szabvány az IEEE 802.15.4z, a szabványok evolúcióját *Dieter Coppens (2022) [27]* munkája alapján az alábbi táblázat foglalja össze. Természetesen a szabványoknak vannak mélyebb értelmezési rétegei is, de ezek dolgozatom témáján kívül esnek már.

IEEE 802.15.4a - 2007	IEEE 802.15.4 - 2011	IEEE 802.15.4f - 2012	IEEE 802.15.4 - 2015	IEEE 802.15.4z - 2020
- Amendment that adds 1st standardization of IR-UWB 2ns pulse width - In unlicensed UWB spectrum - Support for precision ranging 0.11, 0.85, 6.81, or 27.24 Mb/s data rates - PRF of 4, 16 or 64 MHz - BPM+BPSK modulation	- The 'a' amendment was incorporated into the main body of the standard. - Popular DW1000 chip is based on this standard	- Amendment that adds additional LRP UWB PHY. - Transmits less but stronger pulses 6.28 GHz to 9.18 GHz spectrum - No precision ranging support 0.0312, 0.250 or 1 Mb/s data rates - PRF of 1 or 2 MHz - PPM or OOK modulation	- The 'f' amendment was incorporated into the main body of the standard - Two UWB PHY: - HRP (from 802.15.4-2011) - LRP (from 802.15.4f amendment)	- Amendment that enhances the UWB PHYs HRP <u>Security</u>: addition of STS <u>Accuracy</u>: (1) additional preamble and SFD codes, (2) higher PRFs: 128 and 256 MHz and (3) a new modulation: BPSK. LRP - Additional higher data rates: up to 10 Mb/s, higher PRF: 4 MHz - Additional modulations: PBFSK and PBFSK+PPM - Ranging support

17. ábra - UWB szabványok evolúciója (2007-2020)

Az UWB alapú logisztikai rendszerekben döntően **két típusú helymeghatározási kommunikációs protokoll terjedt el**. Mindkét protokoll rendelkezik előnyökkel és hátrányokkal (*Mohammed Faeik Ruzaij Al-Okby (2024), [28]*), de a támogatandó logisztikai folyamat jellegének megfelelően – a különböző felhasználási módokhoz választani lehet ezekből.



18. ábra - A világban elterjedt UWB kommunikációs protokollok

A két típus;

- a **TWR** – (Two Way Range) kétirányú távolságmérés,
- valamint a **TDoA** (Time Difference of Arrivals) – érkezés időbeli különbségén alapuló mérés.
- (Mohammed Faeik Ruzaij Al-Okby (2024), [28] munkája alapján 6,4%-ban jelen van még a szög alapú távolságmeghatározás is, de kis referenciája miatt a dolgozatban nem foglalkozom vele.

A protokollok könnyebb értelmezéséhez először definiálni szükséges az **RTLS tag** fogalmát ; Tag-nek nevezik azt az általában kis méretű (robustus tokozás nélkül nagyjából gyufásdoboz nagyságú elektronikus panel, akkumulátorral szerelve) elektronikus egységet, melynek pozícióját szeretnénk meghatározni a logisztikai rendszerben. Az RTLS Tag attól több mint az eddigi modellekben megismert „pont”, hogy;

- önálló elektromos ellátásra alkalmas akkumulátorral vagy más erőforrással rendelkezik (esetleg tölthető is),
- meghatározott UWB szabványú egyedi rádióhullámok kibocsájtására vagy kibocsájtására és fogadására is képes,
- valamilyen mechanikai tokozással rendelkezik és alkalmas a raktárban kezelt anyagokhoz, logisztikai eszközökhöz vagy emberekhez történő rögzítésre.

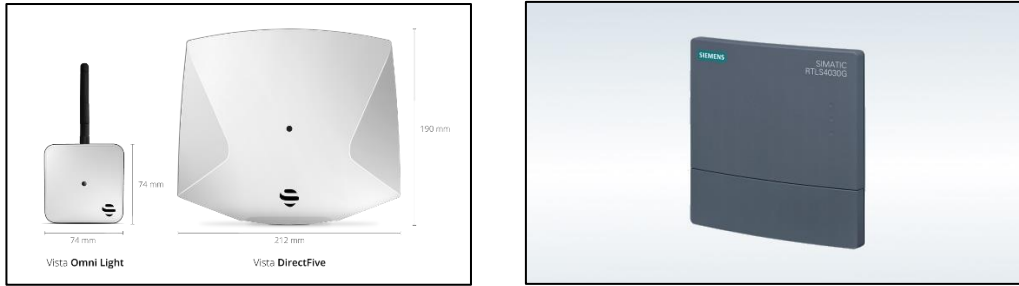


19. ábra - RTLS tagek [29], [30]

Az előzőekben definiált **Anchorok** (horgonyok) fizikai valóságának bemutatását is megteszem, melyek szintén létező elektronikus eszközök ;

- általában külső tápellátással üzemeltethetőek,
- meghatározott UWB szabványú egyedi rádióhullámok kibocsájtására vagy kibocsájtására és fogadására is alkalmasak,
- valamilyen mechanikai tokozással rendelkeznek és alkalmasak a raktárak referencia – pontjaiként történő rögzítéshez,
- rendelkeznek olyan elektronikai megoldással (csatlakozással és csatlakozási protokollal) melynek segítségével megoldott a hálózatban üzemelő Anchorok belső óráinak szinkronizációja (pl. Ethernet vagy wifi rádiós módszer segítségével)

A szakirodalom kifejezetten **RTLS Anchor**-oknak nevezi ezeket, megkülönböztetve a wifi és más szabványos technológiákban használt antennáktól , Access Point-októl.

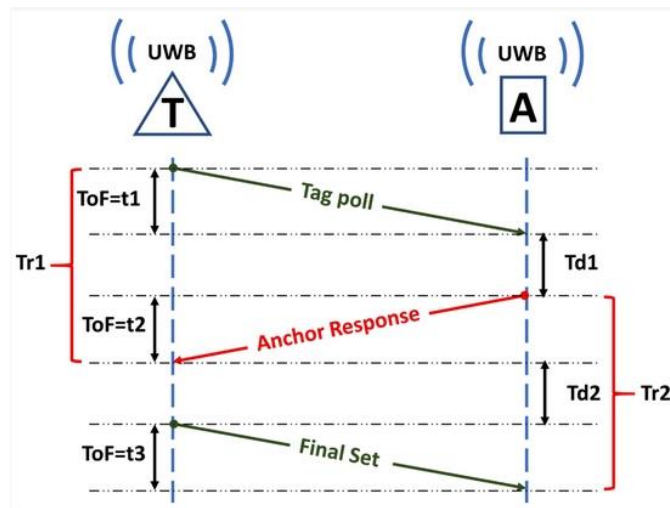


20. ábra - RTLS Anchor-ok [29], [30]

Kétirányú (TWR – Two Way Ranging) távolságmérés

A kétirányú távolságmérés a legelterjedtebb (Mohammed Faeik Ruzaij Al-Okby (2024), [28]) protokoll a pozícionálásban. TWR-ben az RTLS Tag és az Anchor közötti távolságot egy adatcsomag (rádiós jel, blink) oda-vissza küldésével számolják. Az RTLS Tag meg tudja állapítani az Anchor-tól való távolságot, a repülési idők megméréseével és összeadásával, - azaz összegzi hogy mennyi ideig tartott a küldött adatcsomag oda és visszatérése. A pozícionáláshoz a Tag megkezdi a kommunikációt egy deklarált és azonosított Anchorral és egyenként többször lefuttatja azt más Anchorokkal is (legalább 3 darabbal). Ha a Tag legalább három, ideális esetben négy Anchorral kommunikál és a már megismert háromszögeléssel kiszámolható a pontos helyzete.

A 21. ábrán látható egy TWR kommunikáció ; Egy (A) Anchor és egy (T) RTLS-Tag közötti távolság méréséhez három üzenetet kell cserélni. A Tag elindítja a TWR-t az első lekérdezési üzenetkéréssel, amely a t_1 repülési időt veszi igénybe, hogy elérje az Anchor-t. Az Anchornak a Td_1 időre (késleltetési időre) van szüksége a kérés rögzítéséhez és feldolgozásához, valamint a Tag-re adott válasz visszajátzásához. A címkéréstől a Tag Anchor válaszáig megérkezéséig eltelt teljes idő a kerekítési idő $Tr_1 = t_1 + Td_1 + t_2 = 2ToF + Td_1$. A Tag rögzíti a Tr_1 időt, és összeállítja és elküldi a végső üzenetet, beleértve a végső adatcsomagot is, amely tartalmazza az összes szükséges időadatot az Anchor által mért távolság kiszámításához. A második köridő Tr_2 a Anchor válaszáig kezdődik, amíg az Anchor meg nem kapja az utolsó csomagot $Tr_2 = t_2 + Td_2 + t_3 = 2ToF + Td_2$.



21. ábra - UWB szabványú (A) Anchor és (T) RTLS Tag közötti távolságmérés – TWR protokollal [28]

A 21. ábra alapján a következő egyenlettel számítható ki az UWB jel TOF-je ;

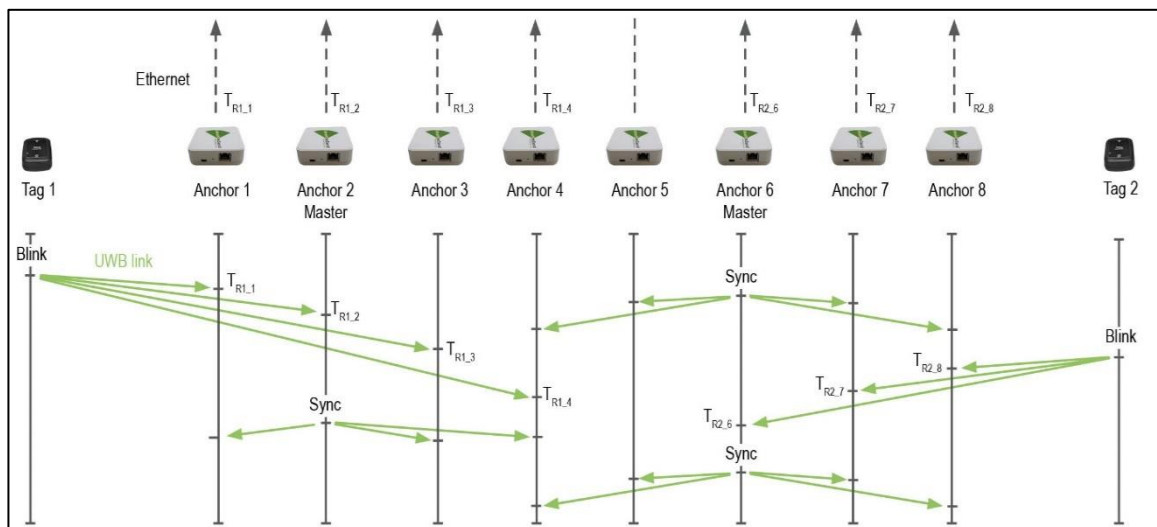
$$\text{Repülési idő : } TOF = ((Tr1 + Tr2) - (Td1 + Td2)) / 4$$

Érkezés időbeli különbségén alapuló (TDOA- Time Difference of Arrival) távolságmérés

TDOA üzemmódban az RTLS Tag-ek egy darab UWB rádiós impulzust (blinket) küldenek ütemezetten más Anchor-ok előzetes deklarált azonosítása nélkül. Mivel a Tag-nek csak egyetlen szabványos UWB jelet (1 byte) szükséges küldenie ebben az esetben, a helymeghatározás gyorsan és kis teljesítményfelvétel mellett történhet. Az általánosan használt „Aloha” protokoll segítségével a Tag-ek csak küldenek és soha nem fogadnak, ami **hihetetlenül alacsony energiafogyasztást eredményez**, az akkumulátoruk (500-1000 mAh) élettartama akár több év (1-5) is lehet .

Amikor az RTLS Tag TDOA üzemmódban információt küld magáról, pl: „ID_0011”, akkor a raktárban telepített minden „hatókörben lévő” Anchor fogadja ezt az információt. A nagysebességű Ethernet vonalakon / vezeték nélküli kapcsolaton összekapcsolt Anchor-ok pontosan küldik/megosztják az RTLS tagtól érkező rádiós impulzus fogadásának idejét a helymeghatározó szerver felé. A szerver gyors számítással pedig megállapítja az RTLS tag pontos helyét a már megismert háromszögelés algoritmus szerint.

A TDOA-ban használt RTLS Tag tehát soha nem „ismeri” a saját pozícióját a raktárban, hacsak nem küldi vissza ezt neki valamilyen másik külső rendszer. Ahhoz, hogy a TDoA megfelelően működhessen, legfontosabb hogy a raktárban telepített Anchor-oknak tehát azonos időfogalommal kell rendelkezniük. Ehhez belső óráikat pontosan szinkronizálni kell. Az Anchorok rendszeresen kommunikálnak egymással az UWB-n keresztül is, hogy szinkronizálni tudják belső óráikat. Abban az esetben ha túl sok Anchor óráját szükséges egyszerre szinkronizálni, a *SEWIO megoldása alapján* [29] lehetőség van csoportokra bontani őket, és egy-egy csoporton belül un. Master Anchor-okat létrehozni. Ezután a Master Anchorokat szükséges első körben idő-szinkronizálni. Célszerű minden esetben olyan Mastert választani, amelyik Anchor „rálát” direktben a többi, - csoporton belüli Anchorra, így az UWB hálózaton keresztül gyorsan megoldható a csoporton belüli időszinkronizáció.



22. ábra - TDoA távolságmérés és időszinkronizáció több Anchor csoport esetében [29]

A Master Anchor-ok használatával elérhető, hogy nagyobb lefedettségű logisztikai területen is alkalmazható legyen az RTLS. Az Anchorokat nagysebességű Ethernet hálózatba kötve egymással gyakorlatilag egy korlátlanul skálázható RTLS rendszer alakítható ki, akár sok ezer darab Anchorral és több ezer darab Tag-el. A TDoA technológiához alkalmas kis energiafogyasztású Tag-ek használatával a logisztikai területen széles alkalmazási lehetőségek állnak elő.

Benouakta (2024) [31] kigyűjtése alapján, ha megnézzük a legnagyobb UWB chipgyártók termékeit jellemző távolságmérési módszereket, látható hogy az első 7 a dolgozat előző két fejezetében kifejtett TWR és TDOA kommunikációt támogatja. Feltűnik még a táblázatban egy AOA (Angle of Arrival, Beérkezési szög alapján mérő) protokoll is, azonban ezt a protokollt autóiipari és mobiltelefonos alkalmazásokban használják; a logisztikai UWB helymeghatározásban nem jellemző (*Bartosz, Jachimczyk (2016, [32])*).

Manufacturer	UWB Chip	Freq Channel	Localization Technique
Qorvo	DW1000 [32]	1, 2, 3, 4, 5	Two-way ranging or TDoA
Qorvo	DW3000 [33]	5, 9	Two-way ranging or TDoA
Apple	U1 [34]	5, 9	Two-way ranging, TDoA, or AoA
NXP	SR150 [35]/SR040 [36]	5, 9	Two-way ranging, TDoA, or AoA
Sunway	SW UWB chip [37]	5, 9	Two-way ranging, TDoA, or AoA
STMicroelectronics	MOD1 [38]	1, 2, 3, 4	Two-way ranging or TDoA

23. ábra - Benouakta(2024) által összeállított legnagyobb UWB chipgyártók által támogatott protokollok

Nehézségek az UWB technológia raktári alkalmazásában

Az ultraszéles sáv használatának egyik nagy előnye a tisztán optikai jellegű logisztikai megoldásokhoz képest, hogy az alkalmazott rádióhullám könnyen behatolhat a raktárban használt tárgyakba. A legtöbb RTLS tagek egyedi azonosítójára (ID) és időbélyegek átvitelére támaszkodik az UWB-n keresztül és a pontosság és a hatótávolság vesztesége minimális még abban az esetben is, - ha a jel erősen akadályozott. Természetesen ennél a technológiánál is vannak azonban környezeti korlátok (*Zhang (2016) [33]*), melyeket vizsgálni kell logisztikai jellegű alkalmazása előtt.

A vezeték nélküli rádiótechnika esetében az akadályok rádióteljesítményre gyakorolt hatása nagyban függ az akadály anyagától. Általában a jelek részben visszaverődnek a visszaverődést okozó akadályokról, és részben behatolnak a tárgyba. Az anyag típusától függően az UWB jel csekély módosulással haladhat át a tárgyon, vagy sajnos teljesen el is nyelődhet benne. A legtöbb anyag két kategóriába osztható: szigetelők és vezetők. Mivel minden rádióhullám elektromágneses hullám, ezek az anyagkategóriák nagy hatással vannak az UWB jelekre.

Szigetelők ;

A fa, műanyagok, üveg, karton, szigetelőhabok, szövetek, szálak, téglák stb., mind szigetelők, és „átlátszóknak” tekintik a rádióhullámokat. Ezen anyagok kevésbé akadályozzák az UWB rádióhullámok terjedési útját, a hatásuk általában elhanyagolható a terjedésben.

Fémek ;

A fémek a leggyakoribb vezetők. Visszatükrözik a rádióhullámok nagy részét, és csak kis részük tud áttérjedni rajtuk. A kölcsönhatás következtében tehát;

- az UWB jel energiát veszít és kisebb hatótávolságot fog elérni,
- idő telhet el azzal, hogy megpróbál eljutni az Anchorhoz a fém(ke)n és mivel az RTLS a repülési idő kiszámításán alapul, ez csökkenti fogja a pontosságot.

Nem szabad ezt viszont ezt úgy értelmezni, hogy „bármilyen mennyiségű fém azonnal elrontja a jelet”. Az RTLS Tag megfelelő felhelyezésével a fémkonténer oldalán, a szállítási bárca közelében, vagy targonca tetején még mindig jól fog működni, esetleg néhány cm-es helyzetmeghatározási csökkenéssel. A vékony fémlemezeknek nagyobb hatása van a terjedésben, de akár áthatolhatóak is. A vízvezetékekkel, vastag vezetékekkel és fém tartószerkezetekkel rendelkező betonfalak viszont megbénítják az UWB jelet. Ha betakaró fémes tárgyak nagyon közel vannak az Anchor-hoz, kiszámíthatatlan módon megváltoztathatják a vétel tulajdonságait. **Emiatt mindig ajánlott legalább 20 cm távolságot tartani a fémektől, - az Anchor-ok telepítésekor.** (SEWIO telepítési útmutató [29])

Folyadékok ;

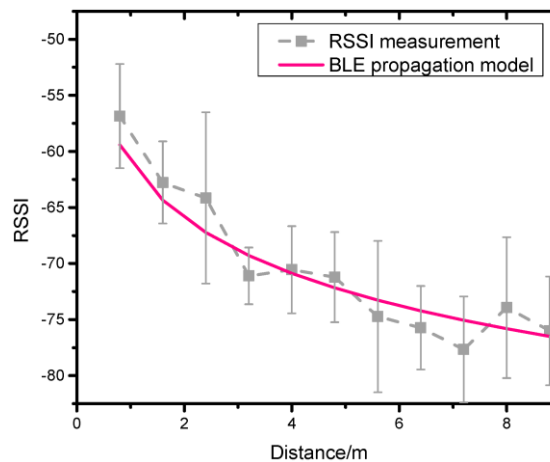
A fémekhez hasonlóan a folyadékok elnyelik a rádióhullámokat. Minél sósabb tartalmú a folyadék, annál jobban elnyeli a rádióhullámokat, ami szintén hatótávolság csökkenést eredményezhet. Továbbá a rádióhullámok folyadékokban lassabban haladnak (kb. 30%-al), ami szintén néhány centiméteres pontosságot csökkent. Leginkább a folyadék térfogatával függ össze hogy mekkora negatív hatása van a folyadéknak az UWB jel terjedésére vonatkozóan. Kifejezetten nagy térfogatú tartályok raktározása esetében akár kizárt is lehet az UWB technológia használata.

BLE – RSSI technológia, mint a helymeghatározás egyik „kakukktója”.

A szakirodalmat tovább elemezve és – egy bekezdés erejéig eltérve a korábbi bekezdések UWB RTLS vonalától , - több tanulmány foglalkozik a Bluetooth rádiós szabványon alapuló (BLE – Bluetooth Low Energy) helymeghatározással. *Astafiev (2019)* [34] , *Jiayu Chen (2019)* [35] két pont közötti távolság mérésére - rádióhullámok segítségével, - javasolja a rádiós vételi jelerősség változásának felhasználásán alapuló ún. RSSI (RSSI – Received Signal Strength Indication – Jelerősség változáson alapuló mérés) módszert. A mérés alapja, hogy minél messzebb található két pont egymástól, annál kisebb lesz a jelerősség közöttük a vételi oldalon. Ebből az RSS (Jelveszteség) értékből következtetni lehet a távolságra. Az alapötlet kitűnő, több ipari alkalmazás is megtalálható a vonatkozó irodalomban, *Ngoc Son Doung (2018)* [36], *Je-sung Jeon (2019)* [37], azonban a technológia mégsem terjedt el a logisztikai alkalmazásokban.

Sajnos a vett jelerősség a Bluetooth (2,4 GHz) rádióhullámok esetében is az összes reflexió (visszaverődések) eredőjének kombinációja lesz, és nem csak a mérendő távolsághoz tartozó „tisztá” impulzusé. A következő ábrán egy Bluetooth jel RSS-értékének változását mutatja kis (10 méteren belüli) diszkrét távolságok esetében. A hibasávok minden azonos távolságon belül azt mutatják, hogy az RSS értéke hogyan viselkedik az adott távolságon belül. Az látható az ábrán, hogy egy RSS értékhez tartozó BLE jel-hez több távolság is tartozhat, amely a gyakorlatban úgy jelentkezik, hogy a helymeghatározandó pont mérése 1-3 méteren belül „ugrál”. Nyilvánvaló, hogy az RSS értékének ilyen változása nagyon nagy, ami miatt az RSS alkalmatlan a pontos távolságmérésre vagy pozicionálásra. Úgy is megfogalmazható, hogy **a BLE – RSSI technológia inkább jelenlét érzékelésre (presence) alkalmazható a logisztikai**

alkalmazásokban. Ily módon egyrészt inkább az RFID technológiával hozható párhuzamba (diszkrét pontokban történő azonosítás), másrészt kifejezetten inkább az egészségügyben és más „irodai” jellegű folyamatokban, fogyasztói vagy kereskedelmi (vevői magatartás figyelés) használható technológiát takar.



24. ábra - BLE-RSSI technológia mérési pontatlansága [25], két mérendő pont távolsága között nagy amplitúdójú „ugrások” érzékelhetők

Korábban telepített raktári wifi rendszer alkalmas helymeghatározásra ?

A mai korszerű raktárak általános jellemzője a raktár magasabb pontjaira telepített, 2,4Ghz / 5 Ghz középfrekvenciát használó, - Access Pointok megfelelő hálózatából álló, - rádiós kiszolgáló hálózat (az iparágban raktári WIFI rendszernek nevezik).

Ezt a hálózatot használják a logisztikai folyamatokat, diszponálásokat kiszolgáló mobil adatgyűjtési eszközök, mint például kézi mobil adatgyűjtők, mobil nyomtatók vagy targoncaterminálok, - az informatikai infrastruktúrában elhelyezett WMS (Warehouse Management System) szerverek elérésére. Azonnal adja magát a kérdés, hogy ha már rendelkezésre áll ez a hálózat, akkor használhatjuk-e ezt a távolságok mérésére ? A szakirodalomban *Fredrik Kralsson (2015)* [38], *Wei Zhang (2018)* [39], *Moustafa Abbas (2019)* [40] több helyen találunk tanulmányokat erre vonatkozóan, a kérdéskörre az előző bekezdésben is utaltam, - a szükséges mérési pontossághoz szükséges sávszélesség meghatározásánál.

A wifi rendszerekben általánosan és a szabványaiban deklarált $\Delta f = 20$ MHz sávszélesség felhasználásával $\Delta t \geq 4$ ns-nél nagyobb impulzusszélességet kapunk az előző pontban szereplő képlet alapján.

Fénysebesség mint terjedési sebességgel számítva optimális esetben (visszaverődések nélkül) 1,2 méter „hosszú” impulzus számolható (tehát 1,2 méter pontosság a wifi alapú helymeghatározásban), amiről előljáróban kijelenthetem (a következő fejezetben részletesen kifejtem), hogy nem elég az intralogisztikában használatos mértékek, méretek megállapításához. További nehézség, hogy igazából nehéz is pontosan meghatározni egy ekkora méretű impulzus csúcsát, hovatovább a raktári környezetre jellemző visszaverődések még tovább nehezítik és pontatlanítják a mérést [25].

Összefoglalóan kijelenthetjük, hogy a raktárban korábban kiépített 2.4 GHz/ 5 GHz középfrekvenciájú és alacsony sávzélességű (20MHz) wifi hálózatok technológiai alapon csak nehézségek árán alkalmasak a rádióhullámok repülési idő mérésén alapuló távolságmérésére, azaz beltéri helymeghatározásra. A felmerült pontatlanságok ellensúlyozására különböző algoritmusokat, mesterséges intelligencia használatát javasolja a szakirodalom (Yu Feng (2014 [41], Noelia Hernández (2017) [42]), azonban ezek a megoldások nem univerzálisak, kifejezetten csak konkrét esetekben használhatóak.

Összefoglalóan tehát a szakirodalmi kutatás során - ebben a fejezetben - feltárára került a valós idejű helymeghatározás geometriára alapozott elméleti háttere, illetve a valós fizikai környezetben történő adaptációjának néhány fontos kérdése is. A valós fizikai körülmények között működtethető RTLS technológiák megismerésére, áttekintésére is sor került.

Azonban több fontos és lehetséges technológiáról nem találtam valós idejű helymeghatározásra utaló publikációt. Ilyen technológiák az RFID, az 5G és az optikai elven működtethető valós idejű helymeghatározási technológiák; a következő fejezetben ezen technológiákat is bevonom a vizsgálati körbe.

Raktározási folyamatok fejlesztésére alkalmas RTLS technológiai szempontú kiválasztása.

A szisztematikus irodalomkutatás során a leválogatott irodalmak, publikációkból **25 darab** került ebbe a vizsgálati körbe. Mivel ezt az arányt is döntő jelentőségűnek találtam a teljes szakirodalmi feldolgozás során, ezért ezt a témát is részleteiben külön, ebben a fejezetben foglalom össze.

Kifejezetten a korábban vázolt RTLS technológiák összehasonlító elemzéseit és kiválasztását keresve a szakirodalomban, nagyobb mennyiségű forrásanyagot sikerült átvizsgálnom, melyek releváns információkkal támogathatnak az optimális RTLS rendszerváltozat későbbi kiválasztásában. Ezek összefoglalásra készítettem egy táblázatot, melyben összegyűjtöttem azokat a szakirodalmakat, melyek kifejezetten az eltérő technológiák összehasonlításával foglalkoznak;

Szerzők	UWB	BLE	Wi-Fi	RFID	Technológiai áttekintés	Technológiai összehasonlítás
Jimenez A.R., Seco F., 2016 [43]	X					X
Gharat V., 2017 [44]	X			X		X
Yao L., 2017 [45]	X					X
Jimenez A.R., 2017 [46]	X					X
Astafiev A., 2019 [34]		X			X	
Karlsson F., 2015 [38]			X			X
Jun Qi., 2017 [47]			X		X	
Duong N. S., 2018 [36]		X			X	
Jeon J., 2015 [37]			X			X
Haryanto D., 2018 [48]			X			X
Woo S., 2011 [49]			X		X	
Abbas M., 2019 [40]			X		X	
Alarifi A., 2016 [50]	X				X	

Yoon Paul K., 2017 [51]	X			X		X
Witrisal Klaus, 2016 [52]	X				X	
Luo J., 2019 [53]			X			X
Sadowski S., Spachos P., 2019 [54]		X	X			X
Shamsollahi D., 2024 [55]	X					X
Thota R., 2024 [56]	X					X
Yuxuan Z., Manyi. W., 2022 [57]	X					X
Kim J., 2024 [58]	X					X
Kim D. and Jae-Young Pyun J., 2024 [59]	X					X
Ambrose A., et al., 2022 [60]	X					X
Krummenauer A., 2023 [61]	X					X
Al-Khaddour M., 2023 [62]	X					X

A táblázatban szereplő forrásanyagok áttanulmányozása után, - valamint a saját tapasztalataimat és referenciámat [63], [64], [65], [29], [25] is felhasználva, - a fejezetben korábban összefoglalt és részletesebben kifejtett tulajdonságok, sajátságok és nehézségekre alapozva **a szakirodalom bizonyos technológiákat kizár az RTLS alapú logisztikai felhasználásokban.** A szakirodalom feldolgozása alapján azt, hogy mely technológiák jöhetnek egyáltalán vizsgálati körbe, - először fontos és elengedhetetlen **lehatárolni, hogy pontosan milyen logisztikai, raktározási fizikai környezetben kívánjuk alkalmazni az RTLS-t.**

A szakirodalmi feldolgozásban összefoglalóan az alábbi összefüggéseket állapítottam meg;

- A leválogatott publikációk döntő többsége **egy kiragadott technológia előnyeit vizsgálja** adott feladatra vonatkozóan. Kifejezetten nagy számú (5) irodalmat találtam egy kiragadott helymeghatározási technológiára (pl. RFID) épülő megvalósított rendszer bemutatására, de ezek nagy többsége egészségügyben, humán erőforrás jelenlét érzékelésében, baleset megelőzésében érdekelt rendszerek. Nagyon ritkán lehet találni valós logisztikai probléma megoldására vonatkozó rendszer javaslatot az irodalomban.
- A publikációk egy részében található olyan bizonyítás, hogy egy-egy technológia nem alkalmas egy előre definiált logisztikai feladat magvalósítására. Tipikusan ilyen publikációk voltak az 5G alapú helymeghatározással foglalkozó anyagok, ahol bizonyítást nyert, hogy egyrészt a négy fal között és fémes környezetben technológiai problémák gátolják a szükséges pontosság elérését, másrészt maga az 5G technológia még nem elérhető privát (vállalati) felhasználásra. Logisztikai belső információkat pedig senki nem szeretne megosztani publikus 5G hálózatokon.
- Több RFID alkalmazási lehetőségével foglalkozó kutatás található az irodalomban, ahol bizonyítást nyert, hogy az RFID alapvetően csak korlátozott architektúrában (legalább 3 darab fix pozíciójú RFID olvasó telepítésével) lesz alkalmas helymeghatározásra. A klasszikus értelemben vett valós idejű helymeghatározás nem csak „jelenlét-érzékelést” és azonosítást jelent, hanem historikusan visszakövethető pozícióhalmazzal a tér minden deciméterben minimálisan. Az RFID technológia alapvetően diszkrét pontokban tud helymeghatározást adni, ami nem feltétlenül jelenti a „valós idejű” jelentéspárosítást is, hiszen két RFID kapun történt olvasás között nem tudjuk mi történik a követendő objektummal.
- Az RFID alapú helymeghatározás a jelenlegi fejlesztések kereszttüzében van, mivel az RFID címkék önköltsége – az egyre dinamikusan fejlődő tömeggyártásának

köszönhetően – drasztikusan leesett, már pár dollár cent alatt van. Ez egy hatalmas előny a többi helymeghatározó rendszerrel vívott versenyében, mert a többi rendszer mindegyikében költséges aktív RTLS tag-et szükséges használni. Logisztikai alkalmazásokban pedig általában sok ezer vagy tízezer RTLS tag-re lenne szükség, ami eleve akkora beruházási költség, hogy a projektek nem kerülne kidolgozásra.

- Több publikáció foglalkozik azzal a témakörrel, hogy - gazdaságossági szempontok figyelembevételénél - próbáljuk meg alkalmazni a raktárban már kiépített WIFI alapú rádiós adathálózatot helymeghatározásra. A vonatkozó publikációk is korlátozott és speciális logisztikai folyamatokra javasolják kizárólag ezt a megoldást. Labor körülmények között több cikk foglalkozik a rádiós alapú helymeghatározás matematikai – mérés-technikai pontosításával, azonban ezek különböző hipotéziseken alapulnak és csak speciális esetekre adnak megoldást.
- 2 darab olyan publikációt találtam, amely optikai elven működtetett helymeghatározási rendszert vizsgál, - labor körülmények között. A publikációkban bizonyítást nyer, hogy optikai alapú RTLS rendszerek esetében akár gíbyte nagyságú információk is áramolhatnak az RTLS tag és a kiszolgáló hálózat (infrastruktúra) között akár cm-es pontosság mellett. Nagy hátránya a technológiának a betakarás (NLOS) jelensége, amikor is valamilyen fizikai objektum eltakarja a tag és a vevő közötti kommunikációs kapcsolatot, - így a kapcsolat azonnal megszakad. Raktári alkalmazások esetében tehát ezek a rendszerek kockázatokat rejtenek magukban, így csak speciális esetekben használhatóak.
- Több publikáció is foglalkozik a megfelelő RTLS technológia kiválasztásával speciális logisztikai feladatokra vonatkozóan is, azonban ezek kifejezetten speciálisan termelés-kiszolgálásra specializálódnak.

A szakirodalmi feldolgozás során elvégeztem a raktározási, intralogisztikai folyamatok támogatására és hatékonyságának növelésére alkalmas és szóba jöhető RTLS technológiák összegyűjtését. A valós idejű helymeghatározás elméleti alapjainak szakirodalmi feldolgozása után arra kerestem választ, hogy létezik-e a szakirodalomban általánosan és kifejezetten raktári, intralogisztikai folyamatok támogatására alkalmas RTLS kiválasztási módszertan.

A szakirodalom feldolgozása alapján megállapítom, hogy nem találtam ilyen módszertant. A kiválasztási módszertan megalkotásában tudományos részt találtam, amely arra predesztinált, hogy kutatást és javaslatok megfogalmazását végezzem el a témában.

A kutatásom eredményét az 5. fejezetben publikálom.

2.3 A második szakirodalmi vizsgálati terület összegzése.

Milyen lépésekben történhet a logisztikai folyamatfejlesztés RTLS technológia használata mellett ?

A kutatási témának szerény mennyiségű a leválogatott irodalma. Alig pár darab (3) publikáció érinti ezt a kutatási témát, ezért erre vonatkozóan beválogattam és feldolgoztam az RTLS gyártók honlapjain, esettanulmányain és blogjain található forrásanyagokat is.

Berkhan (2014) [66] publikációjában Mátrix típusú gyártási termelési rendszer kiszolgálásához alkalmas, - rugalmas és speciális igényeket is kiszolgáló logisztikai rendszert definiál. A reziliens működtetésre is alkalmas RTLS technológiát választja az anyag és értékáram kiszolgálásához és a logisztikai folyamat vizualizációjához. Ez a teljes rendszer komplexitásának növekedéséhez vezet. Különösen az anyag- és információáramlás agilis és erőforrás-orientált vezérlése igényli a növekvő összekapcsolhatóságot és az értékteremtési folyamatban részt vevő technológiák intelligenciáját.

RTLS technológiákkal történő folyamatfejlesztés első lépése mindig annak eldöntése, hogy milyen „osztályú” RTLS rendszerre van szükségünk egyáltalán. Az RTLS rendszereket szolgáltatási szintjük alapján 5 csoportba osztotta, ezek a lehetséges szolgáltatási szintek adják a felmerült logisztikai probléma, fejlesztési igény alapját (lehetőségeit) ;

Mérendő fizikai Dimenzió	Rövid leírás	Lehetséges azonosítási technológia
0-D	diszkrét azonosítási helyek (jelenlét / hiány)	RFID (Scanner / Tags)
1-D	a mérendő objektum közelsége a mérési ponthoz	BLE, RFID (Reader/Tags), Wi-Fi, 5G
2-D	a mérendő objektum X,Y koordinátái egy viszonyítási koordináta rendszerben	UWB
3-D	a mérendő objektum X,Y,Z koordinátái egy viszonyítási koordináta rendszerben	UWB

25. ábra - Azonosítási rendszerek osztályozása szolgáltatási szintjük alapján (Berkhan, 2024)

A szerző vizsgálat alá vonta és azonosította azokat az objektumokat, entitásokat, melyeket egy Mátrix típusú termelést kiszolgáló logisztikában helymeghatározással követni lehet;

Termékek : mindig megrendelésekhez köthetők, számos terméktípus és különböző termékváltozatok és azok opciói állíthatók elő egy termelési rendszeren belül. A termék alapján azonosítható a termelési folyamat, és nyomon követhető a termék útja a termelési folyamaton keresztül.

Anyagok : magában foglalja az összes nyersanyagot, fogyóeszközt, kellékanyagot és a gyártási folyamathoz szükséges alkatrészeket.

Szállítóeszközök : elengedhetetlenek az anyagok és termékek termelési rendszeren belüli mozgatásához. Ilyenek például a raklapemelő kocsik, targoncák, automatizált vezetésű járművek (AGV) vagy autonóm mobil robotok (AMR).

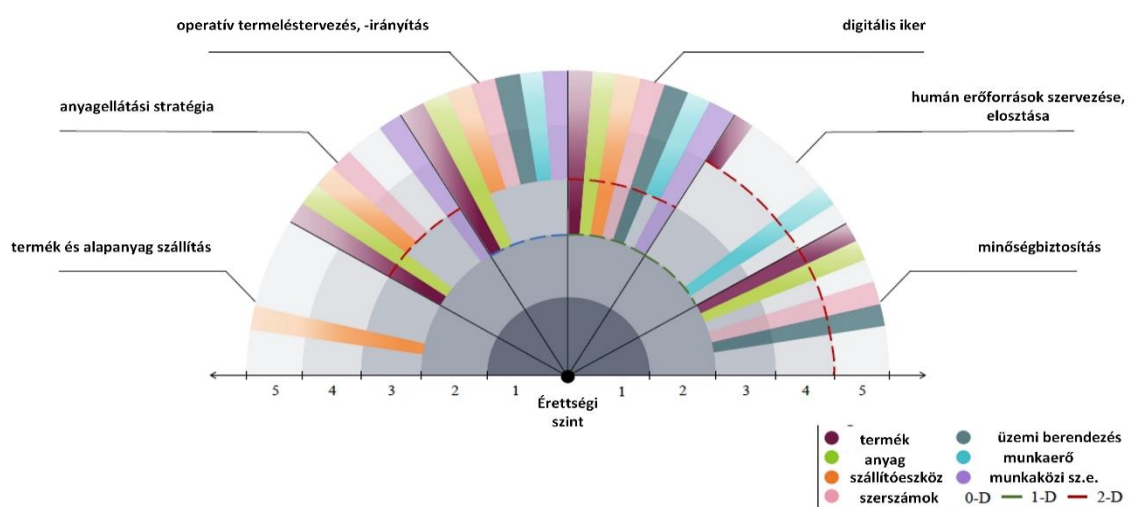
Munkaközi szállítóeszközök : a munkadarabok több gyártóállomáson keresztüli szállítására szolgálnak.

Üzemi berendezések és eszközök : munkaműveletek elvégzésére vagy támogatására használják. Ezek nem minden gyártásnál állnak helyhez kötötten.

Operátorok, munkaerő : Az operátorok a termelési rendszer legrugalmasabb erőforrásai. A feladatok köre, a munkavállalók kapacitása és a munkaállomásokhoz történő elosztás módja jelentősen változhat a mátrix termelési rendszerekben.

Végül egy nagyon reprezentatív ún. „**érettségi keretrendszer**” készített az alábbiak szerint;

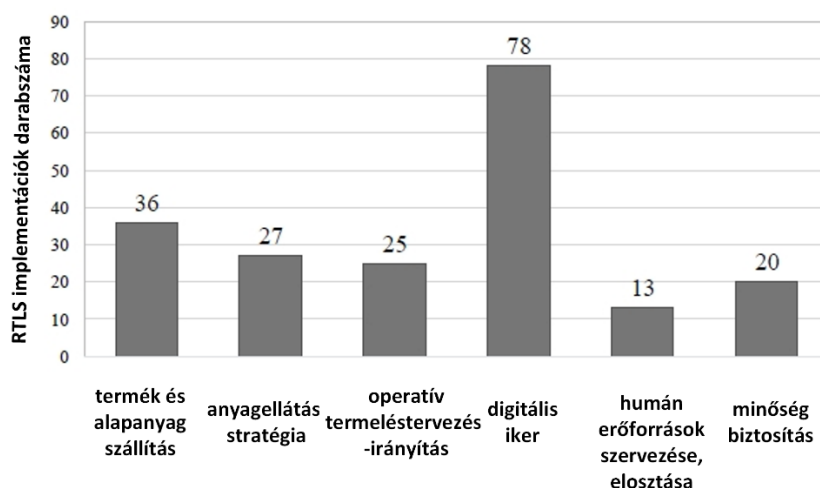
- azonosította Mátrix termelési rendszerek esetében azokat a *legfőbb fejlesztési irányokat és lehetőségeket*, amelyekhez szükséges és hatékonyság növelő eszköz lehet az RTLS technológia használata;
 - **termék és alapanyag szállítás,**
 - **anyagellátási stratégia,**
 - **operatív termelési tervezés és -irányítás,**
 - **digitális iker,**
 - **humán erőforrások szervezése, elosztása**
 - **minőségbiztosítás**
- A fenti lehetséges fejlesztési irányokhoz kapcsolódóan egyenként megvizsgálta, hogy milyen objektumok követése (valós idejű helymeghatározása) mellett rendelhető a feladathoz,
- Illetve a lehetséges fejlesztési irány jelenlegi „**érettségi szintjéhez**” kötötte az egyes fejlesztési irányokhoz tartozó helymeghatározás szükségességét és szolgáltatási szintjét (0.. 2D)



26. ábra - Helymeghatározás szükségessége az egyes fejlesztési irányokban a folyamatok érettsége szerint (Berkhan, 2024)

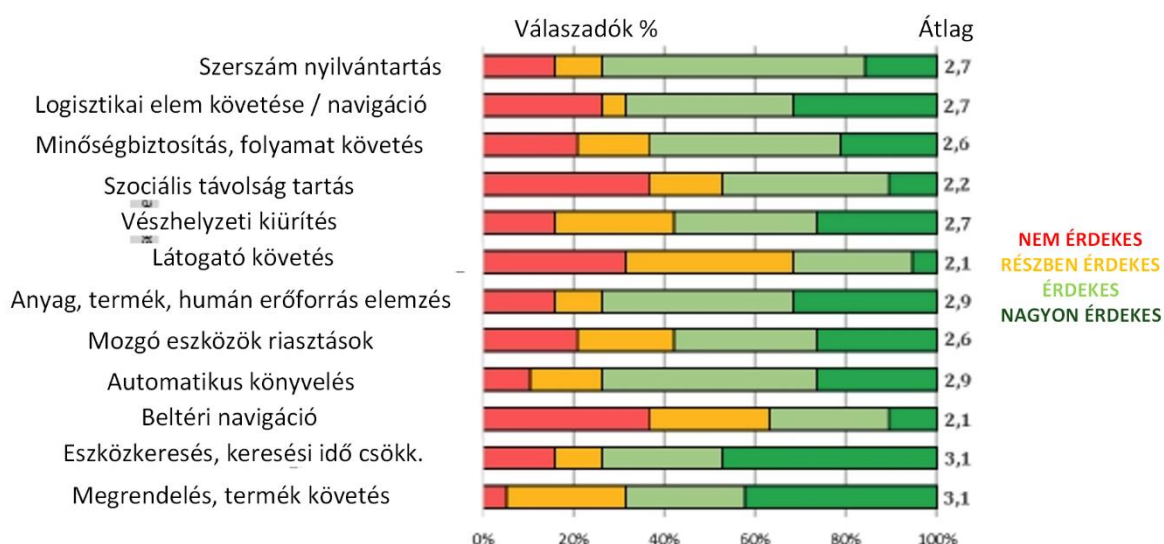
A szerző a vizsgált publikációban ezután részletes elemzést végez az egyes érettségi szintekhez rendelt RTLS fejlesztések szükségességéről.

A publikáció hiánypótló, kérdőíves megkérdezésen alapuló felmérést is tartalmaz, - **80 német vállalat részvételével** – arról, hogy milyen fejlesztési irányokban vezettek be RTLS rendszereket. A felmérés eredménye a következő diagramon látható ;



27. ábra - RTLS bevezetések száma az egyes fejlesztési irányokban, 80 vállalat felmérése alapján

Thiede (2021) [67] publikációjában hasonló kutatás (on-line kérdőíves, német és holland nagyvállalati logisztikai vezetők megkérdezése alapján) található. A kutatásban keresték azokat a vállalati fejlesztési lehetőségeket, ami kapcsolatba hozható az RTLS bevezetésével. Az eredmények a következő táblázatban láthatók ;



28. ábra - Thiede (2021) on-line felmérése lehetséges RTLS fejlesztési irányokról

Az eredmények azt mutatják, hogy a logisztikai jellegű alkalmazások a legérdekesebbek a megkérdezett szakemberek számára; logisztikai objektum követése és navigálása valamint

keresési idők csökkentése valamint megrendelések és késztermékek követését tartották a legfontosabb RTLS előnynek a kérdőíveken.

A felmérés azt vetíti számomra előtérbe, hogy a **költségek**, a különböző **logisztikai folyamatok időtényezői** és az **anyagáram útvonal optimalizáció** lehetnek azok a legfontosabb indukáló mutatók, melyek legitimálják az RTLS fejlesztések szükségességét.

Elvégeztem a második szakirodalmi vizsgálat szempontja alapján leválogatott nem túl széles szakirodalmak elemzését. A vonatkozó szakirodalomban nem találtam egyértelmű választ arra vonatkozóan, hogy milyen lépésekben történhet a logisztikai folyamatfejlesztés RTLS technológia használata mellett.

Gyakorlati logisztikai szakemberek számára viszont nélkülözhetetlen információ lehet egy ilyen fejlesztés lépéseinek előzetes ismerete. Javasolt lépések segíthetik a bevezetés előzetes feltételrendszerének ismeretét, felmérését. Egy bevezetési módszertan választ adhat olyan kérdésre is, hogy egyáltalán érdemes-e logisztikai hatékonyságnövelő RTLS fejlesztéshez kezdeni.

7. Tudományos rések feltárása

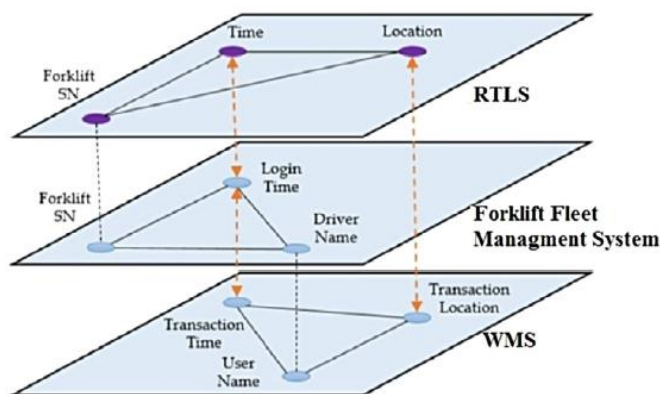
A szakirodalom elemzése után tudományos kutatási rést és lehetőséget tártam fel azzal kapcsolatban, hogy kutatásaimat egy lehetséges lehatárolt raktári, intralogisztikai környezet esetében arra orientáljam, hogy definiálni tudjak egy módszertant arra vonatkozóan, hogy milyen lépésekben történhet az RTLS technológiával támogatott hatékonyságnövelő fejlesztés. Erre vonatkozó kutatásom eredményét a dolgozat 6. fejeztében publikálom.

2.4 A harmadik szakirodalmi vizsgálati terület összegzése.

Melyek azok a legfőbb mutatószámok, melyek az RTLS alkalmazásának hatékonyságát mutatják ?

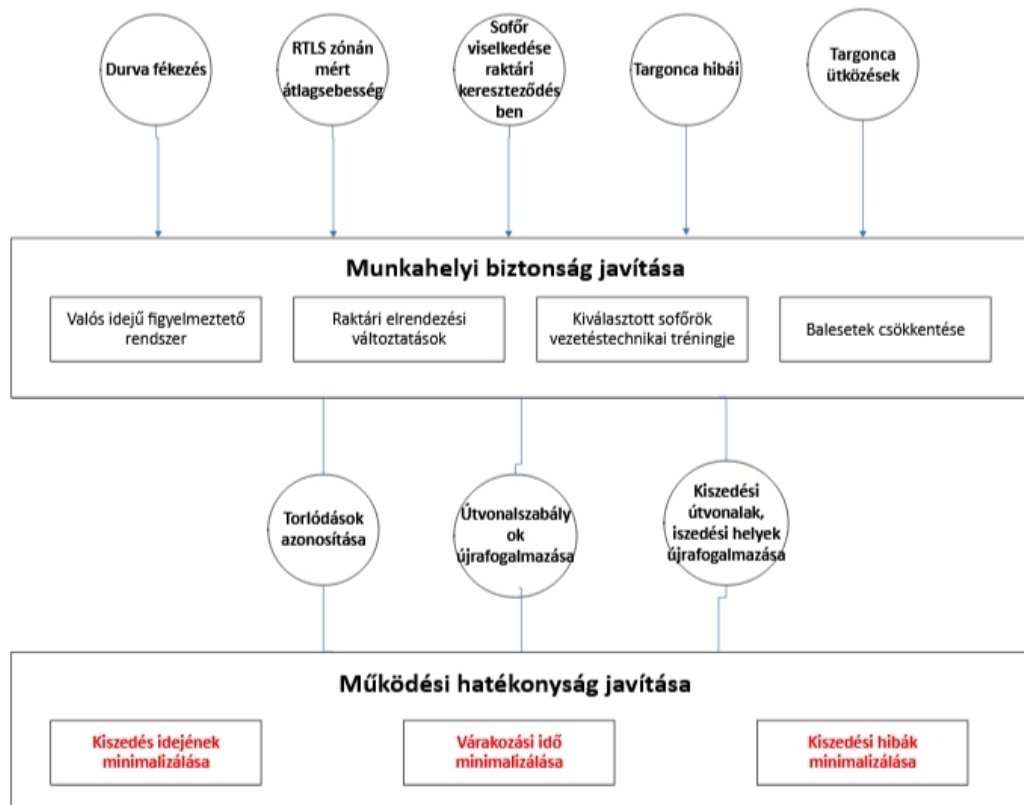
Ennek a kutatási témának is nagyon szerény a leválogatott irodalma (3 darab), ezért itt is igénybe vettem az RTLS gyártók weblapjain található információkat is.

Farouq (2017) [68] publikációjában a raktári, intralogisztikai egységben használandó RTLS rendszer lehetséges kapcsolódását a WMS rendszerhez az ún. FFMS (anyagmozgató gép menedzsment rendszer) -en keresztül mutatja be.



29. ábra - RTLS-FFMS-WMS rendszer kapcsolata, Farouq(2017) szerint

Az intralogisztikai egység működési hatékonyságának javítását az FFMS rendszer adatbázisába érkező adatok manipulációjával valósítja meg. A 29. ábra segítségével szemléletesen bemutatásra kerül egy egyszerű targoncás kiszedési művelet adatainak áramlása az RTLS, FFMS és WMS rendszerekben. Publikációjában a raktár működési hatékonyságának javítását az FFMS rendszerbe érkező anyagmozgató gépek működésével kapcsolatos mutatószámok optimalizációjával javasolja. A hatékonyság javítás mellett fontos követelmény, hogy a munkahelyi biztonság is javuljon (alapvető legyen), ezért a két dolgot ötvözi az FFMS adatok feldolgozásával. A következő ábra egy egyszerű kiszedési művelet közben mutatja meg, - melyek azok az információk, mutatószámok, melyek a hatékonyságot reprezentálják de kizárólag a munkahelyi biztonság figyelembevétele mellett;



30. ábra - Egy raktári kiszedési művelet hatékonyságának mutatószámai (Farouq (2017))

Látható, hogy 4 darab egyszerűen mérhető és rendelkezésre álló RTLS adat (fékezési erő, lassulás mérés, átlagsebesség egy mért zónán belül a raktárban, sofőrök viselkedésének vizsgálata kereszteződésben, targoncák műszaki állapota) hogyan hat a raktár legfontosabb mutatószámaira egy kiszedési művelettel kapcsolatban (kiszedés ideje, raktári várakozási idő, kiszedési hibák száma).

A publikáció véleményem szerint lényeges kérdést feszeget ;

- az RTLS önmagában nem alkalmas raktári menedzsment hatékonyságának javítására; az RTLS egy mérőrendszer (pozíció, útvonal, sebesség, idő), ami ugyan rendelkezik segédeszközökkel a hatékonyság javításának érdekében, de releváns hatékonyság növelést a WMS (és / vagy FMSS) rendszerek integrációjával lehet elérni.

Etgar Durio [69] publikációjában egy indonéz raktározással foglalkozó vállalat Covid járványt követő gazdasági visszaesését kezdte elemezni. A vállalat kénytelen volt módosítani stratégiáit a helyzet leküzdésére, és ezek egyike volt a hatékonyság javítása. A raktárában azonban a hatékonyság fogalma nehezen értelmezhető volt, mivel nem állt rendelkezésre megfelelő teljesítményértékelő rendszer az eredmények mérésére. A kulcsfontosságú teljesítménymutatók (KPI-k) kidolgozása és nyomon követése az ún. Balanced Scorecard (BSC) megközelítéssel hasznos megoldás lett, mert a hatékonyság növelésnek négy fontos területét is átfedi; pénzügyi-, az ügyféloldali-, a belső folyamat javítási-, valamint a vállalat öntanulási és növekedési szempontjait is. A szakértői konszenzuselemzést Fuzzy Delphi statisztikai módszerrel végezték, és az összes Balanced Scorecard szempont eredményeit a vállalat raktárára vonatkozóan a pénzügyi szempontokkal való szakértői konszenzus eredménye alapján ítélték meg (>75%). Az így előállt 28 fő teljesítménymutatóból 21-et határoztak meg a vállalat raktárának teljesítmény mérésére; 5 pénzügyi mutató, 4 ügyfél-elégedettséghez kapcsolódó mutató, 6 belső folyamat javításhoz kapcsolódó mutató és 6 tanulási és növekedési folyamathoz kapcsolódó mutató.

KPI rang	KPI megnevezése	Szakértői konszenzus	Fuzzy Delphi rang
1	megrendelés teljesítési arány	100%	0,947
2	qhsé képzésben részesült alkalmazottak százalékos aránya	90%	0,93
3	készletpontosság	90%	0,92
4	megrendelési pontosság	100%	0,907
5	hiányzó alkalmazottak százalékos aránya	80%	0,903
6	informatikai eszközök való támogatottság mértéke	90%	0,9
7	rendelés átfutási idő	80%	0,89
8	sérüléssel hibák százalékos aránya	80%	0,89
9	Kompetenciaképzésben részesült alkalmazottak százalékos aránya	80%	0,88
10	selejt %	80%	0,87
11	készletforgás sebessége	90%	0,87
12	munkaerő költsége	80%	0,87
13	raktári kezelési költség	90%	0,87
14	raktári berendezések túlterhelés miatti költsége	80%	0,86
15	munkaerő túlóra költsége	80%	0,86
16	készletértéktartási költség	80%	0,86
17	időben történő kiszállítási ráta	80%	0,86
18	sértetlenül megérkező szállítmányok aránya	80%	0,86
19	raktári tárhely kihasználtsági mutató	80%	0,85
20	dolgozói IT képzésben résztvevők aránya	80%	0,85
21	sérüléssel kapcsolatos idővesztés	80%	0,83
22	késői teljesítések aránya	60%	0,82
23	idővesztés a raktári eszközök karbantartása, javítása miatt	60%	0,82
24	túlkészletezés mértéke	40%	0,81
25	visszaru aránya	60%	0,81
26	avult készletek aránya	50%	0,8
27	tárolóhely költsége	40%	0,77

28	vevői elégedettség	60%	0,74
----	--------------------	-----	------

31. ábra - Etgar Durio Balanced Scorecard módszerrel összegyűjtött raktári KPI-k

A KPI-kat specifikus, mérhető, elérhető, releváns és időhöz kötött (**SMART** = Specific, measurable, achievable, relevant, and time-bound) kritériumok alapján szükséges meghatározni;

- Specifikus: világos, részletes és egyértelműen definiált.
- Mérhető: meglévő eszközökkel (WMS, ERP, FMS, RTLS) mérhető.
- Elérhető : elérhető, nem irreális a cél.
- Releváns: illeszkedik a vállalat raktárának jellemzőihez és releváns a hatékonysági cél szempontjából.
- Időhöz kötött: definiált időintervallumban mérhető.

A vállalat raktározási tevékenységével kapcsolatos mutatókat a hatékonyságnövelést elősegítő stratégiai célokhoz kapcsolták, majd meghatározták az egyes mutatószámokhoz tartozó célértékeket és a célértékek teljesülésének osztályozását is (alacsony, közepes, magas)

Stratégia megnevezése	Kulcsindikátorok a stratégiai teljesülés méréséhez	High	Medium	Low
Raktári kezelési költségek csökkentése	raktári kezelési költség↓	<7%	7-16%	>16%
	raktári berendezések túlterhelés miatti költsége↓	<4%	4-10%	>10%
Raktári munkaerő költségek csökkentése	túlóra költségek ↓	<5%	5-10%	>10%
	munkerő bérköltségek↓	<22%	22-32%	>32%
Tárolási költségek csökkentése	készlettartási költség↓	<9%	9-19%	>19%
Rendelési pontosság növelése	rendelési pontosság ↑	>98%	98-92%	<92%
	rendelés teljesítési arány ↑	>98%	98-92%	<92%
Reakcióidő növelése	rendelés átfutási ideje ↓	<2 hours	2-4,6 hours	>4,6 hours
	időben történő teljesítés aránya ↑	>90%	90-79%	<79%
Maximális készletpontosság	készletpontosság ↑	>98%	98-92%	<92%
Selejt% csökkentése	selejt% ↓	<3%	3-7%	>7%
Árusérülések csökkentése	árusérülési ráta ↓	<2%	2-7%	>7%
	hibátlan állapban érkező szállítmányok % ↑	>97%	97-91%	<91%
Tárolási kapacitások maximalizálása	raktári hasznos terület kihasználtsági % ↑	>83%	83-77%	<77%
Készletforgási sebesség maximailzálása	készlet forgási sebesség ↑	>1,9	1,9-1,2	<1,2
Munkahelyi kompetencia tréning	kompetencia tréningen résztvett munkaerő % ↑	>86%	86-69%	<69%
Digitális írástudás kompetencia fejlesztése	IT tréningen résztvett munkaerő % ↑	>75%	75-61%	<61%
	It eszközökkel támogatott munkaerő % ↑	>32%	32-22%	<22%
Munkaügyi fegyelmi szabályok javítása	hiányzó munkaerő % ↓	<7%	7-17%	>17%
	QHSE tréningen résztvett munkaerő % ↑	>98%	98-86%	<86%
	sérülés miatti munkaidő kiesés ↓	<7%	7-15%	>15%

32. ábra - Stratégia - KPI - mérőszám - osztályozás

Meghatározták az egyes stratégiákhoz tartozó jelenlegi KPI-ket, lemérték jelenlegi értéküket majd meghatározták az elérendő célértékeket. A kitűzött KPI-k célértékéhez projektterveket és időzítést határoztak meg, majd a mutatószámokat az időszak végén kontrollálták szükség esetén revíziókat végeztek.

A publikáció számomra legfontosabb mondanivalója, hogy egy valós probléma megoldására vonatkozóan feltárássra kerülnek a gyökérokok, majd egy mutatószám-keretrendszer kidolgozásával és alkalmazásával fejleszthető a probléma megoldása. A mutatószám

rendszert mérhetően, elérhetően, relevánsan és időhöz kötötten kell megválasztani valamint több szemszögből (pl. pénzügyi, ügyfél-elégedettség, belső folyamat javítási, tanulási és növekedési) is szükséges vizsgálni.

Az előző (második) szakirodalmi vizsgálat egyik fontos megállapítása volt, hogy az RTLS és a vállalatok által elvárt hatékonyság növelési lehetőségek kapcsolatában a legnagyobb érdeklődési területek a raktári költségek csökkentése, a raktári kiszolgáló és belső folyamatok idejének csökkentése és a raktári anyagáramok optimalizációja volt. Ebben a fejezetben megismertem és érdemesnek tartom még a raktári KPI-ket raktári munkabiztonsági és digitalizációs szemszögből is megvizsgálni.

Ezeket a ténymegállapításokat összevetve a jelen fejezetben megismert módszertannal, arra predesztinál, hogy kutatást és elemzést végezzek olyan KPI-k területén, amelyek jól reprezentálják az RTLS technológia bevezetése utáni hatékonyság növekedését. Érdekes és izgalmas kérdés a hatékonyság növekedésnek a működési mechanizmusát megismerni, azaz feltárni azokat a gyökérokokat, melynek köszönhetően egy RTLS beruházás megtérülő lesz.

7. Tudományos
rések feltárása

A szakirodalom elemzése után tudományos kutatási rést és lehetőséget tártam fel azzal kapcsolatban, hogy kutatást végezzek - egy lehetséges WMS rendszerrel rendelkező lehatárolt struktúrájú raktár és annak RTLS-sel bővített változata között, - KPI-k vizsgálatának segítségével. A KPI-k legfőbb vizsgálati szempontrendszere a raktári költségek csökkentése, a raktári kiszolgáló és belső folyamatok idejének csökkentése és a raktári anyagáramok optimalizációja valamint munkabiztonság és digitalizáció. Erre vonatkozó kutatásom eredményét a dolgozat 7. fejeztében publikálom.

3. A kutatás módszertana

A kutatási módszertan egy szisztematikus keretrendszer, amelyet a kutatási probléma megoldására használnak a kutatás elvégzéséhez szükséges legjobb és legmegvalósíthatóbb módszerek alkalmazásával, miközben igazodik a kutatás céljához és célkitűzéseivel.

A kutatási módszertan magában foglalja a kutatás mit, miért és hogyan kérdéseinek megválaszolását;

- **MIT** - Mi a kutatási módszer, milyen eszközöket fogok használni az adatgyűjtéshez és -elemzéshez, mekkora lesz a minta mérete, és így tovább.
- **MIÉRT** - Miért választottam azt, amit terveztem.
- **HOGYAN** - Hogyan kívánom felhasználni a módszereket és eszközöket a kutatási probléma megoldásához és a kutatás elvégzéséhez.

Kutatási célkitűzéseim arra a három darab kutatási területre vonatkozik, ahol tudományos rést fedeztem fel a leválogatott szakirodalomban; azaz nem találtam elegendő vagy megfelelő minőségű irodalmat, magyarázatot, leírást, utalást a megfogalmazott kutatási kérdésekre vonatkozóan. Úgy gondolom ezek olyan kutatások, amik érdekesek arra, hogy másokkal is megismertessem. Fontos megjegyezni továbbá, hogy a feltett kutatási kérdések a mai napig foglalkoztatnak a mindennapi munkám során is, hiszem szakmai karrierem közben sem találtam egzakt válaszokat ezekre a kérdésekre.

A fenti gondolatok alapján három csoportba foglalom össze a kutatási témaköröket, amivel jelen dolgozatomban foglalkozok;

IntraLogisztikai, raktári felhasználású RTLS technológiai szempontú kiválasztásának kutatása

Szükségesnek tartok átfogó vizsgálatot végezni arról, hogy lehatárolt intralogisztikai vagy raktári környezetben melyik helymeghatározási technológiai változat a legoptimálisabb választás. A kutatási kérdést számomra elsősorban az adja, hogy a szakirodalom döntő része nem logisztikai környezetben (hanem pl. termelésben vagy egészségügyben) vizsgálja a kérdést, valamint nem található olyan tanulmány amely az összes szóba jöhető technológiát egyben és egymással vetné össze.

Kutatásom során összegyűjtöm azokat a legfontosabb előfeltételeket, melyek nagyban befolyásolják egy raktár vagy intralogisztikai objektum logisztikai folyamatainak fejlesztésére alkalmas kiszolgáló RTLS technológiai változatát. A feltételek összegyűjtése után döntési keretrendszert fogalmazok meg, ami segíti és definiálja az azonosított előfeltételeket megfelelő súlyban figyelembe venni. A döntési keretrendszer segítségével kiválasztásra kerül a lehatárolt raktár logisztikai folyamatfejlesztésére alkalmas RTLS technológia.

A kiválasztás eredményeképpen kiválasztott **technológia megnevezése és a kiválasztás folyamata** adja **első hipotézisemet**.

Milyen lépésekben történhet a logisztikai folyamatfejlesztés RTLS technológia használata mellett ?

Az SLR irodalomkutatásból kiderült, hogy a nem túl nagy számú keresési találatokból szűrt és leválogatott szakirodalmak szinte egyike sem foglalkozik pontosan ezzel a kérdéssel.

Izgalmasnak és aktuálisnak tartom a témát, tekintve, hogy jómagam is részt vettem már több ilyen jellegű projektben, ahol szintén nem használtam semmilyen algoritmust, előzetes vizsgálati kört, támogató kérdőívet stb.-t azért, hogy könnyebben érthető és világos célt adjon egy-egy RTLS bevezetési projekt.

Kutatásomban először összegzem és összegyűjtöm azokat az információkat, legjobb praktikákat, gyártók által javasolt technológiai jellegű bevezetési eljárásokat, tapasztalatokat, amik segítik egy általam kutatót lehetséges tervezési folyamat megértését és megalkotását, majd ezután térek rá egy általam javasolt lépéssorra, amely segítheti a logisztikai folyamatok fejlesztését RTLS technológia használata mellett.

A lépéssor megalkotása, megalkotásának folyamata adja egyben **második hipotézisem** is.

Melyek azok a legfőbb mutatószámok, melyek az RTLS alkalmazásának hatékonyságát mutatják ?

Ebben a kutatási témában sem találunk a szakirodalomban releváns publikációkat, pedig az üzleti szférában talán ez a legfontosabb kérdés, amikor egy piaci szereplő elgondolkozik azon, hogy RTLS-t vezessen be a logisztikai hatékonyság fokozása érdekében. A feldolgozott szakirodalom alapján ez a kutatási irány az RTLS rendszerek saját belső szolgáltatásainak keretrendszerén belüli hatékonysági mutatókat reprezentál. Kutatási rést találtam arra vonatkozóan, hogy nem találtam olyan szakirodalmat amely az RTLS-t egy meglévő logisztikai rendszerbe integráltan vizsgál a korábbi állapothoz képest.

A dolgozatomban megvizsgálom azt a kérdéskört, hogy egy meglévő logisztikai folyamat információs rendszerébe hogyan illeszthető az RTLS, illetve ha a meglévő információs rendszert átalakítjuk, milyen mutatószámok, kulcs indikátorok mentén érdemes vizsgálni a logisztikai folyamat hatékonyságának változását.

A kutatás során szintén támaszkodnom szükséges a valós RTLS tulajdonságaira, szolgáltatásaira, bevezetésének alapvető feltételeire, ezért itt is megerősítem, hogy a következő fejezetben bemutatásra kerülő valós RTLS kialakítási körülmények mindenképpen szükségesek a későbbi fejezetek megértéséhez.

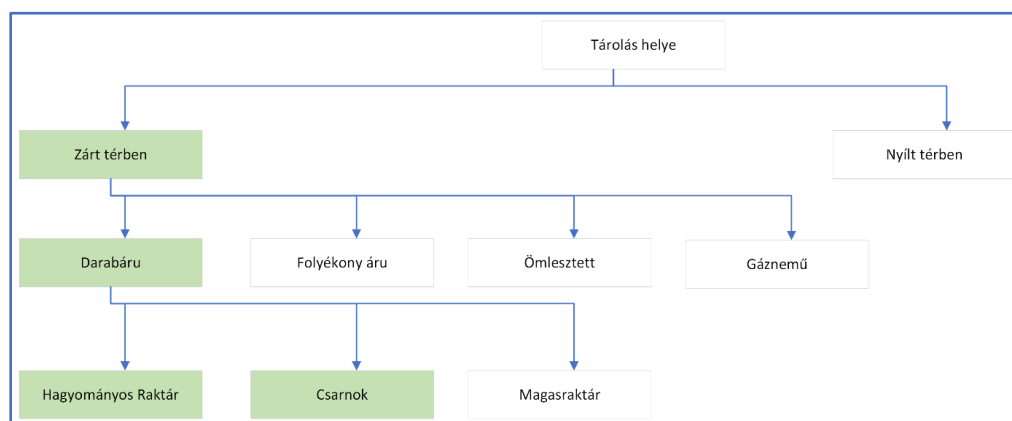
4. A vizsgált logisztikai rendszerváltozatok lehatárolása

A vizsgált RTLS rendszer nem minden logisztikai folyamatban tud feltétlenül hatékony lenni. Vannak olyan esetek, amikor működéséből adódóan kifejezetten lassítja az anyag és értékáramot és nem hoz hatékonyság növekedést a rendszer, illetve az esetek egy részében indokolatlanul nagy egyszeri beruházás lenne egy RTLS kiépítése, mert magas kezdeti költségvonzata csak nagyon hosszú távon térülne meg.

Szükség van átfogó, raktározási rendszerek és műveletek szempontjából átgondolt vizsgálatra, amely lehatárolja azokat a területeket, ahol az RTLS kedvezőbb ajánlatot adhat intralogisztikai egységet működtető felhasználói részére mint az eddig megismert azonosítási, nyomkövetési rendszerek.

A vizsgálat során nem csak egy rövid időszakra vonatkozó előnyöket, hátrányokat veszek górcső alá, hanem bizonyos műveletek vagy éppen a raktár teljes működése alapján is célszerű hosszabb időtávban gondolkodni. Itt elsősorban arra gondolok, hogy a manapság nagyon is életszerű hirtelen fellépő terheléseket (igényeket) és az azt követő alacsonyabb működési intenzitást (erőforrás felesleget) is le kell tudnia kezelnie a nyomon követési rendszernek.

Fontos szempontnak tartom, hogy a kiválasztáshoz le kell határolnunk a kiválasztandó RTLS technológia fizikai határait, üzemeltetési körülményeit. Az RTLS eddigi tulajdonságainak megismerése során az volt a kiindulópont, hogy 4 falon belüli helymeghatározási rendszereket vizsgáltam. A kültéri helymeghatározás teljesen más megoldást kíván, mert a megismert rádióhullám alapú technológiák kültéri használatban nem terjedtek el az időjárás – rádióhullám terjedésre mért - jelentős befolyásoló tényezője miatt. A hagyományos műholdas alapú GPS technológiák nem alkalmasak logisztikai feladatokra, mert pontosságuk maximum 3 méter vagy afeletti. Tehát **a kültéri (nyílt téri tárolás) alkalmazást kizárom a további vizsgálatok alól.**



33. ábra - A vizsgált logisztikai tárolási módok lehatárolása (zöld színnel jelöltek a szóba jöhető tárolási módok)

Az RTLS tag-ek szakirodalmi feldolgozásakor már szó volt arról, hogy ezek az eszközök a technológiában rögzítendő az árura / logisztikai eszközre / humán erőforrásra, ezért a zárt téri tárolási módokból **szintén kizárható a folyékony, ömlesztett és gáznemű anyagok tárolásának helymeghatározása**. Kifejezetten valamilyen kiszerelésben, csomagolásban, raktározási egységben tartott darabáruk mérése ami a továbbiakban vizsgálat tárgyát képezheti. Ezeket az árukat javarészt hagyományos kialakítású raktárakban vagy csarnokokban tároljuk, tehát a vizsgálatok további része ezen tárolási helyek mentén összpontosul.

Sajnos létezik egy másik nagyon erőteljes korlátozó feltétel is az RTLS technológiák használatánál; **Az RTLS „z” (magassági) irányú adatgyűjtésének kizárása** [70].

A szakirodalmi feldolgozás során szó volt arról, hogy az RTLS háromszögletes módszerrel számítja ki az RTLS tag x, y, és z irányú közelítő pozícióját, majd megfelelő algoritmus segítségével szoftveresen korrigálja a pozíciókat és előállítja a minél pontosabb x,y síkbéli és „z” azaz a magassági koordinátákat a raktári viszonyítási koordináta rendszerében.

Az elterjedt, logisztikában alkalmazott RTLS rendszerek 2025-ben még általában nem mérik a „z”, magassági irányú koordinátákat, ugyanis körülményes a mérésük ;

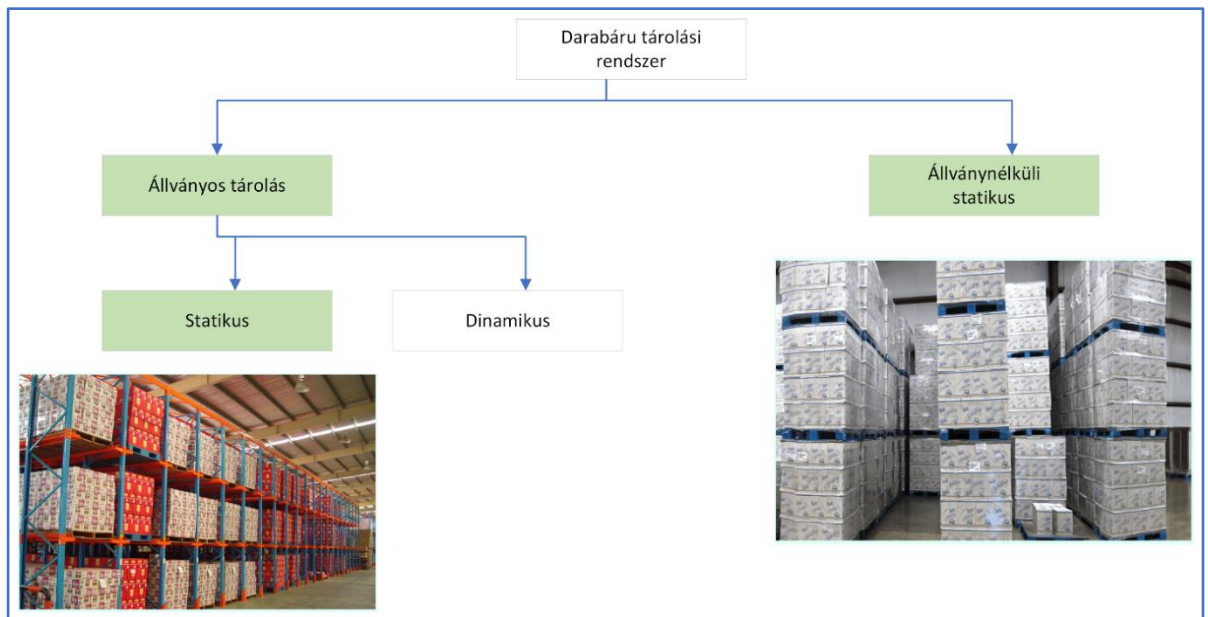
- egyrészt nem homogén, egyforma magasságban kellene elhelyezni az Anchor-okat (akár több 100 darabot), hanem mm-re pontosan előre kiszámított és eltérő magasságokban, beleértve néhány esetben földközeli magasságokat is. Ez kivitelezhetetlen egy raktárban, mert nincsenek használható rögzítő felületek az állványokon és a plafonon kívül, valamint a földközeli magasságokban fémes kitakarás és az Anchorok gyakori sérülése lenne jellemző.
- másrészt, - ha mégis valamilyen más módszerrel (pl. barométer (magasságmérő) [71] szenzor integrálásával az RTLS tag-ben) mérnénk, akkor sok időt (és rádiós sávot) venne el a tag és anchor-ok közötti kommunikációból és a tag-ek hosszútávú energiaellátása is drasztikusan lecsökkenne.

A „z” irányú kizárás ténye azoknál a raktártípusoknál nehezíti meg az RTLS rendszer alkalmazását, ahol függőleges irányban nagyszámú tárhely van definiálva. A fenti indokok alapján tehát a vizsgált tárolási módok közül **a magasraktári és kifejezetten az ún. vékony-folyosós raktári alkalmazásokat (több tucat tárhely függőleges irányban) szintén ki kell zárni** a további vizsgálatok alól.

Nem zárom ki viszont a vizsgálati körből azokat az állványos raktári konfigurációkat, ahol általában egy sorban 1-3 tárhely helyezkedik el függőlegesen egymás felett és nem lényeges az egymás feletti tárhelyek logikai megkülönböztetése a logisztikai folyamatok szempontjából. Kifejezetten ilyen tárhelyek az ún. utántöltési tárhelyek, ahol egyforma árut tárolnak függőlegesen és a készlet fogyáshoz megfelelően történik az áruk lefelé történő mozgása a függőleges egymás alatt elhelyezkedő tárhelyeken.

Ezekben az esetekben tehát korlátozó feltételekkel (a „z” magassági irány korlátozott) vagy más speciális megoldással együtt használható az RTLS technológia. Speciális megoldás lehet az ún. **indirekt betárolási módszer**, amikor nem az árut, hanem az árut mozgó anyagmozgató gépet követjük a síkban. A követett gép pozíciója adja az állványzat sori (x,y) adatát, a „z” irányú tárhely pozíciót pedig vagy egyáltalán nem, vagy pedig manuális adatbeviteli módszerrel oldjuk meg.

Tárolási és anyagmozgatási technológiák szempontjából tovább elemezve a darabáruraktárakban tárolt áruk 2 fő csoportba oszthatók [72]: egyedi darabáruk és egységrakományba foglalt darabáruk. Az egyedi darabáruk kis méretű (kis méretű 2-50 kg alatti tömegű termékek pl alkatrészek, anyagok, szerszámok) vagy nagy méretű 500-2000 kg tömegű, egyedileg kezelhető tárolási egységek (bálák, hordók, papírtekercek) lehetnek. Az egységrakományok egyedi darabárukból árualátétek, rakodólapok, tárolóládák stb. segítségével vagy egyéb módon (pl. átkötéssel, kötegeléssel, zsugorfóliás burkolással) képzett mozgatási-tárolási egységek.



34. ábra - Darabárus tárolási mód esetén szóba jöhető RTLS helyszínek (zölddel jelölve)

Az állványnélküli statikus tárolási mód kifejezetten az RTLS technológia legoptimálisabb alkalmazási területe, később ezt részleteiben meg fogom indokolni. Ebben a tárolási módban általában egy-egy áruajtából nagyobb mennyiséget kell tárolni és nem követelmény, hogy minden áru egységhez tetszőleges gyakorisággal hozzá lehessen férni. További előny az áru halmozhatósága. Kedvezőbb a terület és térkihasználás a raktár könnyen és gyorsan átállítható más áruk tárolására, akár naponta váltogatható az áruk tárolási rendje (tárhelyek, elrendezések, megközelítések stb.)

Kétféle tárolási módot különböztetünk meg állvány nélküli tárolási rendszerek esetében;

Soros elrendezésű tárolás, főbb jellemzői :

- nagyobb fajtaszámú, halmozható termékstruktúra esetén alkalmazható,
- a tárolási sorok között több folyosó kialakítása szükséges az egyes egységcsomagok típusokhoz való közvetlen hozzáférés érdekében,
- kisebb alapterület-kihasználtság érhető el a folyosók kialakítása miatt

Tömbös elrendezésű tárolás, főbb jellemzői :

- kis fajtaszámú, halmozható termékstruktúra esetén alkalmazható,
- a tárolási tömbök között kevesebb folyosó kialakítása is elegendő az egyes egységcsomagok típusokhoz való közvetlen hozzáférés érdekében,
- kedvezőbb alapterület-kihasználtság érhető el a kevesebb folyosó miatt.

Felmerül a kérdés, hogy hogyan lehet ezeket a korábban már megismert RTLS tageket rögzíteni az árukhoz úgy, hogy kellően robusztus maradjon a rögzítés a megismert tárolási módok esetében,- azaz az anyagmozgatás során mindig ottmaradjon az árun, illetve bírja különböző terheléseket (ütések, összecsiszások, egymásra rakódás stb.). Alapvetően tokozási és rögzítési kérdés a tag robusztussága, többféle (pl. 3d nyomtatás) technológiával akár szélsőségesen strapabíró tokozást is lehet készíteni műanyagból az RTLS-tagek számára. A rögzítés pedig minden projekt esetében megvizsgálandó kérdéskör a felhasználandó

rakományok, áruk várható raktári mechanikai igénybevételei alapján. A rögzítés általában mechanikus megoldású, de előfordulhat tépőzáras vagy mágneses rögzítési mód is.

Elvégeztem a kutatási irányaim logisztikai rendszerváltozatainak lehatárolását. A dolgozat további kutatásai minden esetben a lehatárolt logisztikai rendszerváltozatra érvényes. Az általam definiált raktár vagy intralogisztikai objektum a következő tulajdonságokkal rendelkezik;

- a valós idejű helymeghatározás raktári termék típusa minden esetben **darabáru**,
- a vizsgálat és az RTLS rendszer kialakítása mindig **zárt raktári térben**, azaz hagyományos vagy csarnok épületformájú térben értelmezhető,
- A darabáru tárolási módja **állvány nélküli soros vagy tömbös elrendezésű**, illetve megengedhető még az **állványos statikus tárolási mód** korlátozó feltételekkel.

5. Raktározási folyamatok további vizsgálatához alkalmas

RTLS rendszer technológiai szempontú kiválasztása

Ebben a fejezetben választom ki eddigi szakmai tapasztalataim és előzetes szakirodalmi kutatásom alapján az alkalmazható RTLS technológiák közül azt, melynek feladata a lehatárolt logisztikai rendszerváltozat üzemszerű kiszolgálása, azaz amely alkalmas lesz arra, hogy a megfogalmazott gazdasági, hatékonysági és műszaki, technikai kritériumokat teljesítse. **A kiválasztási folyamat és döntési rendszer kidolgozása valamint a kiválasztott rendszer szolgáltatója dolgozatom első hipotézisét, amely definiálja tehát azt a javasolt RTLS technológiát, amely alkalmas a modellben megfogalmazott raktári, logisztikai folyamatok hatékonysági mutatókkal alátámasztott működtetésére.**

A kiválasztás szempontrendszere

A dolgozatban eddig említett és szóba jöhető azonosítási technológiák közül szükséges egy olyan technológiai rendszerváltozat kiválasztása, amely tehát a logisztikai folyamatok valós idejű követéséhez és vizsgálatához megfelelő keretrendszert biztosít technológiai szemszögből. A dolgozat vonatkozó szakirodalmi feldolgozásában szó esett az RFID alapú, az optikai elven működő, a privát 5G hálózat alapú, a Bluetooth – RSSI -t használó, a WIFI alapú és az UWB alapon működő helymeghatározási rendszerek különleges tulajdonságairól. A fejezetben igyekeztem ezen technológiák legfontosabb előnyeit és hátrányait bemutatni, kiemelni. A szakirodalomban több szerző érinti a témát, de legtöbbször általánosságban, konkrét logisztikai rendszerváltozat megjelölése nélkül - például *George Oguntala (2018)* felmérése alapján [21].

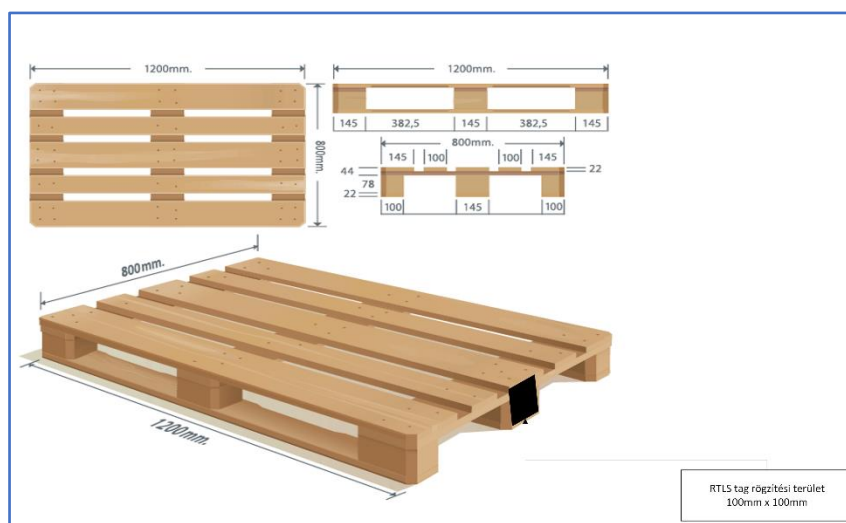
A szakirodalmi elemzés és saját tapasztalataim alapján a technológiai kiválasztást a következő feltételek vizsgálata mentén végeztem el ;

- az alkalmazni kívánt RTLS rendszerrel elérhető **pontosság** a követésben,
- automatikus azonosítás (és a valós idejű követés) **lehetősége és megbízhatósága**,

- az alkalmazott RTLS tag által **felhasznált energia**, ami arányos az egy feltöltés / akku / elem-csere időpontjától mért RTLS tag üzemelhetőségi idejével,
- **hatótávolság**, az RTLS tag jeleinek vételére megengedett maximális távolság az Anchortól. A hatótávolság arányos az Anchorok raktárban szükséges „telepítési sűrűségével”, ami beruházási költségek szempontjából befolyásoló tényező,
- **kezdeti telepítési és beüzemelési (beruházási) költségek**,
- **skalázhatóság**, ami a telepített RTLS rendszer bővítésének egyszerűségét reprezentálja.

Pontosság

Az első és legfontosabb kiválasztási kritérium a helymeghatározás pontossága. A felhasználási igény felől érdemes megközelíteni a kérdést, majd később technológiát vizsgálni az igényhez. Tapasztalataim alapján és egy egyszerű szemléltető ábra segítségével gyors vizualizációs választ tudok reprezentálni a kérdésre [73]. Mivel a raktári, intralogisztikai műveletek döntő többsége EUR raklap egységgrakomány képző eszköz használata mellett történik, - ez azt is jelenti, hogy az alapegység mérete a logisztikai rendszerben a 800mm x 1200mm. Ha raklapszintű elkülönítést szeretnénk egy logisztikai és helymeghatározó rendszerben is, akkor a raklap rövidebb oldalát alapul véve és feltételezünk egy 100mmx100mm rendelkezésre álló RTLS tag rögzítési felületet az egységgrakományon, akkor tulajdonképpen adódik is, hogy a **rendszer pontosságának legalább 30cm-nek (300mm) kell lennie minimum**;



35. ábra - RTLS tag általános rögzítési pozíciója EUR raklap esetében

Természetesen vannak olyan logisztikai folyamatok is, ahol a raklap méreténél kisebb felbontású egységgrakománnyal szükséges dolgozni, azonban már előzetesen ismerve a technológiai korlátokat is, javaslatom szerint maradjon a 3 deciméteres pontossági kritérium egyenlőre a vizsgálati irány. Megvizsgáltam a szakirodalomban is, hogy milyen pontosság az ajánlás az RTLS-t használó logisztikai objektumok esetében; sajnos a szakirodalom átvizsgálása után nem találtam releváns javaslatokat erre vonatkozóan. Küpper (2022) munkája [23] volt az egyetlen mérvadó szakirodalmi anyag, - amit azért is fontos kiemelni, mert Küpper Úr egyben BMW vezető gyártómérnök is, a BMW pedig az egyik legkorábbi és legfejlettebb RTLS felhasználó a régióban és a világon. Az alábbi

ábrán a német BMW autóipari gyártó óriás elvárt belső gyártási és logisztikai pontosságának összefoglaló táblázatát láthatjuk.

Scenario	Horizontal accuracy	Vertical accuracy	Availability	Latency	UE Speed
Mobile control panels with safety functions (non-danger zones)	< 5 m	< 3 m	90 %	< 5 s	n/a
Process automation – plant asset management	< 1 m	< 3 m	90 %	< 2 s	< 30 km/h
Flexible, modular assembly area in smart factories (tool tracking)	< 1 m (relative positioning)	n/a	99 %	1 s	< 30 km/h
Augmented reality in smart factories	< 1 m	< 3 m	99 %	< 15 ms	< 10 km/h
Mobile control panels with safety functions in smart factories (within factory danger zones)	< 1 m	< 3 m	99.9 %	< 1 s	n/a
Flexible, modular assembly area in smart factories (for autonomous vehicles, only for monitoring purposes)	< 50 cm	< 3 m	99 %	1 s	< 30 km/h
Inbound logistics for manufacturing for driving trajectories (if supported by further sensors)	< 30 cm (if supported by further sensors)	< 3 m	99.9 %	10 ms	< 30 km/h
Inbound logistics for manufacturing (for storage of goods)	< 20 cm	< 20 cm	99 %	< 1 s	< 30 km/h

36. ábra - Küpper(2022) - BMW üzem elvárt logisztikai pontosságok

Logisztikai alkalmazások esetén a táblázat alapján 30 cm-es (vagy ez alatti) pontosságot (horizontális azaz x-y irányban értendő), 99,9% rendelkezésre állást, 10ms helymeghatározási frissítési időt (10ms-kénti blink indítása az RTLS tag-től) és maximum 30 km/h (8,34 m/s) mozgási sebesség korlátozást definiált Küpper.

A 30 cm-es pontossági előírás egybevágh tehát a tapasztalataim alapján számított értékkel, ezért a továbbiakban a 30 cm feletti pontosságú RTLS technológiák hátrébb sorolódnak a vizsgált lehetséges technológiai változatok közül az osztályozó rangsorban.

Automatikus azonosítás lehetősége és megbízhatósága

Vizsgálni szükséges, hogy a kiválasztott RTLS technológia alkalmas-e arra, hogy egy objektum valós idejű helymeghatározásával **egyidőben** egyértelműen azonosítsa is az objektumot melyet követünk / vagy esetleg szükséges még egy másik párhuzamos rendszer is az egyértelmű azonosításhoz. A rádiós alapú rendszereknél (UWB, RFID, BLE, WIFI, 5G) egyértelmű az azonosítás lehetősége és megbízhatósága, hiszen az RTLS tag-ek rendelkeznek egyedi „blink”-kel (rádiós alapú egyedi azonosító jellel). Természetesen az adatátvitel robusztus rendszerek esetében megszakadhat, - azonban a rendszernek hibatűrőnek szükséges lennie abból a szempontból, hogy a szakadás után gyorsan helyreálljon újra a kommunikáció.

Az egyetlen kivétel az optikai kommunikáción alapuló RTLS (IR based RTLS), mert ott az RTLS Tag-nek és az Anchor-nak mindenképpen takarásmentes közeg megléte mellett közvetlen rálátással kell kommunikálniuk egymással. Logisztikai környezetben ez szinte megoldhatatlan feladat ; hiszen egy -egy áru, anyagmozgató gép, állvány, ember vagy más objektumok bármikor takarást idézhetnek elő a kommunikációban, sajnos hosszabb ideig is - így megbénítva az adatátvitelt. Ezért az optikai (IR based RTLS) alapú rendszerek valójában sok megkötés és kompromisszum mellett alkalmazhatóak a raktárban.

Felhasznált energia (RTLS tag működési ideje 1 feltöltéssel)

Felhasznált energia alatt az RTLS tag által, - a működtetéséhez szükséges felvett energiát értem. A jellemző annál optimálisabb minél kevesebb energiára van szükség a működtetéshez. A felvett energiával fordítottan arányos az RTLS tag egy feltöltéssel elérhető működési ideje. Ez a jellemző azért fontos, mert ha az azonosítani kívánt jeladó (RTLS Tag, WIFI RTLS tag, Bluetooth tag, stb.) nagy energiaigényű, akkor a sűrű feltöltési / akkucsere időciklus nehezíti a raktári működtetést, azaz logisztikai környezetben nehézségekkel használható a technológia. A vizsgálathoz mindenképpen a szakirodalmat hívtam segítségül, a vizsgált RTLS rendszer üzemeltetéséhez szükséges energiafogyasztást relatív (a rendszerek egymáshoz viszonyított) mértékével hasonlítottam össze egymással. (alacsony / közepes / magas). *B. Gladysz (2017) [74], Faroq Halawa (2017), [68]* A passzív RFID alapú RTLS tag például végtelen ideig képes működni, hiszen a felhasznált energiát az RFID antenna által kibocsátott elektromágneses mezőből nyeri.

A pontossághoz kapcsolódó bekezdésben szó volt róla, hogy *Küpper* 10ms frissítésű időszinkront javasolt az RTLS technológiában a termeléskiszolgáló raktár esetén. A 10ms-os frissítés az RTLS tag számára hatalmas energiaigényt jelent, ezért is fontos ezt a feltételt vizsgálni. Az általam megismert és telepített RTLS rendszerekben a frissítés egyébként nem volt nagyobb 100ms -nál.

A szakirodalomban nem találtam említést róla, de a piacon elérhető rendszerek esetében a saját energiaforrással rendelkező RTLS tag-ek általában tartalmaznak giroszkóp szenzort is. Ez azért fontos, mert ha az RTLS tag nem mozdul, akkor a szenzornak köszönhetően - felesleges energiát használnia az UWB jelek sugárzására. Tehát a mozdulatlan szenzor nem használ saját energiát, - így pedig óriási energiamegtakarítás, - azaz működési idő növekedés érhető el.

Hatótávolság

A paraméter azt mutatja meg, hogy mekkora távolságokon belül szükséges az adott technológiai rendszer variációban az anchorokat, antennákat, vagy egyéb jelfeldolgozó egységeket telepíteni ahhoz, hogy a valós idejű helymeghatározás hibamentesen működhessen. (méter)

Raktár esetében ez a távolság minél nagyobb, annál költségkímélőbb telepíteni az adott RTLS verziót. A korábbi fejezetekben részletezett működés alapján egyes technológiák esetében legalább 3 darab, más technológiák esetében 2 vagy 1 darab Anchor észlelése is elegendő a működéshez, azonban a raktárt kiszolgáló fő funkcionális eszközök sűrűsége miatt inkább minél kevesebb Anchor telepítése a kézenfekvőbb.

Telepítési, beüzemelési költségek

Az egyes RTLS technológiák egyszeri bekerülési költségei (tervezés, telepítés, kábelezés, kalibrálás, tesztüzem) nehezen meghatározható és relatív mutatószámok, azonban a gyártók weboldalain és a szakirodalomban is található olyan forrásanyag, amely kérdőívek stb. segítségével mégis támpontot ad az egyes gyártók összehasonlításával és bekerülési pénzügyi sáv kijelölésével. A vizsgálat szempontjából az a rendszer kedvezőbb, melynek kezdeti beruházási költségei alacsonyabb.

Skálázhatóság, a rendszer bővíthetősége

A dolgozat 6. fejezetében rávilágítok arra, hogy egy-egy RTLS projekt a legtöbb esetben pilot résszel indul, azaz kis területen, vagy egy deklarált szempont szerint leválasztott részen telepíthető első körben. Itt kisebb kezdeti befektetések mellett modellezzük a teljes raktárra, logisztikai egységre vonatkozó mutatószámok teljesülését a technológia bevezetésével. Ha ezen a modellen kedvező eredmények mérhetők, akkor lehet kiterjeszteni a teljes egységre vonatkozóan. A gyakorlat azt mutatja, hogy egy-egy RTLS telepítés kezdetben lassabban, majd 1-2 év múlva dinamikusan kezd el – a lefedendő területek méretét vizsgálva – terjeszkedni a vállalatban belül. Az eredmények és megtérülés általában azt igazolják, hogy célszerű a teljes vállalat területére kiterjeszteni, ezért dinamikus bővítések jellemzik a technológiát. Célszerű tehát olyan technológiai változatot választani, amely technológia esetében szinte „csak” kábelezési és rögzítési kérdés a rendszer bővítése, azaz a rendszer tovább bővíthetősége, skálázhatósága a „végtelenig tarthat” és nem jár a hardver növekvő mennyiségével lineárisan emelkedő költségeken kívül egyéb additív költséggel. A vizsgálat során 1-3 pontig értékeltem a skálázhatóság, bővíthetőség kérdését. (3 pont – a legkönnyebben bővíthető, 1 pont – a legnehezebben bővíthető)

Lehatárolt logisztikai környezetre vonatkozó RTLS technológiai rendszerváltozat kiválasztása – TÉZIS 1.

A korábban lehatárolt logisztikai rendszerváltozatban összegyűjtöttem azt a 6 darab – a szakirodalomban is alátámasztott - legfontosabb paramétert, melyek alapján javaslok megvizsgálni és kiválasztani azt a technológiát, amely legoptimálisabb raktári, intralogisztikai helymeghatározási rendszer megvalósítására. A paraméterek és értékeik az alábbi táblázatban találhatók. Az egyes értékek a szakirodalomban megtalálható javaslatok, adatok, kutatások alapján lettek meghatározva;

Helymeghatározó rendszer típusa	Pontosság (cm)	Automatikus azonosítás és megbízhatóság	Felhasznált energia	Hatótáv. (méter)	Telepítési költségek [68]	Skálázhatóság
INFRA, LÉZER (optikai alapúak)	0,1	IGAZ, de nem megbízható	●	1-5	55k-75k\$	●
RFID	10-100	IGAZ	●	1-25	36k-48k\$	●
BLE	100	IGAZ	●●	1-20	15k-30k\$	●●
WIFI	120-150	IGAZ	●●●	1-50	15k-55k\$	●●●
5G	150-300	IGAZ	●●●●	100-200	50k-90k\$	●●●●
UWB	1-30	IGAZ	●●	1-50	15k-33k\$	●●●

37. ábra - Az egyes RTLS technológiák összehasonlítása

Ahhoz, hogy az összegyűjtött adatok kiértékelhetőek legyenek, szükséges a táblázatot úgy átranzponálni, hogy az egyes függőleges oszlopokban feltüntetett osztályozási paraméterekhez rangsoroltam a leginkább megfelelő technológiát, rangsor alapján elhelyezkedési sorrendben (legjobb helyezés =6, legalacsonyabb helyezés=1, azonosság esetén azonos rang);

Technológia	Pontosság	A.A és megb.	Energia	Hatótáv	költségek	Skálázhatóság
OPT	6	0	4	1	2	1
RFID	4	1	4	3	3	1
BLE	3	1	3	2	6	2
WIFI	2	1	2	4	4	2
5G	1	1	1	6	1	3
UWB	5	1	3	4	5	3

Így meghatározásra kerültek a súlyozásra kerülő halmaz elemei :

$$\{X_{11}, X_{12}, X_{ij} \dots X_{nm}\},$$

ahol X_{ij} : a súlyozni kívánt halmaz elemeit jelöli, az 'i' -dik vizsgálandó technológia és 'j' technológiai paraméter (kiválasztási szempont) esetén, (i= 1,2...6, j=1,2,...6)

Az optimális kiválasztás érdekében súlyozást használtam a vonatkozó szakirodalom [68] *és tapasztalataim rangsora alapján ;

$\{W_1, W_2, W_i \dots W_6\}$ ahol $W_i > 0$, egész szám; az egyes súlyok értéke 'j' technológiai paraméterre vonatkoztatva;

$$\{W_1=, W_2, W_3 \dots W_6\} = \{5,1,4,3,6,2\}^*$$

	Pontosság	Automatikus azonosítás és megbízhatóság	Felhasznált energia	Hatótávolság	Telepítési költségek	Skálázhatóság
Fontosság	5	1	4	3	6	2

Kiszámoltam a normált súlyokat az előző táblázat alapján;

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1.$$

	Pontosság	Automatikus azonosítás és megbízhatóság	Felhasznált energia	Hatótávolság	Telepítési költségek	Skálázhatóság
Fontosság	5	1	4	3	6	2
Súly értéke	0,23809524	0,047619048	0,19047619	0,14286	0,2857143	0,095238095

majd normált súlyozott átlaggal számítva előálltak a felsorolt technológiákra vonatkozó dedikált súlyozott átlagok az alábbi szerint ;

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n w_i x_i$$

	Pontosság	Automatikus azonosítás és megbízhatóság	Felhasznált energia	Hatótávolság	Telepítési költségek	Skálázhatóság	Súlyozással előállított normált átlagok
OPT	1,43	0,00	0,76	0,14	0,57	0,10	3,00
RFID	0,95	0,05	0,76	0,43	0,86	0,10	3,14
BLE	0,71	0,05	0,57	0,29	1,71	0,19	3,52
WIFI	0,48	0,05	0,38	0,57	1,14	0,19	2,81
5G	0,24	0,05	0,19	0,86	0,29	0,29	1,90
UWB	1,19	0,05	0,57	0,57	1,43	0,29	4,10

38. ábra - RTLS kiválasztása súlyozási rendszer alapján

A fejezetben megfogalmazott 6 paraméter és azok fontosságának megfelelő normált súlyozási rendszer alapján egyértelműen megállapítottam, hogy intralogisztikai, raktári környezetben helymeghatározáshoz az UWB alapú (UWB-RTLS) RTLS rendszer használata a legoptimálisabb.

Első hipotézisem, hogy a vizsgált és lehatárolt logisztikai, intralogisztikai környezetre vonatkozóan nem található a szakirodalomban és korábbi saját tapasztalataim alapján olyan kidolgozott és általános módszertan, amely megfelelő technológia kiválasztására alkalmas helymeghatározó rendszerek esetében. Továbbá megállapításra és bizonyításra került, hogy a lehatárolt logisztikai környezetre vonatkozóan az UWB (Ultra Wide Band) alapú RTLS a legoptimálisabb technológiai választás.

A dolgozat későbbi fejezeteiben kizárólag az UWB-RTLS alapú rendszereket vizsgálom.

Ahhoz hogy a rendszer logisztikai jellegű hatékonyságnövelő tulajdonságait vizsgálhassuk, először szükségesnek tartom egy ilyen rendszer valós körülmények közötti bevezetésének legfontosabb lépéseit, illetve az elkészült rendszert reprezentáló eszközöket, összetevőket bemutatnom a dolgozatban.

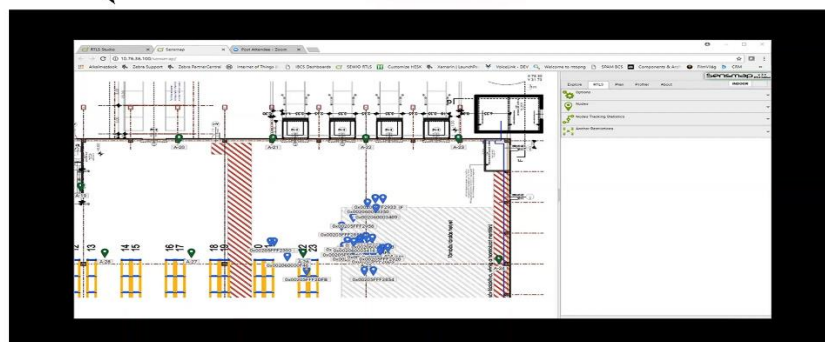
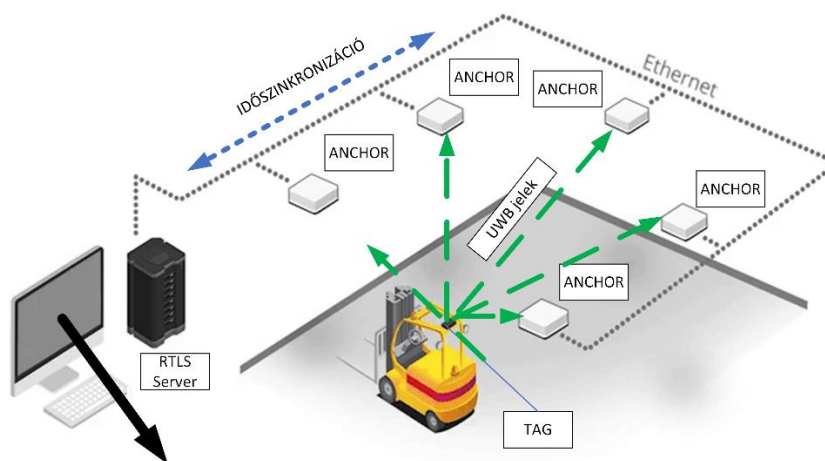
6. Logisztikai folyamatfejlesztés lépései valós UWB-RTLS

rendszer használatával

A kutatási terület megértésének támogatásához szükségesnek tartom hogy az RTLS gyártók jelenleg a piacon elérhető termékeit röviden bemutassam általánosan, - több gyártó valós, megrendelhető rendszereikben történő elmélyülés és megértése után. Három gyártó termékeivel kapcsolatban pedig tapasztalataim is vannak, a legkorábbi telepített rendszer, - melynek során projektvezetőként vettem részt – 7 éve üzemel.

Valós RTLS rendszerek felépítése, jellemzői

A dolgozat „helymeghatározás elméleti háttere” című részében megismert elméleti rendszerparaméterekből összeállítható UWB-RTLS rendszerhez mindenképp szükséges eszközeink az RTLS-tagek, az RTLS Anchorok, egy kiszolgáló nagy sebességű információs hálózat (pl. Ethernet), nagy processzor sebességű RTLS szerver, amely a trilaterációt és időszinkronizációt végzi és természetesen valamilyen kapcsolódó felhasználóbarát interaktív felület, ahol vizualizálva láthatjuk a helyzetmeghatározás végeredményét.



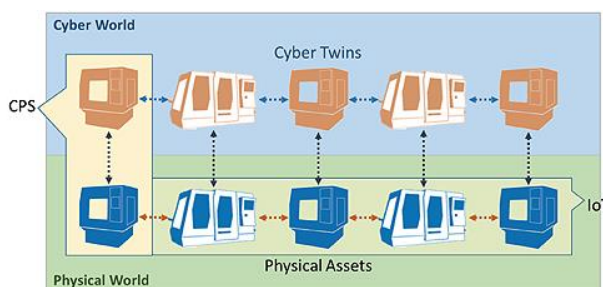
39. ábra - RTLS rendszer alapelemei

A fenti ábrán található elrendezésben látható rendszermodellben egy anyagmozgató gép (targonca) valós idejű helymeghatározása és követése valósul meg. Az RTLS tag valamilyen mechanikai kapcsolattal a targoncához lett rögzítve és installációra kerültek az Anchorok is a raktár mennyezetén, - deklarált mm pontosságú pozíciók mentén. Az Anchorok Ethernet kábelekkel az RTLS szerverrel lettek összekapcsolva csillagpontos hálózati architektúra

alapján. Beállításra került a szabványos UWB kommunikáció az RTLS tag és az Anchorok között, valamint az Ethernet hálózati kapcsolat is beállításra került. Az Ethernet hálózaton történik az időszinkronizáció az Anchorok és az RTLS szerver között, illetve ezen a hálózaton áramlik az UWB alapú rádiós hálózaton észlelt UWB jelek adatai is.

A fenti rendszert alkalmassá tettük arra, hogy 30 cm-es pontossággal minden miliszekundumban ismerjük a targonca valós pozícióját. Látható, hogy a rendszer a felhasználói számára végeredményben pedig olyan vizualizációt nyújt, ahol a valós raktári területet digitalizálva, - a képernyőn térképen nyomon követhetjük a targonca valós idejű mozgását, tevékenységét.

A dolgozatnak nem fő vezérfonala, - de a szakirodalom is hivatkozott többször is rá, - hogy az RTLS egy valódi mintaszerű IPAR 4.0-s rendszer is egyben.



Az Ipar 4.0 klasszikus definíciója szerint a fizikálisan létező termelési- vagy logisztikai rendszerek legfontosabb jellemzője, hogy minden esetben létezik annak digitális ikerpárja. A digitális iker a valós rendszer „cyber” térben történő leképezése, működését, tulajdonságait tekintve pedig alkalmas arra, hogy tökéletesen modellezi a fizikai, valós rendszert.

40. ábra - Ipar 4.0 definíció

A valós rendszeren telepített és összekapcsolt véges számú szenzor segít abban, hogy a digitális másolat megvalósuljon, a szenzorok megfelelően kapcsolat hálózatát pedig összefoglalóan IOT (Internet of Things)-nek nevezzük. Az IOT használatával és segítségével a digitális ikerben gyűjthetők, elemezhetők az összegyűjtött adatok, információk, - majd ezek optimalizálhatók és megoldhatók a problémák a valós iker „megzavarása” nélkül. A digitális ikerben megoldott problémák valamilyen alrendszer vagy esetleg magának az IOT segítségével pedig „visszaültethetőek” a valós fizikai rendszerbe, - megoldva, optimalizálva a korábbi felmerült problémát.

Az UWB-RTLS tipikusan, gyakorlatilag - szó szerint - Ipar 4.0 példarendszer. A definícióban szereplő valós logisztikai rendszert (folyamatokat) az applikációs szerver segítségével vizualizálhatjuk, és valós „másolatot (digitális ikret) kapunk az eredeti (fizikai, valós) rendszerről. A leképezésben pedig maga az UWB technológiai szabvány és a rendszerben dolgozó hardver elemek (Anchorok, RTLS tag-ek) és szabványos adatátviteli protokollok együtt adják az IOT hálózat fogalmát.

A vizualizált logisztikai rendszeren az irodában ülve elvégezhetjük a szükséges vizsgálatokat, elemzéseket, majd optimalizációt és megoldást nyújthatunk az eredeti problémákra. [75]

Visszakanyarodva a valós RTLS rendszermodellhez, ismertetem és bővítem az RTLS szerver fogalmi körét, hiszen eddig kizárólag a pozíció gyors számítását és az időszinkronizációt jelöltem meg a szerver feladatának. A valóságban ennek az RTLS rendszer összetevőnek több feladata is van, azonban először bemutatom a szerver szoftver alapú építőelemeit.

Az RTLS Szerver építőelemei

Az RTLS Szerver vizsgálata alapján két típusra oszthatjuk az installáció után előálló szoftveres jellegű logikai építőelemeket ;

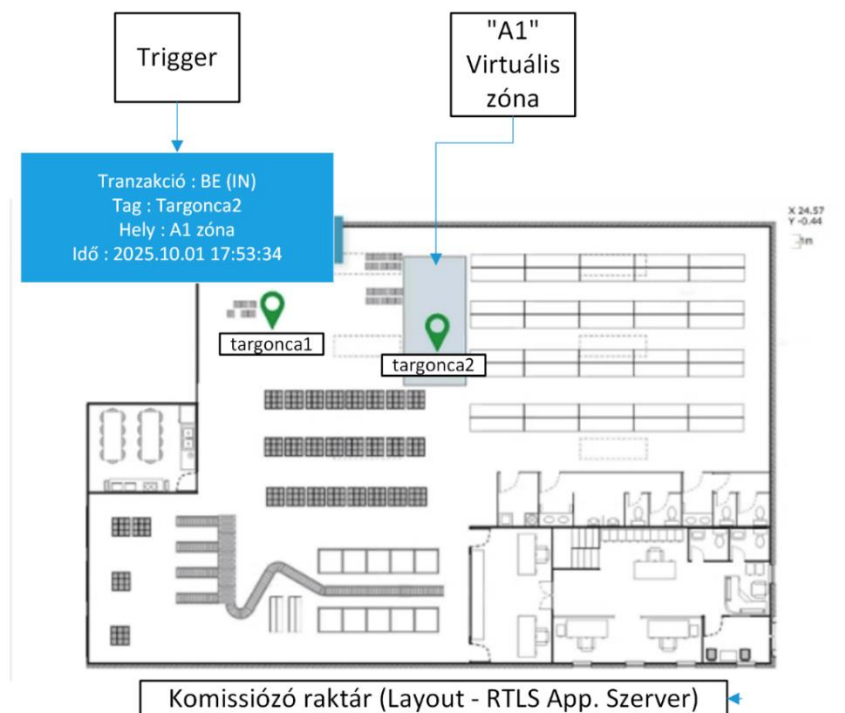
- **RTLS „Core” szoftvermag** ; az eddig megismert rádiós elven érkező jelek, információk hatalmas számítási igényt és nagy processzor sebességet igénylő, automatikus feldolgozását végző önálló algoritmus, melynek segítségével az RTLS-ben mozgó és RTLS tag-el ellátott bármilyen objektum x,y,z koordinátái előállnak, valamint meghatározott rendszeresség alapján ezek RTLS nagyméretű adatbázisban tárolásra (visszakövethetőség) kerülnek, - természetesen időbélyeggel. Ez a rész a többi szoftveres összetevőtől függetlenül működik, sebessége kritikus fontosságú. Nem szakítható meg a működése lekérdezésekkel vagy más egyéb, - a számítási algoritmust hátráltató kapcsolókkal, opciókkal.
- **RTLS „Core” adatbázis** : Az említett „Core szoftvermag” tevékenysége alapján keletkező historikus és időbélyeggel ellátott pozíció adatok adatbázisa. Ebből az adatbázisból „táplálkozik” minden későbbi lekérdezés, amely nyomon követés vagy pozíció lekérdezésén alapul.
- **RTLS Applikációs szerver** ; minden olyan funkciót vagy szolgáltatást nyújtó alkalmazás-szerver, amely az RTLS adatbázisában található adatok alapján adatokat, riportokat, elemzéseket szolgáltat a kapcsolódó felhasználók számára. Szintén használ saját, a Core-tól fizikailag elhatárolható saját adatbázist, azonban ez lényegesen kisebb méretű és terhelésű, inkább nagyobb formátumú jelentések, lekérdezések pufferadatait tartalmazza, - lekérdezés gyorsítás szempontjából.
- **API (Application Programming Interface)** ; Az Applikációs szerver szolgáltatási halmazát nem lefedő információk kinyerésére, lekérdezésére alkalmas konnektor (csatoló), amely előre definiált kérések alapján szolgáltat adatokat az RTLS adatbázisából más külső rendszer(ek) felé. Tipikus kapcsolódó logisztikai információs rendszerek a WMS vagy az FFMS, melyek általában kommunikálnak az RTLS Applikációs szerverrel az API-n keresztül.

RTLS Applikációs Szerver alapszolgáltatásai

Az Applikációs Szerver elérhető szolgáltatási palettája más és más RTLS gyártó esetében más és más (előfordul olyan gyártó is, aki nem ad a rendszeréhez ilyen összetevőt), azonban az ismert 8-10 nevesebb gyártó által kínált logisztikai adatok megjelenítését segítő alapszolgáltatások az alábbiakban foglalható össze;

- **Alapbeállítások** ; Itt szükséges megadni a használni kívánt RTLS alapfunkcióit és beállításait ; Anchor-ok egyedi azonosítása és geometriai pozícióinak (x,y,z) bevitele, RTLS tag-ek egyedi azonosítása, használni kívánt rádiós UWB protokoll, frissítési idők beállítása, autentikáció, titkosítás stb.

- **Layout tervező ;** Általában minden RTLS Applikációs Szerver támogat 2D-s vizualizációs lehetőséget, melynek segítségével a raktár digitalizált síkbeli „másolatán” követhetjük az RTLS tagok dinamikus mozgását. Ehhez a szolgáltatáshoz természetesen be kell állítani a rendszerben a szükséges mértékegységeket (távolságok, idő), digitálisan és mérethelyesen szükséges a rendszerbe integrálni a logisztikai egység alaprajzát. Definálni szükséges a járható és tiltott logisztikai útvonalakat, - azok korlátozásaival együtt (szélesség, magasság stb.). Ez az alaprajz (raktártérkép) lesz a legalsó réteg a vizualizáción, melyen mozogni fognak a követendő objektumaink.
Szükséges mm pontossággal megadnunk és a digitális alaprajzon is megjelölnünk a fizikálisan rögzített Anchor-ok helyét, számozását, jelölési rendszerét is a vizualizáción.
- **Navigációs rendszer ;** A normál kültéri GPS-nek megfelelő térkép (layout) alapú útvonal tervező rendszer, amely megtervezett raktári útvonalak mentén irányítani tudja kezelőjét. A navigációs rendszer a raktárban lévő összes RTLS-tag információt tudja egyszerre kezelni, a navigáció segítségével lehet RTLS tag-ek közötti bármilyen „viszonyt” definiálni. Működése hasonló a hétköznapi életben használt „közösségi közlekedés”-i irányított modellhez, ahol is gyűjtött közlekedési adatok alapján torlódásokat, lezárásokat közvetít a rendszer a közlekedés más felhasználói felé, - hogy el tudják kerülni ezen „dugókat”.
- **Virtuális Zónák (Geofence)** létrehozása az RTLS rendszerben; Virtuális zónának nevezzük azt a bármilyen zárt geometriai sík alakzatot képviselő területet az RTLS vizualizációban, melyet valamilyen szempont alapján vizsgálni, elemezni szeretnénk az alkalmazott logisztikai folyamatban. Egészen pontosan nem is magát a zónát, hanem az abba érkező tartózkodó vagy kilépő objektumokat, melyek RTLS tag-gel követhetőek. Azért virtuális tehát, mert a raktárban található valós zárt geometriai területtel azonos másolaton dolgozunk a digitális ikerben, - az RTLS vizualizációban úgy, hogy a valós területet közben nem zavarjuk. Virtuális zónaként érdemes értelmezni és definiálni (megalkotni) olyan valós területeket, ahol valamilyen tranzakciós tevékenység történik a valós raktárban.
Tipikusan ilyen zónák például ; a beléptető (beérkezési) zóna, a kiléptető (kitárolási) zóna, a kommissiózó zóna, az elektronikus kanban folyamat szempontjából megkülönböztetett fizikai területek, termelés kiszolgáló zóna, veszélyességi zóna, biztonságos zóna, stb.
A virtuális zóna mint egység különleges szereppel bír az RTLS működtetése során, mert az applikációs szerveren létrehozott zónákhoz különböző **triggereket vagy eseményeket** tudunk rendelni, kapcsolni, - melyek automatikusan indulnak / leállnak egy – egy RTLS tag virtuális zónába történő érkezése / kilépése / vagy éppen meghatározott idejű tartózkodása esetében. Például egy kitárolási zónából történő kilépéskor automatikus szállítólevél – generálódik a kapcsolódó könyvelési rendszerben az alkalmazott triggerek segítségével, esetleg éppen a tiltott zónába érkező anyagmozgató jármű vezetője felé automatikus telefonos riasztást küld az RTLS rendszer.
A virtuális zóna nevét tehát onnan kapta, hogy a valóságban nem létezik (legalábbis nincs ténylegesen fizikailag lehatárolva vagy jelezve az intralogisztikai egységben, - azonban az RTLS applikációs szerverén mégis létezik, és pár kattintással létrehozható / megszüntethető / átalakítható / mozgatható az előzőekben megtervezett layout-on.
Ráadásul korlátlan számú virtuális zóna hozható létre általában.



41. ábra – Virtuális zóna és trigger az RTLS applikációs szerver raktári layout-ján

A virtuális zóna (geofence) az RTLS technológia alapköve. A dolgozat eddigi részében pontszerű (pozíció-szerű) helymeghatározással foglalkoztam, azonban a zónák megismerésével egy teljesen más és szélesebb körű vizsgálati perspektíva nyílik ki az RTLS alkalmazhatóságában. Ennek szemléltetésére és érzékeltetésére bemutatok néhány példát, amely a logisztikai iparágban számos helyen bevezetésre került már [29];

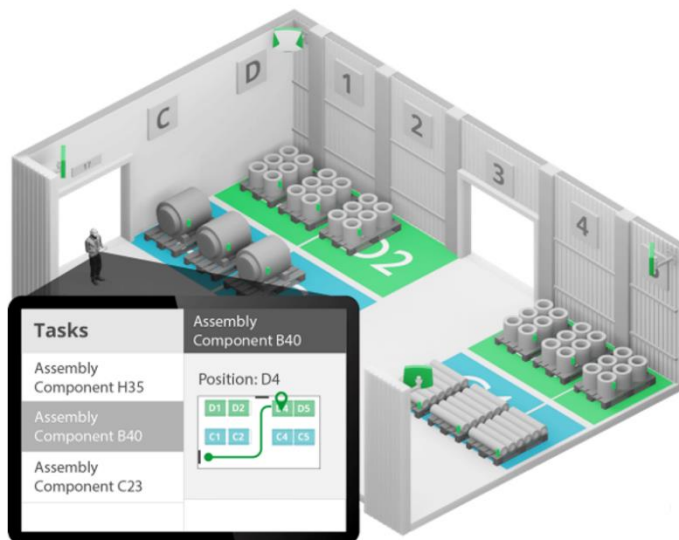


Anyagáram követés és e-kanban :

Felosztható a teljes raktári és termelési kiszolgálási útvonal virtuális zónákra. Minden virtuális zóna **valós műveletet vagy logisztikai folyamat szakaszát** jelenti. A zónába érkező anyag egyrészt információ a vállalati anyagáram adatok feldolgozásához, másrészt egy virtuális zónába érkező anyag triggeret indíthat el automatikusan a raktári WMS rendszer felé (hiányok, többletek, szállítás indítás stb.). Minden zónában tárolt anyagról pontos adataink vannak (mikor érkezett, mikor haladt tovább). A virtuális zónák segítségével **automatikus könyvelést** is beállíthatunk.

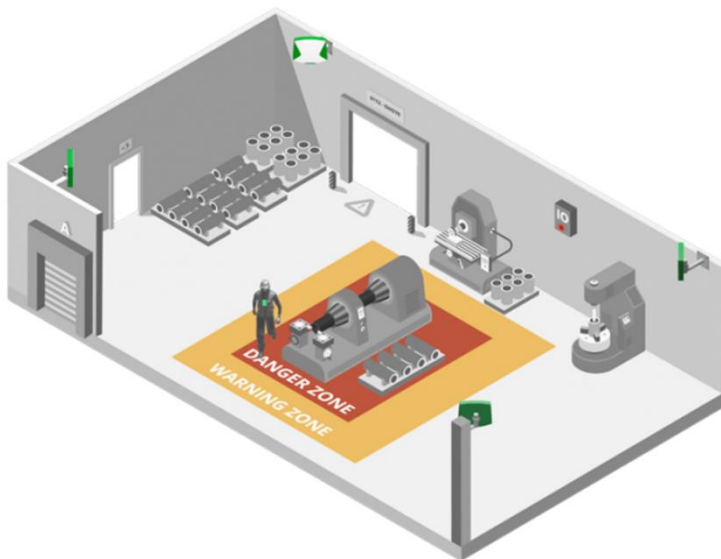
42. ábra - Anyagáram követés és e-kanban RTLS virtuális zónák segítségével

Anyagok keresési idejének csökkentése:



Olyan (általában tömbös tárolású darabáru) raktározás esetében, ahol az elkészült késztermékek rendelési számra vonatkozóan kerültek letárolásra, vagy ha tartani szeretnénk valamilyen FIFO, FEFO stb. kitárolási elvet rendeléseknél, akkor optimális eszköz a virtuális zónák használata. A WMS által generált kiszedési utasításra alapozva **az RTLS rendszer azonnal a megfelelő tárolási pozícióba irányítja vagy navigálja a kiszedéssel foglalkozó munkatársat.**

43. ábra - Keresési idő csökkentése RTLS virtuális zóna használatával



Raktári veszélyzónák vagy művelet korlátozások:

Virtuális zónák alkalmazásával kijelölhetők a raktáron belül olyan zónák, amelyeket valamilyen oknál zárolni szeretnénk (pl. raktári eszköz karbantartása, veszélyes kereszteződés, minőségbiztosítási zárolás stb.). Az ebbe a zónába érkező gép vagy munkatárs egy automatikus triggernek köszönhetően veszjelzést kaphat, vagy egész egyszerűen a zónában lévő anyag, eszköz nem fog automatikusan könnyelődni.

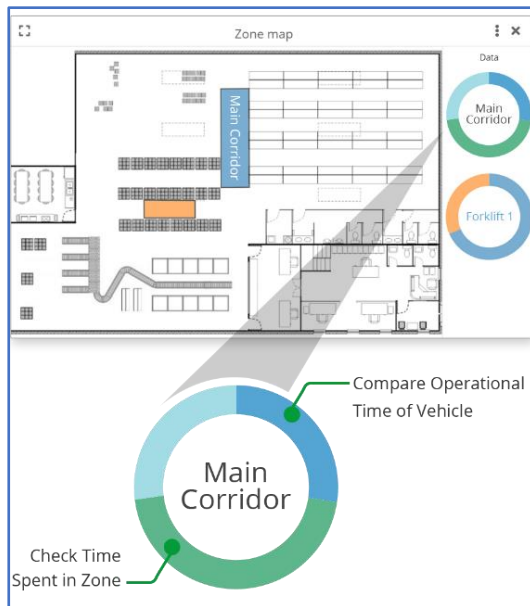
44. ábra - Veszélyzónák létrehozása virtuális zóna segítségével

Az RTLS applikációs szerveren létrehozott layout és a virtuális zónák felhasználásával már tetemes információhalmaz; - ebből pedig vizualizáció és szimuláció is elérhető a logisztikai felhasználók számára.

Az RTLS virtuális zóna a digitális ikerben hozható létre, gyakorlatilag pár kattintás és beállítás segítségével, majd pár pillanat adaptálható a valós fizikai folyamatra. Ez olyan lehetőséget ad a kezünkbe amely páratlan a technológiák között. Minden más RTLS technológia esetében egy ilyen változtatás újrakábelezéssel, hardver eszközök újratelepítésével, a raktári anyagáramok újragondolásával, speciális betanítással stb. jár. A dolgozat késői részében ez az előny kidolgozásra kerül részleteiben.

Az RTLS rendszerek alapszintű vizsgálati szolgáltatásaiba tartozik néhány – logisztikában tipikusan alkalmazott vizualizációs eszköz, melyeket összegyűjtöttem a következő fejezetben.

Logisztikai felhasználókat támogató alapszintű lekérdezési szolgáltatások



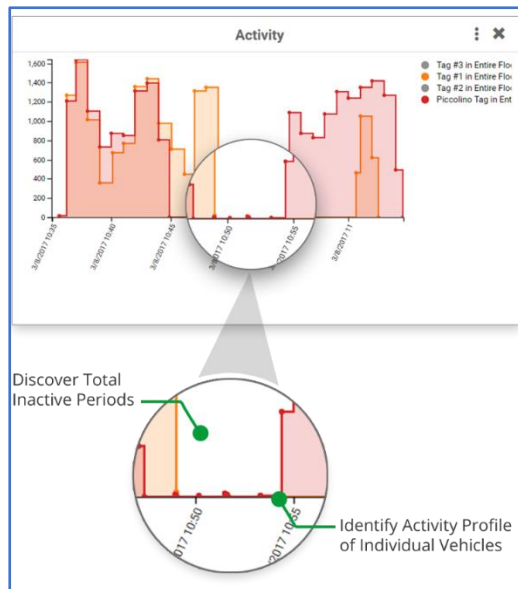
Zónában eltöltött idő vizsgálata:

Az RTLS applikációs szerveren korlátlan számban létrehozható virtuális zónák segítségével mérhetővé válik egy-egy anyagmozgató eszköz / áru (készlet) / munkaező egy helyben vagy dedikált zónában történő tartózkodásának pontos ideje.

Segítségével a produktív / nem produktív időszakok elkülöníthetők egymástól.

Az olyan raktárakban, ahol bérelt munkaező/anyag/eszköz segítségével történik a raktározási folyamat, - a virtuális zónákban eltöltött idő segíti az idő alapú korrekt elszámolás elkészítését (vagy akár automatizálható is teljesen.).

45. ábra - Fizikai zónában eltöltött idő vizsgálata (RTLS szolgáltatás)



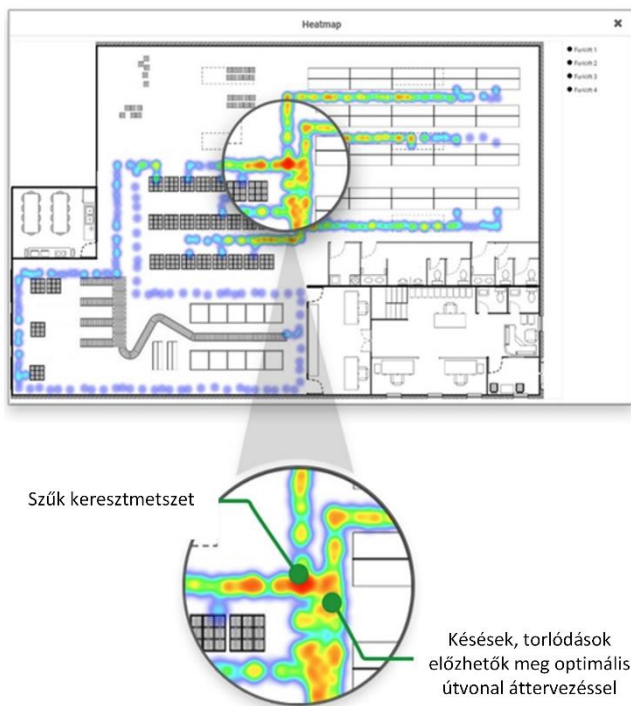
Flotta (anyagmozgató gépek) működési hatékonyságának mérése :

Az anyagmozgató eszközökre rögzített RTLS tag-ek segítségével optimalizálható a flotta általános hatékonysága az inaktív időszakok feltárásával és kijavításával.

Az adatokat arra is felhasználhatjuk, hogy összehasonlítást végezzünk az egyes járművek / járművezetőik hatékonyságában.

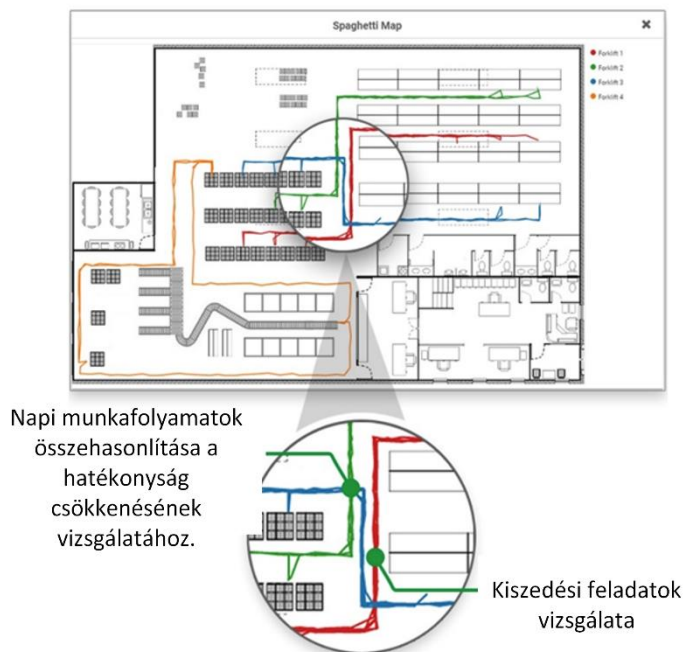
Az eszköz segítheti a túlterheltségek felderítését is.

46. ábra - Anyagmozgató eszközök működési hatékonyságának vizsgálata



47. ábra - RTLS hő térkép (Heatmap)

Így egy vizsgált időszakra jellemző pontok és színek halmazából látványos és könnyen áttekinthető képet kaphatunk a raktár azon területeiről, amelyek szűk keresztmetszetek lehetnek a raktári anyagáramban.



48. ábra - Spagetti térkép

Hő térképek (Heat Map) : blokkoló tényezők és szűk keresztmetszetek feltárása :

A hő térképek segítségével magas szintű folyamat transzparenciát biztosíthatunk azáltal, hogy feltárható a raktári forgalom eloszlása és sűrűsége, valamint a késéseket okozó gyenge pontok vagy szűk keresztmetszetek pontos helye.

A hő térkép lényege, hogy eltérő színekkel jelöljük meg az RTLS tag-ek által szolgáltatott útvonal adatokból a leginkább használt pozíciókat. Minél sűrűbben fordul elő egy fizikai pont használata, -annál erősebb színnel jelöljük meg a raktári layout-on.

Spagetti térkép: Hatékony-e a flotta működése és folyamatos áramlása ?

A spaghetti térkép lényege, hogy egyrészt valós idejű módon, másrészt időperiódusra vonatkozó historikus pozíció adatok mellett a layout-on következővé teszi egy-egy anyagmozgató eszköz vagy áru pontos útvonalát. Eltérő színekkel egy közös layout-on megjelenítható több gép / anyag útvonala a raktárban.

A térkép feltárja a flotta folyamatos áramlásának lehetőségét vagy akadályait a további folyamatok optimalizálása érdekében. [76]

Azonosítja a terület/munka elrendezésének elégtelenségeit, a szállítási pazarlást és csökkenthetők a hozzáadott értéket nem igénylő tevékenységek.

Hangsúlyozom, és azzal a feltételezéssel élek, hogy az RTLS gyártók ugyan más-más kiegészítő szolgáltatásokat adhatnak a kínált rendszerekhez, azonban a felsorolt szolgáltatások alapvetőnek tekinthetők 2025-ben az RTLS piacon.

A dolgozat szempontjából azért volt fontos megemlítenem a valós RTLS rendszerekre vonatkozó építőelemeket és szolgáltatásokat, mert előfordulhat hogy **az RTLS installációja önmagában is tartalmazhatja egy-egy logisztikai igény megoldását**. A legtöbb esetben azonban ez nem így van; **szükséges lehet a WMS-sel vagy FFMS-sel is az integráció egy adott logisztikai probléma megoldásához**. Mindenesetre a fejezet végére összeállítandó bevezetési lépések egyik fontos eleme a kérdés előzetes vizsgálata.

RTLS felhasználási területeinek csoportosítása

Nincsenek deklarált receptúrák arra vonatkozóan, hogy hogyan lehet (szükséges) az RTLS-t adaptálni a leghatékonyabban a logisztikai- anyag vagy értékláncok folyamatok precíz és megbízható támogatásához, azonban a rendszerek telepítésében eltelt közel 1 évtizednyi idő már elég tapasztalattal és kiforrottsággal látott ahhoz, hogy **körvonalazzam azokat a lehetőségeket, folyamatokat, vállalati helyszíneket, eszközöket - ahol az RTLS komoly támogatást jelent a felhasználóknak**. Továbbá támaszkodom a szakirodalmi kutatásban már bemutatott publikációkra is [66], [68], [25] [29]. Három határozottan elkülöníthető felhasználási módját ismertem meg az RTLS rendszereknek, - melyeket ebben a fejezetben foglalom össze.

Művelet követés (folyamat követés) :

Az eltérő folyamatú gyártástípusok közös jellemzője hogy beérkező igények(rendelések) alapján működtetett, és az igények alapján előírt gyártási tervet hajtják végre. A végrehajtás során általában valamilyen MES (Manufacturing Execution System) vezérli a gyártási tevékenységet; rögzíti a gyártási folyamatok során keletkező adatokat, például a gépek teljesítményét, a felhasznált anyagokat, a termelési időket vagy éppen az állásidőket, a hibákat és a minőségi adatokat. Ezeket az adatokat aztán elemzi, hogy azonosítsa a fejlesztési területeket és optimalizálja a gyártási folyamatokat.

A MES segít a termelési tervek kidolgozásában, az erőforrások elosztásában és a gyártási folyamatok ütemezésében, valamint a MES adja a termelés kiszolgálásának feladatait is. Valós időben nyomon követi a folyamatokat, és lehetővé teszi az eltérések azonnali kezelését. A valós idejű mérés a 2010-es évek előtt (és jelenleg is a MES rendszerek többségében) az Ipar 3.0 szabványt (automatizált rendszerek) követték, - meglehetősen bonyolult telepített kábelezési rendszerek és robusztus adatbuszokon történő speciális adatkommunikáció segítségével. Általában PLC vagy számítógép alapú központi szerver ezen gyártórendszerek legfontosabb vezérlője.

Ha a termelési procedúrában (műveletekben) változtatásra van szükség egy ipar 3.0 alapú rendszerben, akkor szenzorok cseréjével, újra kábelezéssel, installációval és központi vezérlő program módosítással tehető meg; jelentős költségeket és átállási időt vonz maga után, - nem beszélve az átállás miatti termelésekiesésről.

Az RTLS tulajdonképpen ebben hozza a legfontosabb fejlődést a művelet követésben ; ha az RTLS-t mint független mérőrendszert használjuk a termékek / anyagok / eszközök nyomonkövetésére akkor a teljes anyagáram folyamat bármely műveletének átalakítása közben

/ mellett és után is sérülésmentesen és változtatás nélkül folyamatosan működik és valós idejű termelési adatok gyűjthetők az anyagáram egészéről. Továbbá az RTLS rendszer fizikai kialakítása is eleve számottevően kisebb költséggel jár mint egy MES mérésadatgyűjtő alrendszerének kiépítése. Természetesen arról az előnyről pedig sosem feledkezzünk meg, hogy a diszkrét térbeli pozíciókhoz kötött diszkrét adatok (0-D, [66]) helyett térfüggetlen és milliszekundumra lebontható historikus adatok állnak rendelkezésünkre az RTLS szerver segítségével.

Az RTLS által művelet követéshez kapcsolható előnyök;

- **A keresési idő csökkentése** ; A munkalapok vagy az alkatrészek könnyen elveszhetnek nagy, nyitott gyártóterekben, darabáros tömbtárolás esetén. Az RTLS az összes eszköz pozícióját valós időben egy digitális layout-on biztosítja a felhasználó számára.
- **Optimalizált anyagáramlás** ; a gyártással kapcsolatos szűk keresztmetszetek, a túlkészletezés és a várakozás (készlethiány) elkerülhető és folyamatosan figyelhető. Az RTLS és az automatizálás összekapcsolása biztosítja a FIFO-t és a just-in-time ki/be szállítást a gyártásba.
- **Triggerekhez kapcsolt automatizált műveletek** : Meghatározhatók virtuális zónák a gyártósarnokban melyek automatizálják a riasztásokat, a munkafolyamatokat, gépbeállításokat, esetleg a triggerek automatikus könyvelést is indíthatnak / lezárhatnak az ERP-ben.
- **Minőségbiztosítás** : A teljes átláthatósággal, azaz hogy ki? , mit? , mikor? és hol csinált?, kevesebb hibát, zökkenőmentes auditokat és megbízható termékminőséget lehet elérni.
- **Okosabb (smart) tervezés** : A valós idejű helymeghatározás minden megrendelés állapotát nyomon követi és minden rendelés kiszolgálása historikusan tárolt adat - amelyre alapozva később optimalizált tervezés érhető el. (Big Data és Ai használatával például)

Humán erőforrások követése

A logisztika az emberekre, dolgozókra is támaszkodik (nem csak a gépekre, berendezésekre), hiszen a karbantartók, operátorok, feltöltők, kiszedők, sofőrök minden logisztikai folyamatban jelen vannak. Fontos kérdéskör foglalkozni a munkabiztonsággal is, hiszen 1 darab baleset is nagyon sok egy logisztikai objektumban.

A munkabalesetek megelőzésének vagy elemzésének pedig elengedhetetlen feltétele az, hogy ismerjük a dolgozók deciméteres pontosságú mozgásának történetét. Ebben segít egy kiépített, - teljes fizikai logisztikai folyamatot lefedő RTLS rendszer.

Az dolgozói mozgásokat követő RTLS rendszert tehát baleset megelőzésre és baleset körülményeinek feltárására használhatjuk első sorban, de ezenkívül számos más előnye is van a technológia ily módon történő használatának;

- A dolgozókra rögzített RTLS tag alkalmas arra is, hogy a papír alapú dolgozói munkaidő nyilvántartásokat felváltsa egy automatikus **digitalizált valós munkaidő nyilvántartás**.
- Megfelelően és jogosultsághoz kötött digitális szabályrendszer alkalmazásával elérhető, hogy a dolgozóra erősített RTLS tag és a ki/be járatoknál létrehozott virtuális zónák segítségével ki és belépési engedélyeket lehet létrehozni a termelés / logisztika fizikai munkahelyeken, - így biztosítva az illetéktelen behatolásokat / belépéseket / munkahely

elhagyások eliminálását. Esetleg a rendszer továbbfejlesztéseként arra is lehetőség van, hogy időben korábban teljesített térbeli mozgásokhoz köthető **a beléptetés**. (pl egy biztonsági őr csak akkor léphet be egy adott üzemi területre, ha előtte már átvizsgált és ellenőrzött más munkahelyeket).

- **Teljes rálátás a munkaerőre.** Pontos rálátást ad valós időben arról, hogy hol vannak a dolgozók az üzemben belül és így elemezhetőek a korábbi mozgási adatok a biztonsági auditok, a megfelelőség és a folyamatos fejlesztés támogatása érdekében. A valós mozgási adatok segítségével zónáhozáférési naplókat állíthatók elő automatikusan, illetve a szűk keresztmetszetek felderítéséhez, az elrendezések egyszerűsítéséhez és az intelligensebb döntések meghozatalához teljes és precíz képet ad, amely később javítja mind a biztonságot, mind a termelékenységet.
- RTLS rendszer **segítségével kereshető meg leggyorsabban egy dolgozó** egy összetett jellegű épületben (pl. kórház), sürgős esetben, - amikor a dolgozó más módon (pl. telekommunikációval nem elérhető).
- **Vészhelyzet / Evakuálás** esetén az RTLS rendszer biztosíthatja azt az információt, hogy minden dolgozó épületen kívülre kerüljön.
- **Balesetek megelőzése** veszélyes zónákban. Az RTLS rendszer mérni tudja egy bent tartózkodás idejét (pl. fagyasztott térben), és riasztani tudja a dolgozót / vezérlőtermet, ha a maximalizált időn felül tartózkodna a térben a dolgozó !
- **Balesetek megelőzése karbantartás során.** Az RTLS rendszer segítségével villamos vagy mechanikus stb. karbantartás során veszélyzónák hozhatók létre a termelési / logisztikai fizikai területen, - melyek segítségével megtilthatók más dolgozók (vagy logisztikai gépek) behatolása a tiltott zónába.
- Ha a logisztikai kiszolgáló mozgó eszközök is RTLS tag-el ellátottak, akkor létrehozható olyan szabályrendszer amely figyelmeztet / beavatkozik arra az esetre **ha ember és gép / esetleg áru találkozása egy megadott biztonsági távolságon belülre** kerül. (pl. híddarukkal történő árumozgatás az üzemben)
- **Műszakváltások optimalizációja, Covid szabályrendszer** (minimális biztonsági zóna két dolgozó között) ellenőrzése, betartásának követése, naplózása, kontakt keresés.

Anyag, készlet, eszköz, szerszám követés

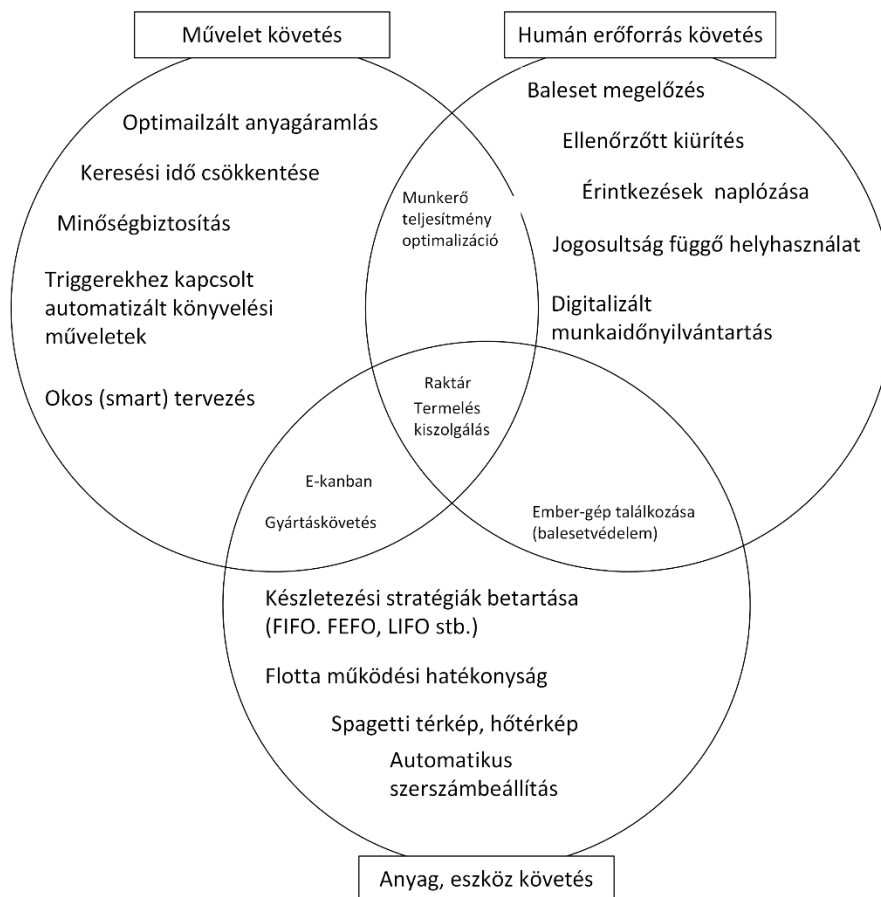
A termelés kritikus fontosságú feltétele az optimalizált anyagáramlás illetve legtöbb esetben annak időbeli folyamatossága és hosszútávú fenntartása. A gyártás során általában mozgó gyártmányok (gyártásban lévő fő termékek), mozgó szerszámok és kiszolgáló berendezések, az egyes műveleti területekhez tartozó alapanyagok, alkatrészek vesznek részt az emberi erőforrások mellett a folyamatban. Az optimalizált anyagáramlás esetén az előírt terveknek megfelelő mennyiségben és minőségben készül el a gyártás során a késztermék, minimalizált gyártáshoz kapcsolódó készletek és költségek mellett. Sok paramétertől függ egy gyártás sikere mely paramétereket alkalmazott RTLS segítségével dinamikusan tudjuk mérni és optimalizálni azaz befolyásolni. A legtipikusabb, leginkább kiélezett és legösszetettebb gyártási körülmény talán a szalagszerű összeszerelő üzem működése. Ennek figyelembe vételével röviden áttekintem azokat az előnyöket melyet egy RTLS szolgáltathat ilyen jellegű gyártási és a kapcsolódó logisztikai feladatok során ;

- legfontosabb **a késztermék (pl.gépkocsi) szerelősori útjának teljes lekövetése** a gyártási folyamaton, - deciméter pontossággal. A gyakorlatban például az első karosszériaelemek összerendelése után meg is kapja a gyártandó termék (autó) az egyedi RTLS tag-es egyedi azonosítását. Az adott megrendeléshez tartozó késztermék összes megrendelő oldali

opciói összerendelődnek a gyártásban mozgó RTLS taggal a háttérben. Így a logisztika, a gyártás kiszolgálás bármely pontján az RTLS-taget érzékelve azonnal kinyerhető háttérinformáció a megrendeléshez kapcsolódó minden opcióval kapcsolatban.

- Az RTLS taggal ellátott késztermék mozgási (műveleti) információi alapján indíthatók a gyártást kiszolgáló ún. **KANBAN kérések** a beépülő alkatrészrel kapcsolatban. A KANBAN szállítmányokat RTLS-sel követve pedig maximálisan összehangolhatók a gyártás során szükséges beépítésre kerülő alkatrészek készletezése a megfelelő és pontos gyártási pozícióhoz.
- A mozgó összeszerelendő késztermék adott **műveleti pozícióhoz érkezésekor az RTLS segítségével automatikusan konfigurálhatók a műveleti helyhez kötött berendezések**, szerszámok, kiszolgáló egységek. Pl. egy adott mérethez vagy típushoz állítja be a gyártórendszer a szükséges meghúzó nyomtatékok nagyságát, vagy például revolveres szerszámfejjel rendelkező szerszámok automatikusan tudnak a revolverben elhelyezkedő szerszámfejekből választani. Jelzést is tud adni a kezelőnek a gyártórendszer, ha esetleg érkezőben van a műveleti helyhez olyan termék, melyhez máshonnan odamozgatandó berendezésre van szükség.
- Az RTLS taggal felszerelt berendezések, alkatrészek, termelési eszközök száma akár több ezer darab is lehet egy gyártásban. Ebben az esetben az RTLS Szerver szolgáltatásainak segítségével olyan komplex adatok is rendelkezésre állnak, melyek teljes egészében mérhetők és figyelhetők a gyártórendszerre jellemző **prediktív karbantartáshoz szükséges előírányzott működési idők**, feltételek tekintetében.
- Jól megtervezett és alaposan digitalizált gyártórendszer esetében a **vevői auditok** a gyártórendszer virtuális ikerpárján is elvégezhetőek, sőt akár on-line bármikor audit tartható vagy visszakereshető egy adott időszáv gyártási története.
- RTLS segítségével a gyártásra meghatározott **kizárások** is elvégezhetőek. Pl. automatikusan álljon le egy termelőeszköz ha fizikailag olyan eszköz / áru párosítás jelenik meg egy gyártóhelyen amely nem kívánatos és kizárandó.

RTLS rendszer tervezésekor mérlegelni szükséges, hogy műveleteket, humán erőforrásokat és anyagokat, eszközöket, szerszámokat milyen kombinációban szükséges követnünk. A fejezetben megfogalmazott követési változatokra készítettem egy összefoglaló halmaz diagrammot, amely segíti a fejezetben elhangzott információk összefoglalását és szerves része lesz a későbbiekben az RTLS bevezetési folyamatának.



49. ábra - RTLS követési stratégiák

Látható, hogy a legkomplexebb RTLS tag-elési feladat a raktár és a termelőkiszolgálás esetében jön elő, hiszen ezekben a folyamatokban mindhárom fogalmi kört követni szükséges. Természetesen a legegyszerűbb az lenne, ha egy megoldandó feladat vagy szükséges optimalizáció keretében a lehető legtöbb embert és objektumot RTLS taggel látnánk el és így vizsgálnánk a teljes rendszert. Felvetődhet az is, hogy a legjobb megoldás az lenne, ha egy raktárban minden darabáru terméket RTLS taggel látnánk el.

Ezek jogos felvetéseknek tűnnek, azonban ezidáig nem fejtettem ki az RTLS bevezetésével és a tageléssel kapcsolatos költségvonzatokat. A következő részében megvizsgálom a kérdést.

Költségek és költségcsökkentési lehetőségek az RTLS bevezetésével kapcsolatban

Ha UWB-RTLS valós idejű helymeghatározási rendszer kialakításában gondolkodunk, például egy intralogisztikai objektum logisztikai folyamatainak vizsgálatához, - fontos megismerni a rendszer kialakításához szükséges felmerülő költségeket, azok eloszlását a bevezetésnél.

Az RTLS rendszer alapeleme az **RTLS-tag. 2025-ben 80 – 100 EUR a költsége** egy-egy UWB szabványos, TDoA és TWR szabványos rádiós kommunikációt ismerő, alap tokozással rendelkező (tehát nem robusztus mechanikai/hő/vízálló) tagnek. Önmagában nem magas költség, azonban a tag-ek általában nagyobb mennyiségben szükségesek egy-egy logisztikai objektum teljes (áru, anyagmozgató eszköz, humán erőforrás, műveleti idők stb.) valós idejű

vizsgálatához, ezért könnyen megeshet, hogy több száz vagy több ezer ilyen tag-re lenne szükségünk. **A nagymennyiségű igény viszont már tetemes költséget jelent, egy ilyen vásárlás pedig minden esetben gondosan megfontolandó.** Ráadásul a korábbi fejezetben megismert bizonytalansági tényezők (raktárban tárolt vezetők, szigetelők, folyadékok miatti pontatlanságok) tovább nehezítik egy-egy nagyszámú UWB-RTLS tag beszerzésének anomáliáit.

A legtöbb projekt ezen a ponton „el szokott bukni”. Ezért nagyon fontos átgondolni azt, hogy mit is akarunk elérni az RTLS használatával. Biztosan szükséges-e minden anyagot követni? Vannak-e olyan megoldási lehetőségek, amikkel csökkenthetőek az RTLS tag-ek száma? Erre több praktika is van már az iparágban; ilyen például az ún. **indirekt követés** vagy **az áru helyett az egységtrakomány-képző eszköz követése.**

Indirekt követés: Nagymennyiségű RTLS tag-el követhető anyagok esetében javasolt módszer, hogy az anyag helyett az anyagmozgató gépet (targoncát) érdemes inkább követni. A targonca ki vagy bevételezéskor rendelkezik a pozíció adatokkal és ha a tranzakciót egy RTLS-től független információs rendszerben (pl. WMS) nyugtázni lehetséges, akkor a két adat (targonca pozíció és a tranzakció nyugta) párosítható elérhető az anyag (áru) követése is. Így jelentős költségmegtakarítás érhető el, illetve megakadályozható egy lehetséges projekt bevezetésének felfüggesztése is.

Az UWB-RTLS rendszert kiszolgáló **Anchorok bekerülési költsége** (implementáció nélkül) nagyjából **300 – 400 EUR / darab** költségösszeg közé tehető. A korábbi fejezetben bemutatásra került, hogy nagyjából 25 méter egy-egy ilyen Anchor hatótávolsága és egy RTLS tag helyének meghatározásához legalább 3 darab, de a gyakorlatban inkább 4 darab Anchor hatótávolságon belüli jelenléte (installációja) szükséges. Az intralogisztikai objektum esetében ez azt jelenti, hogy nagyjából 20-25 méterenként „térháló-szerűen” szükséges ezen Anchorok telepítése, azaz **600 m²-enként szükséges 4 darabot** telepítenünk Anchorokból.

Az Anchorokat a már megismert külső kiszolgáló, - legalább 1 Gb/s hálózati sebességű - Ethernet hálózat segítségével (esetleg WIFI alapú hálózattal, - de ezt kizárólag abban az esetben javaslom, ha más raktári funkciók kiszolgálására már korábban megépült a WIFI hálózat áll rendelkezésre) - szükséges csillag topológiájú kábelezéssel egy aktív hálózati eszközhöz kábelezni, amely biztosítja a további kétirányú információs elérési utat a hálózatban szintén helyet foglaló RTLS szerver felé / felől. Az Anchor és az aktív eszköz közötti kábelhossz nem haladhatja meg a 100 métert. **A kábelezés** általános költsége 2025-ben intralogisztikai objektumok esetében **300 EUR / Anchor -al számolható** (ez tartalmazza a 100 méteres kábelhossz korlát miatti esetlegesen szükséges aktív hálózati eszközök költségét is).

Az UWB-RTLS alapú rendszer legköltségesebb eleme a rendszert kiszolgáló **RTLS szerver**. A szerver önmagában nagy sebességű, több processzoros hardver, operációs rendszer és az RTLS rendszert kiszolgáló applikációt jelenti. Néhány gyártó az applikáción kívül tagekhez, vagy anchorokhoz köt még licenclési díjakat, azonban ezek kisebb mértékűek szoktak lenni, - magához a hardver árához képest. 2000 darab RTLS tag kiszolgálására alkalmas RTLS szerver költségét általában **10.000 EUR** költséggel szokta az iparág számolni.

Természetesen járulékos költség még egy UWB-RTLS rendszer bevezetési díja is, amely magában foglalja ;

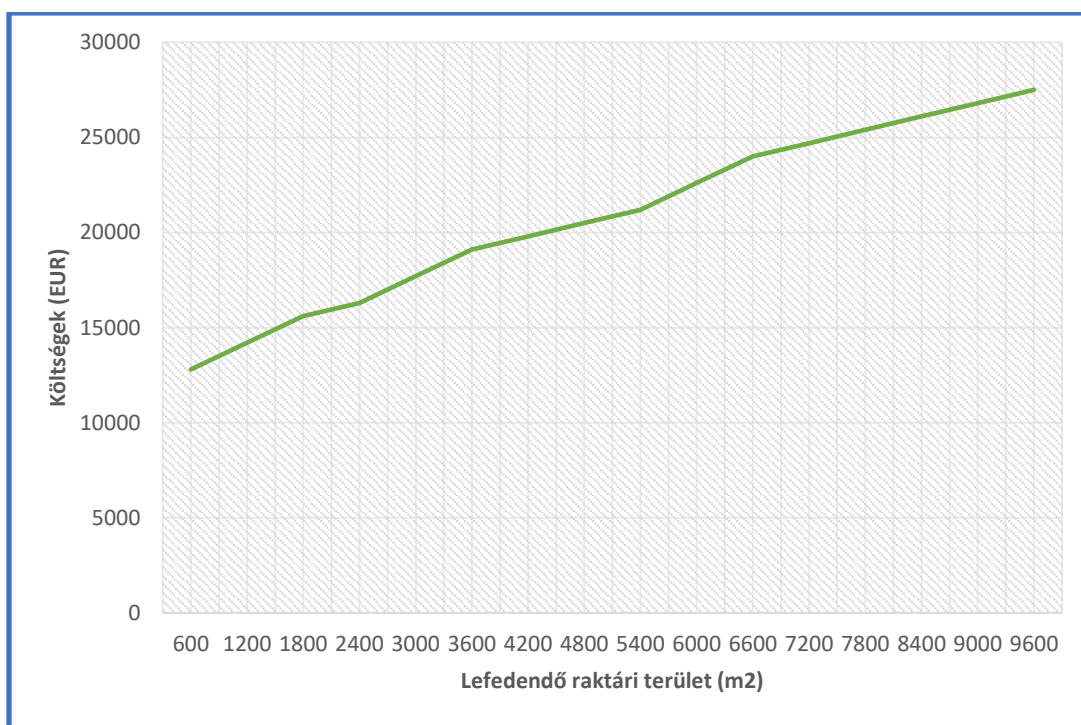
- az RTLS tag-ek felprogramozását : frissítés gyakorisága, adatátvitel típusa (TDoA, TWA), akkumulátorok beállítása,

- az RTLS Anchorok beállítása, geometria pontos felvitele a rendszerbe,
- elektronikus raktári alaprajzi layout felvitele az RTLS rendszerbe,
- RTLS szerver installáció, beállítás, paraméterezés,
- helyszíni tesztek, éles indítás, éles üzemi rendelkezésre állás 1-2 hétig

A bevezetés költsége szolgáltató függő és általában fix összegű díj, azaz nem függ a rendszerben elhelyezkedő RTLS tagek, vagy anchorok darabszámától. A költségek vizsgálata során az egyszerűsítés kedvéért ezért eltekintek ezen költségelemtől.

Ha megvizsgálom egy kialakítandó UWB-RTLS rendszer kezdeti, telepítési és üzembe állítási költségeit a felhasználandó tagek költsége nélkül, akkor

- az eddigiek alapján lineáris eloszlású összefüggést állapíthatunk meg az intralogisztikai objektum vizsgálandó területével összefüggésben,
- illetve fontos megállapítás, hogy a kezdeti költségek egy kisebb (600m²) vagy ez alatti lefedendő térrész esetében is nagy induló beruházási költséget jelentenek egy projekt esetében.



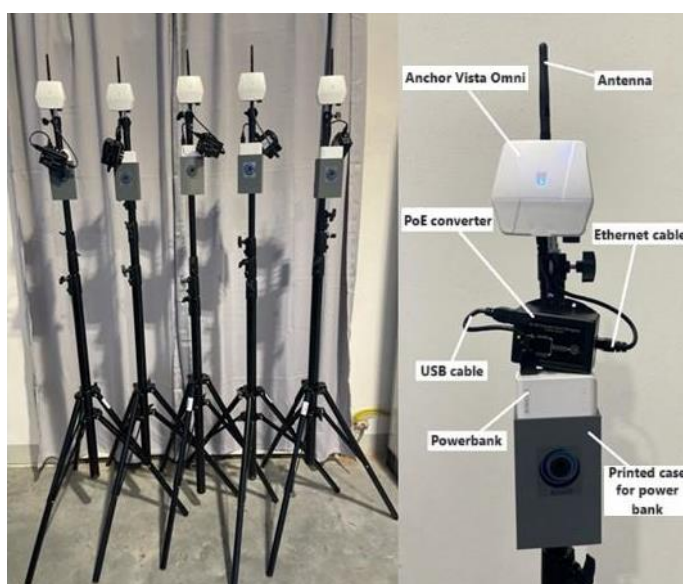
50. ábra - RTLS bevezetési költségek változása a raktár területének függvényében

Hogyan oldható fel az az anomália, hogy jelentős kezdő beruházás allokációja esetén is megállhat egy RTLS bevezetési projekt ? Az iparág erre a kihívásra gyors reakcióval válaszolt.

Pilot projekt lehetősége nagyvolumenű döntés támogatásához

Az UWB-RTLS rendszerek sajátossága, hogy jól és széles tartományban skálázhatóak, azaz viszonylag egyszerűen bővíthetőek. Az UWB-RTLS rendszer pár darab RTLS tag-tól akár több ezer RTLS tag-et is le tud kezelni, mint ahogy 4 darab antennától kezdve több ezer antennáig is le tud fedni szükséges térrészeket.

A kezdeti nagy költségek eliminálása miatt általános bevezetési protokollá nőtte ki magát, hogy az UWB-RTLS szolgáltatók pilot-projekteként ajánlanak egy nagy bevezetés kezdő lépéseként. Ez általában tartalmaz egy mobil és gyorsan összeállítható pilot rendszert; 4-5 Anchorral melyek akkumulátorokkal és mobil állványokkal, valamint WIFI alapú időszinkron protokollal könnyen telepíthetőek, tartalmaznak 10-12 darab RTLS-tag-et, valamint egy egyszerűsített kiszolgáló rendszert (3-4 Anchorhoz nem szükséges komoly hardver a trilaterációra). Ezeket az építőelemeket akár pár óra időtartamban összeintegrálva és a helyszínről készített raktári alaprajzot is mm pontossággal implementálva, gyors és hatékony valamint mérési célokra megfelelően alkalmazható eszköz áll készenlétben. Ezek az eszközök általában az UWB-RTLS szolgáltató tulajdonai; csak a tesztelési időszakra adja bérbe a megrendelő részére. Így tulajdonképpen egy kis kezdeti költségvetésű mintarendszer áll a megrendelő rendelkezésére, melyben elvégezheti az egész intralogisztikai objektumra jellemző (és a későbbiekben kiterjeszthető) alapvető funkcionális tesztek, méréseket. [77]



51. ábra - Pilot RTLS rendszer hardver elemei [77]

Az RTLS pilot rendszerben mért hatékonyságra vonatkozó mutatószámok pedig egész egyszerűen adaptálhatók a teljes raktárra vagy intralogisztikai egységre vonatkoztatva. Amennyiben a hatékonysági mutatók reprezentálják az elvárásokat és a beruházás megtérülése 1 év vagy azalatti, - indulhat a teljes RTLS projekt.

Adatkezelés és integráció más raktári információs rendszerekkel

Az előző fejezetben bemutatásra került, hogy milyen alapszintű szolgáltatásokat tartalmaz általában egy megvásárolt RTLS. A vizsgált szolgáltatások mindegyikére jellemző volt, hogy a vizsgálandó objektum valamilyen logisztikai információs rendszerre vonatkozó azonosítóval volt jelölve (áru1, áru2, dolgozó_ID, targonca_ID stb.). Ebben a bekezdésben bemutatásra kerül, hogyan szokták az UWB-RTLS tag-eket összerendelni és összekapcsolni a logisztikai információs rendszerekkel, illetve hogyan lehet integrálni a tag-ek pozícióadatait más rendszerekbe is. Utóbbi azért fontos kérdés, mert **általában nem elég az RTLS alapszolgáltatásainak adatinformációs kínálata, szükség szokott lenni a már meglévő információs rendszerekhez is kapcsolódni**, - legfőképpen automatizált műveletek kialakítása végett.

Az eddig megismert RTLS működés és a szakirodalom alapján [65], [63], [29] a legfontosabb teendő, hogy a teljes raktári vagy logisztikai folyamat legelső műveleteként **kapcsoljuk össze az RTLS tag egyedi azonosítóját és a követni kívánt logisztikai objektum azonosítóját egymással, „1- az 1-hez” adatszerkezet alapján.**

Mit is jelent ez a gyakorlatban? A raktári RTLS kiépítése előtt a szállítmánynak / árunak / erőforrásnak létezett valamilyen WMS, ERP, FFMS vagy egyéb más rendszerbeli azonosítója. Az RTLS telepítésével szükséges továbbra is megtartani ezt az azonosítót, hiszen az RTLS a logisztikai információs rendszertől független helymeghatározással foglalkozó támogató, kiegészítő rendszer. Az RTLS nem fogja átvenni a könyveléssel kapcsolatos műveleteket, hanem segíteni, gyorsítani, egyszerűsíteni, támogatni fogja azt, úgy hogy működéséhez belső azonosítót használ, mégpedig az RTLS-tag egyedi UWB jeléhez kapcsolva.

Ezt a kiegészítő, gyorsító, egyszerűsítő, támogató funkciót a szakirodalom az RTLS legerősebb előnyének szokta nevezni, nem véletlenül;



52. ábra - Raktári adatbeviteli műveletek csökkentése RTLS alkalmazásával

Az ábrán látható egyszerűsített raktári folyamatban a bal oldalon látható a hagyományos modellű raktár adatkezelési folyamata. Az egyes raktári műveletek előtt és/vagy után adatbeviteli számítógépes pont, RF terminál vagy RFID olvasó segítségével szolgáltatható a művelethez tartozó adat bevitele a WMS rendszerbe. Ezek az adatbeviteli műveletek körülményesek, **időigényük van és tévesztésre adnak lehetőséget; ráadásul két művelet között nincs információk a követett objektumról.**

Ezzel szemben a jobb oldali, RTLS rendszerrel támogatott raktári folyamatban rögtön **az első lépésben összerendelésre kerül a követendő logisztikai objektum WMS rendszerbeli egyedi azonosítója és az RTLS támogató rendszerbeli egyedi azonosítója.** Mivel innen indulva deciméteres pontossággal tudja követni az RTLS az objektumot, a megfelelően kialakított raktári rend segítségével az egyes műveletek elvégzését reprezentáló információk (adatok) automatikusan generálhatók a WMS számára (pl. virtuális zónák alkalmazásával). A fenti példában 5 információs adatbevitelt lehet mellőzni a WMS rendszerben. Itt is követhető az objektum két WMS adatbeviteli információs pont között.

Adatkezelési szempontból a legfontosabb teendő tehát, hogy a **legelső raktári művelet előtt az RTLS tag azonosítója és a WMS rendszerbeli azonosító összerendelésre** kerüljön. Ez azért is fontos, mert a később kialakításra kerülő digitális iker így az egész logisztikai objektum

műveleteit le tudja fedni és így bevezetés után a folyamat legelső elemétől flexibilisen változtatható a teljes raktári folyamat bármely eleme.

Magát az összerendelést általában vonalkód (vagy RFID alapon) szokták elvégezni, egész egyszerűen az RTLS tag-et ellátják a burkolatára (vagy burkolatába rejtett RFID) rögzített egyedi azonosítóval, majd ezt leolvassa párosítható a WMS rendszerbeli azonosítójával.



53. ábra - Tokozott RTLS tag vonalkódos jelöléssel

Létezik egy másik módszer is erre vonatkozóan, melyről a szakirodalom és az RTLS gyártók weboldalain sem találtam információkat; Ha virtuális zónát alkalmazunk „**Összerendelési Zóna**”-ként, akkor elég az RTLS-taget (és kizárólag csak az összerendelő taget !) fizikailag ebbe a zónába helyezni és ekkor beolvasni az áru / anyag vonalkódos azonosítóját. A háttér rendszerben (WMS) pedig ezek automatikusan összerendelhetők. Különösen akkor előnyös az összerendelést így megoldani, ha körülményes az RTLS tag elérhetősége (magasabb palettán van, zárt műanyag részben van, stb.). A logisztikai folyamat záró művelete pedig az összepárosított RTLS tag-ek és WMS azonosítók szétválasztása egymástól, azaz az RTLS tag-ek „**felszabadítása**”. Ez azt jelenti, hogy a felszabadító művelet után elveszti az RTLS tag az üzleti logikában hozzárendelt WMS azonosítót, - így a tag **újra szabadon felhasználhatóvá** válik. Ezt a műveletet szintén egy erre a célra létrehozott virtuális zónában lehet elvégezni.

Az információs folyamatot tovább elemezve, áttekintem a szükséges adatkapcsolatokat az RTLS és a WMS rendszer között.

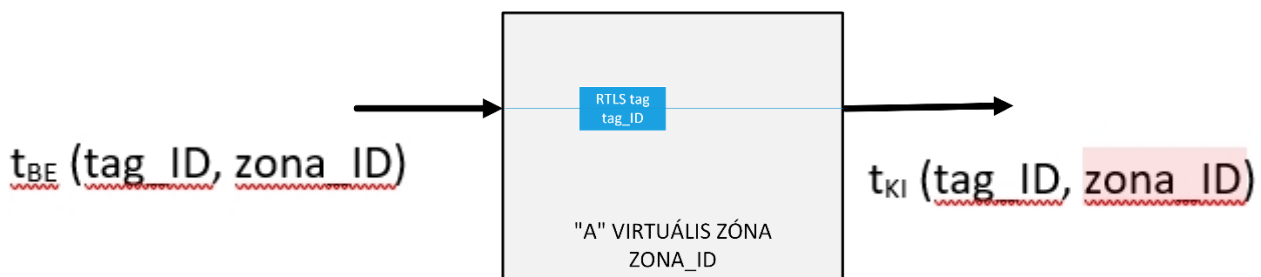
A WMS vagy az ERP rendszerek alapvetően tranzakció alapú információs rendszerek, ami azt jelenti, hogy adatállapotukban akkor történik változás, ha a logisztikai folyamatban is változás, művelet történik. Tipikus logisztikai műveletek, események (anyagáramlási műveletek) egy raktárban a következők ;

- Bevételezés (egylépéses, kétlépéses)
 - Érkeztetés
 - Betárolás
- Crossdocking (Betárolás nélküli Kiadás)
- Tárolás
- Áttárolás
- Kommissiózó utántöltés
- Kiszedés (Kommissiózás)
- Kitárolás
- Revidieálás
- Szállítási összevárás
- Csomagolás
- Expediálás

- Leltár

Ha a fenti logisztikai műveleteket elemzés alá veszem, akkor az egyes műveletekhez tartozó adatigényeket jól jellemzi az egyes műveletekhez tartozó bizonylat (művelet végét reprezentáló dokumentáció) azonosítása. Ha ezen bizonylatok sokaságát vizsgálat alá vetjük, megállapítható, hogy az egyes részműveletek közötti térben és időben – a WMS adatigénye szempontjából – nincs relevancia, azaz elegendő információ a művelet végét jelző térbeli (pozícióbeli) és időbeli (dátumbélyeg) adat.

A fentekből következik, hogy az RTLS legoptimálisabb adatintegrációs objektuma tehát a virtuális zóna. A virtuális zónát úgy szükséges a digitális ikerben kialakítani, hogy egy-egy logisztikai műveletet fedjen le, amely minden esetben releváns adatnak minősül a WMS szempontjából. Tetszőleges virtuális zóna legfontosabb adatait vizsgálva a következő megállapításra jutottam;



54. ábra - Virtuális Zóna adatszerkezete

t_{BE} ; A „tag_ID” azonosítóval rendelkező RTLS tag „zona_ID” virtuális zónába érkezésének időpillanata,

t_{KI} ; A „tag_ID” azonosítóval rendelkező RTLS tag „zona_ID” virtuális zóna elhagyásának időpillanata,

A fentiekből következik, hogy egy adott logisztikai művelet elvégzésének időszükséglete :

$$T = (t_{KI} - t_{BE})$$

Adat-integrációs szempontból tehát ;

- az RTLS tag azonosítója,
- virtuális zóna azonosítója,
- a virtuális zóna történő belépés időpontja és
- a virtuális zónából történő kilépés időpontja

A legfontosabb és elegendő adatok ahhoz, hogy a WMS és az RTLS szinkronban maradjanak egymással.

Az RTLS bevezetés utáni életciklusa

A fejezetben az UWB-RTLS valós telepítési és üzemeltetési körülményeit vizsgáltam és ennek kapcsán fontos megvizsgálni egy ilyen rendszer valós kronológiáját is. A fejezet elején szó volt arról, hogy a kezdeti, bevezetési magas és esetleg bizonytalan költségeket pilot projekt alkalmazásával lehet finomítani, illetve a beruházást kellően megalapozni a kis költségvetésű pilot-ban mérhető adatok gyűjtésével és elemzésével. Ha a pilot elegendő információt, és az információkon alapuló döntési helyzetet biztosított a felhasználónak ahhoz, hogy a rendszer teljes logisztikai folyamatra történő kiterjesztése megtörténjen, - tulajdonképpen rohamléptekben megindulhat az UWB-RTLS rendszer fizikai kiépítése, kábelezése, szerverek telepítése, szolgáltatások beállítása és a pontos digitális iker elkészítése.

A bevezetés elindítása után elindul az RTLS életgörbéjének első fontos fázisa, **az adatgyűjtési fázis**.

Az adatgyűjtési fázisban a felhasználók kijelölik azokat a területeket, eszközöket, erőforrásokat, melyeket időben és térben mérni, vizsgálni szeretnének. Átgondolják és elkészítik azokat virtuális zónákat (valós területeket) melyek segítik a logisztikai folyamat pontosabb átláthatóságát, vizsgálatát. Finomhangolják a szükséges mérési időintervallumokat ; azaz mit? hol? milyen időfelbontásban szükséges vizsgálni? Beállításra kerülnek a rendszer határok ; meddig szükséges vizsgálni a logisztikai folyamatokat ?

Ha ezek elkészülnek és beállításra kerülnek az RTLS rendszer fokozatosan elkezd gyűjteni a historikus adatokat az adatbázisban. Néhány hét vagy hónap után pedig egyre pontosabb és egyre látványosabb vizuális jellegű információt, áttekinthető képet, összefüggéseket biztosít a logisztikai felhasználó számára.

Előtérbe kerülnek az addig nem pontosan mért szűk keresztmetszetek, kapacitás egyenetlenségek, kihasználatlanságok vagy éppen túlterhelések. A fejezetben megismert RTLS alapszolgáltatások egyértelműen változtatni szükséges idő és térbeli pontokat jelölnek ki a logisztikai folyamatban.

A felhasználók ennek kapcsán átgondolják a folyamatot, optimalizációt végeznek, és módosításokat eszközölnek a fizikai folyamatban, - melyet úgy tudnak leginkább biztosítani, hogy továbbfejlesztik / átállítják az eddigi adatgyűjtő üzemmódban operáló RTLS rendszert – folyamat menedzsmentre is. (pl. külső integrált rendszerek felé triggereket építenek be azért hogy megkorlátozásokat tudjanak eszközölni a fizikai folyamatban)

Tulajdonképpen innen indul az RTLS életciklusának „második” fejezete, amikor is az adatgyűjtésen (input kommunikáció) alapulva már kiegészítik a beavatkozás lehetőségével is (output kommunikáció). Ezt a kronológiai ciklust nevezzük az RTLS **folyamatmenedzsment fázisának**.

A folyamatmenedzsment fázisban üzemelő RTLS rendszer az előzetesen megfogalmazott és rendszerben paraméterezett idő vagy térbeli feltételek teljesülése / vagy éppen nem teljesülése esetén riasztja a digitális másolaton logisztikai felhasználóját és ezzel egyidőben az API modulján keresztül elektronikus jelet, információt küld egy külső kapcsolt rendszer felé (pl. riasztás, megállítási, könyvelési megállítási, logisztikai folyamat leállítása / indítása / beavatkozás kérése.)

A később kiforrott, átgondolt, tesztelt és bevált folyamatmenedzsment fázisban tulajdonképpen már nincs is szükség a digitális másolaton történő állandó figyelésre, hiszen a

rendszer automatizálttá vált, tehát gyakorlatilag az eddig mérésre használt eszköz átalakul automata folyamatvezérlő rendszerre.

Természetesen nincs kőbe vésve hogy az RTLS-nek ezt a két lépésből álló evolúciót szükséges végig járnia, de a gyakorlati, üzemeltetési tapasztalatok alapján ezt a két fázist lényeges megkülönböztetni egymástól.

Előfordulnak olyan felhasználók (vállalatok), akik kizárólag mérésre használják az RTLS rendszert és manuálisan avatkoznak be / változtatnak a logisztikai folyamaton. Előfordult már olyan felhasználó is, aki viszont kizárólag a folyamatvezérlő fázisában használja az RTLS-t, mert a legkézenfekvőbb eszköz térbeli és időbeli vizsgálatra és ezzel egyidőben beavatkozásra.

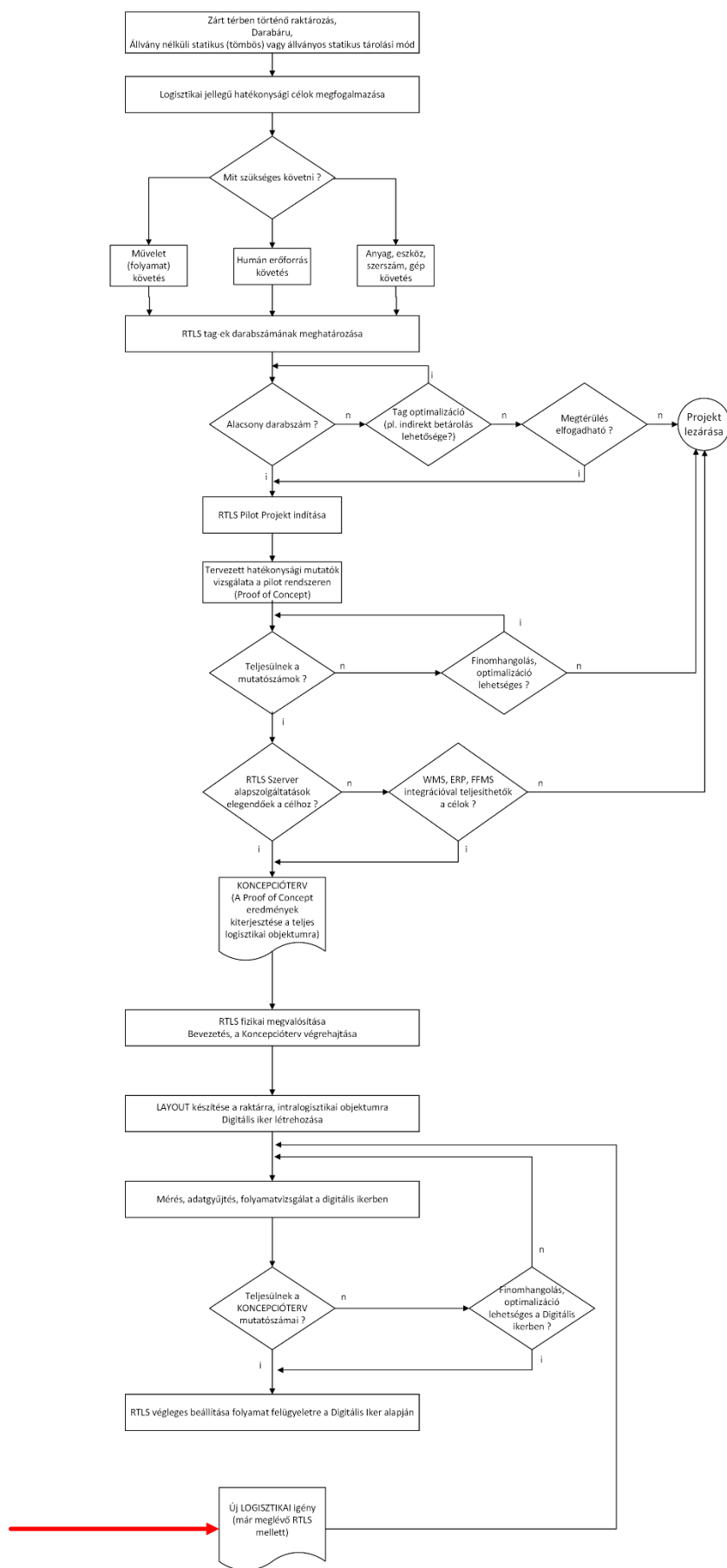
Az evolúciós fázisok körforgás-szerűen is váltogathatják egymást; azaz mérünk, optimalizálunk majd beavatkozunk, - és ezután újra mérünk, tovább optimalizálunk és még szofisztikáltabban avatkozunk be a logisztikai vagy anyagáramlási folyamatokba.

Az RTLS bevezetésének folyamata, a folyamatfejlesztés lépései, TÉZIS2.

Az 5. fejezetben vizsgálatra került minden olyan tevékenység, lépés, megelőző elemzés, körülmény amely az RTLS bevezetésének és használatának lépéseit és a lépések megtételekor felmerülő szükséges vizsgálandó kérdéseket mutatta be. Bemutatásra kerültek a korábbi fejezetben lehatárolt logisztikai rendszerváltozat megvalósítására alkalmas RTLS rendszer alapszolgáltatásai, összegyűjtöttem és elemeztem azokat a kérdéseket, melyeket minden esetben meg kell vizsgálni egy RTLS bevezetés előtt. Javaslatot fogalmaztam meg arra vonatkozóan, hogy mik azok az elkerülendő sarokpontok, amelyek akár meg is akadályozhatják, vagy zátonyra vihetik egy logisztikai hatékonyság javítására alkalmazandó RTLS rendszerprojektet. Megpróbáltam meghúzni azt a határvonalat, ami megmutatja hogy önmagában alkalmas-e az RTLS-t alapszolgáltatásával logisztikai hatékonyság növelésre, vagy szükséges más információs rendszerekkel is az integráció. Az integráció kapcsán megvizsgáltam a legfontosabb adatok körét, melyek mellett elvégezhető a hatékony integráció.

A vizsgálat közben pedig összeállt az a javasolt folyamat, amely röviden és tömören reprezentálja a fejezetben részletesebben megfogalmazott, egymásra épülő és visszakanyarodó kérdéseket, lépéseket.

A lépések egy összeállított **folyamatábrában** testesültek meg; **egy lehatárolt logisztikai rendszermodellben RTLS rendszer bevezetésének kérdései és lépései, valamint logisztikai környezetbe történő beillesztése és használatának kronológiai állapotait mutatja be.**



55. ábra - RTLS rendszer bevezetésének, használatának lépései

A fenti folyamatára megrajzolásával dolgozatom második tézisének megfogalmazásához érkeztem. Második tézisemben kidolgoztam egy folyamatot arra vonatkozóan, hogy milyen lépésekben javasolt logisztikai hatékonyságot javító UWB-RTLS rendszert bevezetni és működtetni egy lehatárolt modell esetén. A lépések azonosításánál figyelembe vettem azokat a külső és belső feltételeket, amelyek vizsgálata nélkülözhetetlen ahhoz, hogy a kívánt célt elérjük. Az egymásra épülő lépések feltételrendszere a tézisemet reprezentáló folyamatábrából vizuálisan megismerhető, könnyebben átlátható. A folyamatára elágazási pontjait reprezentáló kérdések dolgozatom ezen fejezetében részletesen feltárára és kidolgozásra kerültek.

7. Hatékonysági mutatószámok (KPI-k) RTLS technológiával támogatott raktárak esetében

Az előző fejezetben megismert és kidolgozott RTLS működtetése után szükséges olyan mutatószámok meghatározása, melyek mentén értékelni tudjuk az RTLS fejlesztés gazdaságosságát, hatékonyságát. A vállalatok minden fejlesztési lehetőséget kizárólag rövid időtávon belüli (általában <1,5 év) megtérülés esetén vizsgálnak meg, ezért szükség van néhány KPI (Key Performance Indicator) definiálására, melyek alkalmazásával a beruházás megtérülése visszaigazolható.

Az RTLS megtérülésének mutatószámai szorosan kapcsolódnak a raktári logisztikai mutatószámokhoz, azaz onnan indukálódnak. A logisztika egyik jellemzője, hogy folyamatosan méri a teljesítményeket, azokra mutatószámokat dolgoz ki. Ezután a mért eredményeket összehasonlítja az elvárásokkal, és az így kapott eltérések alapján beavatkozik, és a kívánt irányba befolyásolja a folyamatot. Az RTLS ezt az optimáló folyamatot támogatja; a rendszer feladata hogy a mért jellemzőket mélyebben, pontosabban feltárja, - majd beavatkozással javítsa.

A szakirodalmi kutatás eredményeképpen sikerült 20-28 KPI-t összegyűjteni és a raktári működéstől függő vállalati stratégiák alá csoportosítani, azonban ha részleteiben, összetevőiben kezdem el elemezni és egyszerűsíteni ezeket a mutatószámokat akkor lényegesen kevesebb dimenzióval rendelkezőt tudok azonosítani a mutatószámok körében.

1. **Kvantitatív KPI;** mely a raktárnak valamilyen mérhető fizikai mennyiséghez kapcsolható mutatószámát reprezentálja;
 - időhöz (mint fizikai fogalomhoz) kötött KPI-k,
 - költséghez kötött KPI-k,
 - darabszámhoz, súlyhoz, térfogathoz tehát anyagmennyiséghez kötött KPI-k,
 - pontossághoz kötött KPI-k,
2. **Kvalitatív KPI;** mely a raktárnak valamilyen minőségi, kényelmi, működtetési környezeti, vagy jövőbeni könnyű fejlesztetheiséget reprezentáló tulajdonságát mutatja;
 - ergonómia, munkabiztonság,
 - reziliencia, rugalmasság,
 - fenntarthatóság, környezetvédelem,

- továbbfejlesztési lehetőségek,

A kvantitatív mutatószámokon kívül azért van szükség a kvalitatív mutatószámok vizsgálatára is, mert a mérhető mennyiségi egységekre vonatkozó mutatószámok nem reprezentálják teljeskörűen azokat a raktári tulajdonságokat vagy képességeket, melyek a gazdasági környezet gyors és szélsőséges kilengéseket okozó kihívásai miatt – egy raktári működtetés képes lekezelni. A dolgozat bevezető részében kifejtett logisztikai kihívásokra hivatkozva fontos, hogy egy raktári objektum reziliens működésű legyen, - mert egy korábban optimalizált, hatékonyan működő raktár is azonnal rossz mutatószámokat tud produkálni szélsőségesen megváltozott gazdasági környezetben.

A szakirodalmi feldolgozás során arra a következtetésre jutottam, hogy a KPI-k legfőbb vizsgálati szempontrendszere a **raktári költségek csökkentése, a raktári kiszolgáló és belső folyamatok idejének csökkentése és a raktári anyagáramok optimalizációja** valamint **munkabiztonság és digitalizáció fejlesztésének lehetősége**. Ha ezeket az előbbi csoportosítás alapján szeretném besorolni ;

Kvantitatív KPI-k;

- raktári kiszolgálás / belső raktári folyamatok ideje (idő),
- raktári anyagáramok (útvonal hossz),
- pontosság (%)
- raktári költségek (pénz)

Kvalitatív KPI-k;

- munkabiztonság fejleszthetősége,
- digitalizációs előnyök,

A KPI-k rendszerezésére alkalmas logisztikai rendszerváltozatok összehasonlítása

A hatékonysági mutatók összegzésére **két raktári rendszerváltozatot hasonlítok össze egymással ;**

- WMS információs rendszerrel támogatott raktár,
- WMS és RTLS integrációjával támogatott raktár,

A vizsgálat alól a WMS-sel sem rendelkező raktárakat azért zárom ki a vizsgálati halmazból, mert ott a logisztikai folyamatvezérlés papír alapú. Ilyen raktárat az RTLS a korábban ismertetett alapszolgáltatásaival tud csak támogatni, a hatékonysági mutatószámok tekintetében pedig nem értelmezhető (nem a raktári menedzsment rendszer működési hatékonyságától függő) nagyságú mutatószámokat reprezentálna, a nem konzekvens raktárirányítás következtében.

A továbbiakban tehát a kizárólag WMS-sel rendelkező raktári változatot hasonlítom össze és elemzem a WMS és RTLS integrációval ellátott változattal szemben.

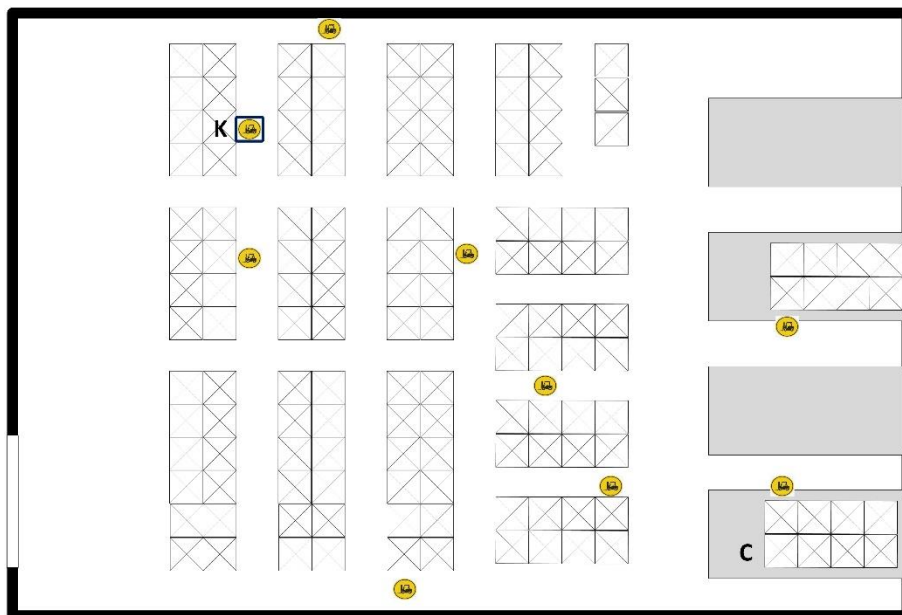
Kvantitatív KPI-k összehasonlítása;

A két rendszerváltozat összehasonlításához szükséges a raktári folyamatok felőli megközelítéssel megvizsgálni a kijelölt mutatószámok előállításának pontos körülményeit. Az

előző fejezetben már ismertetésre kerültek a legfontosabb folyamatok, melyek általánosan leírják egy raktár működését ;

- Bevételezés (egylépéses, kétlépéses)
- Crossdocking (Betárolás nélküli Kiadás)
- Tárolás
- Áttárolás
- Kommissiózó utántöltés
- Kiszedés (Kommissiózás)
- Kitárolás
- Revidieálás
- Szállítási összevárás
- Csomagolás
- Expediálás
- Leltár

A folyamatok döntő többsége **tárolási jellegű művelet**, - ami úgy modellezhető a következő ábra segítségével, - hogy **egy anyagmozgató gép vagy kézi anyagmozgatás esetén a humán erőforrás „K” kezdőpontból kiindulva „C” célpontba juttat el valamilyen útvonalon egy árut a raktárban belül**. WMS-sel irányított raktár esetében az optimális működtetés vagy az esetleges prioritások alapján az azonosított anyagmozgató gép (vagy annak azonosított kezelője) egy feladat kiosztási rendszer alapján a raktári menedzsmenttől kap egy diszponálási feladatot, amely valamilyen szállítási feladat „K” kezdőpontból kiindulva egy „C” célpontba juttatja az anyagot (árut).



56. ábra - WMS-sel támogatott raktár tárolási feladat (K->C) vázlata

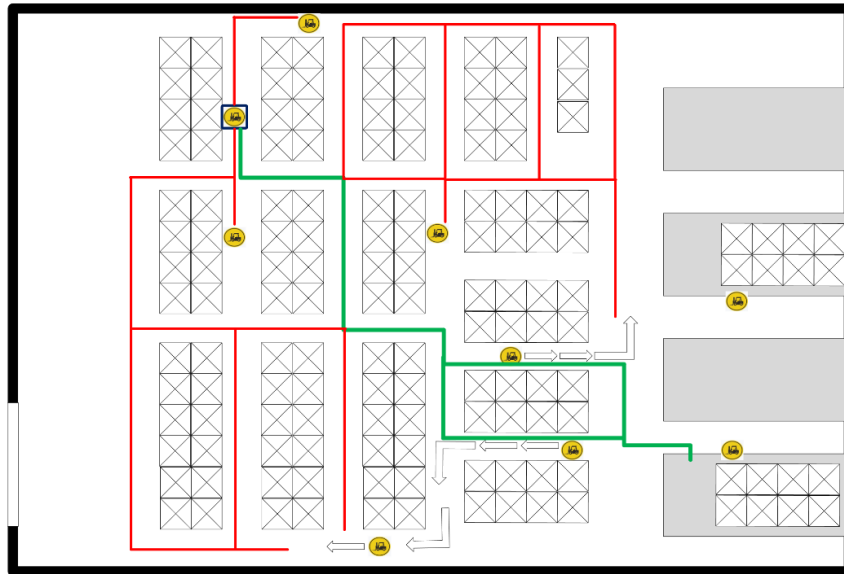
1. **Raktározási feladat érkezik a WMS rendszerből.** A feladat értelmezése előtt azonosítja magát és az anyagmozgató eszközt a kezelő (**felelősséget vállal** az elkövetkezendő tranzakciókért) és időbélyeggel jelzi a WMS felé, hogy elkezdte a feladat elvégzését. Az azonosítási folyamatra **adatbeviteli időszükséglet** vonatkozik.

2. Kezelő a raktár valamelyik pontjától és **előkészülési idő és előkészülési úthossz** alatt elindul és megérkezik „K” kezdőponthoz.
3. „K” kezdőpontban azonosítási technológiát (vonalkód, RFID) használva megadja a pozícióját (az áru tárhelyét) és / vagy azonosítja a szállítandó árut. Ezzel **elindítja a WMS rendszerben a kijelölt műveleti tranzakciót**.
4. Kezelő elindul az áruval és a **kezelő raktárismeretére hagyatkozva** (esetleg javasolt útvonal mentén) halad „C” célpont felé. Az útvonalon **több alkalommal várakozni kényszerül**, - másik tranzakciót végző anyagmozgató gép vagy áru akadályok miatt, időt tölt várakozással.
5. Előfordulhat, hogy a láthatóan hosszabb várakozási idő helyett más, **kerülő útvonalat** kénytelen választani inkább a kezelő, melyet több alkalommal végezhet el az útvonal során **additív úthossz és időtöbblet** mellett. A kerülőút kiválasztása szintén a kezelő **raktárismerete alapján** történik, esetleg léteznek opcionális „biztos” raktári útvonalak, melyeken már nem valószínű további akadályoztatás.
6. A raktári struktúrából következik, hogy jellemző a **keresztforgalom** az egyes elágazások esetében. A kezelő ezzel a jelenséggel is találkozhat az út során, több alkalommal is időt tölt el a kereszteződésekben keresztforgalom miatti **várakozással**.
7. Kezelő megérkezik „C” célponthoz, ahol ismét azonosítási technológiát (vonalkód, RFID) használva megadja a pozícióját (az áru tárhelyét) és / vagy azonosítja a szállítandó árut. Ezzel **lezárja a WMS rendszerben a kijelölt műveleti tranzakciót**.
8. A folyamat vége.

WMS és RTLS-el integrált raktármenedzsment esetében a raktározási folyamat alapvetően hasonló módon működik, azonban több lépésnél is használja az irányítási modell azokat az adatokat, melyek nagyban segítik a **precízebb, optimálisabb raktárirányítás végrehajtását**;

- ismert minden egyértelműen azonosított anyagmozgató gép valós pozíciója,
- ismert minden egyértelműen azonosított humán erőforrás valós pozíciója,
- ismert minden egyértelműen azonosított tárolási hely valós pozíciója,
- **nem ismert** direkt módon az áruk egyértelmű valós pozíciója, mert az előző fejezetben megállapított nagy darabszámú árukra rögzítendő RTLS tag alkalmazása – magas beruházási költségek miatt - kizárná az RTLS rendszer bevezetési lehetőségét,

Ezek után elvégezve az előző folyamat vizsgálatát, a következő lépések állapíthatóak meg ;



57. ábra - WMS + RTLS-sel támogatott raktár tárolási feladat (K-->C) vázlata

1. Raktározási feladat érkezik a **WMS + RTLS** rendszerből.

A rendszer megvizsgálja azt, hogy a „C” kezdőponthoz viszonyítva;

- melyik szabad (vagy az éppen futó tranzakciójának a végén járó) anyagmozgató gép és kezelő tartózkodik a legközelebb vagy a legrövidebb idő alatt,
- illetve a vizsgált és lehetséges kiválasztott gép rendelkezik-e még elég szabad üzemidővel (töltöttsége megfelelő-e).

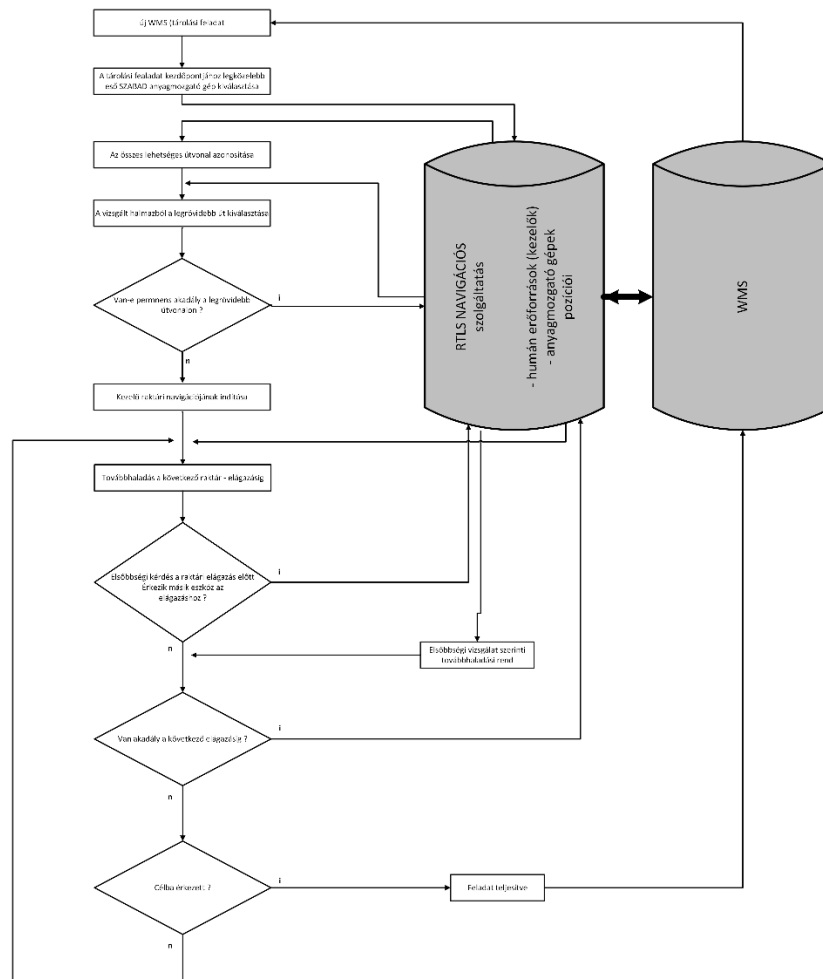
Az **optimáció** során kijelölt anyagmozgató gép / kezelő az érkező feladat értelmezése után **nyugtázza** a végrehajtást (felelősséget vállal az elkövetkezendő tranzakcióért) és időbélyeggel jelzi a WMS felé, hogy elkezdte a feladatok elvégzését. **Nem történik azonosítással kapcsolatos idővesztés**, hiszen a rendszer az RTLS segítségével egyértelműen „ismeri” és azonosította a kezelőt és anyagmozgató gépet.

2. Az optimalálás alapján kijelölt és a nyugtázást elvégző kezelő / anyagmozgató gép páros, - a raktár várhatóan a „K” ponthoz legközelebbi lehetséges pontjától **optimalizált előkészítési idő** valamint **optimalizált előkészítési úthossz** alatt elindul és **RTLS -el támogatott raktári navigáció alapján** (optimalizált legrövidebb és szabad úton) megérkezik „K” kezdőponthoz.
3. „K” kezdőpontban azonosítási technológiát (vonalkód, RFID) használva azonosítja a szállítandó árut;
- ezzel egyrészt elindítja a WMS rendszerben a kijelölt műveleti tranzakciót,
 - másrészt az **RTLS rendszer a háttérben dupla visszaellenőrzést tud automatikusan elvégezni az áruval kapcsolatban** : indirekt módon ugyanis ismeri az áru egyedi azonosítóját, mivel az előző betárolásnál a valós pozíció és egyedi áruazonosító kombinációt letárolta az adatbázisban.
4. Az RTLS rendszer a **többi anyagmozgató eszköz / kezelő ismert pozícióit és akadályozó jellegüket figyelembe véve – optimalizált (legrövidebb / legkisebb költségű stb.) útvonalat tervez**, majd kezelő számára folyamatos navigációt biztosít

az út során, a javasolt előrehaladási irány megjelenítésével (↑,←,→, =). Kezelő elindul az áruval a következő raktári elágazás felé.

5. A raktári elágazás előtt RTLS rendszer vizsgálatot végez az elágazásba egyszerre érkező szállítóeszközök tekintetében. **Optimalizációt végez az elsőbbség eldöntése érdekében** (az optimalizáció lehet a prioritást élvező anyagmozgatási művelet, vagy egyszerű jobbkéz szabály stb.). Az RTLS az elágazás előtt jelzi a kezelőnek, hogy az elágazásban fékeznie, megállnia (=) kell, vagy változatlan sebesség mellett haladhat tovább (↑).
6. A raktári elágazások elhagyása után újra az RTLS navigációs szolgáltatása minden esetben **frissíti az útvonaltervet**, - hogy a legközelebbi elágazásban már ne terelje az anyagmozgató gépet - menet közben keletkezett – akadályozott útvonalra. Optimális esetben így akadálymentesen de esetleg útvonal-hossz és anyagmozgatási idő növekedéssel lehet megvalósítani a raktári tárolási folyamatot. Nem minden esetben célszerű viszont a kerülés. A WMS + RTLS adatbázisában megadható (vagy önmaga számíthatja) paraméter egy átlagos áru letárolási / felvételi időszükséglet. Ha ez az időszükséglet szignifikánsan kevesebb mint a kikerüléssel várható időtöbblet, akkor nem érdemes kerülni. Ennek vizsgálatát a navigációs szolgáltatás szintén minden frissítéskor elvégzi.
7. Az előző pontban részletezett metódus alapján az útvonalon több alkalommal **várakozni kényszerülhet**, - másik tranzakciót végző anyagmozgató gép vagy áru akadályok miatt. Az optimaló algoritmus működése miatt az biztosan kijelenthető, hogy **a várakozások száma biztosan kisebb (legrosszabb esetben pedig egyenlő) mint a csak WMS-sel vezérelt raktármodell esetében**.
8. Az eddigi információk alapján tehát előfordulhat ebben a raktári irányítási modellben az is, **kerülő útvonalat** használ a kezelő. A kerülőút kiválasztása során keletkezett **többlet úthossz és többlet idő biztosan kisebb (legrosszabb esetben pedig egyenlő), mint a csak WMS változatú raktárirányítási modell esetében**.
9. **A raktári elágazásokban a fentiek értelmében eliminálódott a várakozási idő**. Ugyan a javasolt elágazás előtti lehetséges fékezés miatt előfordulhat idővesztés, azonban ez a várakozáshoz képest nem számottevő idő.
10. Kezelő megérkezik „C” célponthoz, ahol ismét azonosítási technológiát (vonalkód, RFID) használva, - azonosítja a szállítandó árut, az anyagmozgató gép és kezelő pozíciója pedig ismert és a WMS rendszerben letárolásra kerülnek. Valójában az áru azonosításakor **egy dupla adat visszaellenőrzés történik**, mert az áru egyedi azonosítója ismert a felvételnél. A dupla visszaellenőrzés a pontosságot növeli. Ezzel lezáródik a WMS+RTLS rendszerben a kijelölt műveleti tranzakciót.
11. A folyamat vége.

Egy átláthatóbb WMS+RTLS tárolási algoritmust készítettem el a következő folyamatra segítségével.



58. ábra - tárolási művelet algoritmus a WMS + RTLS raktári menedzsment modellben

Raktári kiszolgálás / belső raktári folyamatok ideje (idő) és raktári anyagáramok (útvonal hosszak) javulásának vizsgálata

Ha a két modellt összehasonlítom, szignifikánsan kedvezőbb mutatószámok jellemzik a WMS + RTLS raktári irányítású modellt hiszen ebben a változatban legalább 5 féle optimalizást végez a rendszer a rendelkezésre álló valós idejű pozíció adatok között, -ellentétben a csak WMS alapú tárolási folyamattal, - ahol nem történik ilyen és több ponton is a kezelő raktárismeretére támaszkodhat a folyamat.

optimáció 1 : a kezdőponthoz eső legközelebbi feltöltött kezelő/anyagmozgató gép kombinációjának kiválasztása és **a legrövidebb idő és útvonal** használata a kezdőponthoz érkezéshez

optimáció2 : **legrövidebb vagy leggyorsabb raktári útvonal** kiválasztása a lehetségesek közül

optimáció3 : raktári elágazások **várakozási idejének eliminálása**

optimáció 4: a kiválasztott útvonalon mégis előforduló **várakozások idejének minimalizálása / elkerülése**

optimáció 5 : a kiválasztott útvonalon menet közben keletkezett tartós akadályok miatti optimált más – **legrövidebb (leggyorsabb útvonal) keresése, kiválasztása**

A sorozatos optimációknak köszönhetően jelentős idő alapú KPI javulás érhető el [78]. Nem könnyű feladatot értékelni publikálni a tároláshoz kapcsolódó idő jellegű KPI-k javulására vonatkozóan, mert minden raktári konfigurációban (raktári méret, áruk tárolási mátrixa, utak kialakítása, anyagmozgató gépek száma, munkaerő létszáma, napi tárolási műveletek száma stb.) más és más lehet a javulás mértéke. Nagyon eltérő hatékonyság javulás mérésére vonatkozóan a teljes raktárra vonatkozóan **megalapozott mutatószám reprezentálható a 6. fejezetben ismertetett kis költségvetésű pilot-projekt bevezetési lépés segítségével.**

Pontosság javulása :

A szakirodalom alapján a tisztán WMS alapú raktármenedzsment rendszerek átlagos pontosságára vonatkozó adatot nem találtam, azonban az iparágban egy csúcsteljesítményű önmagában bevezetésre került **WMS-t 98%-on felüli pontosságúnak szoktak tekinteni.** (hibás tárolási műveletek száma / összes raktári tárolási művelet száma). A WMS + RTLS raktári irányítású modell esetében ez a mutatószám szám tovább javítható;

dupla kontroll 1: A tárolási művelet megkezdésekor (**árufelvét**) hagyományos azonosítástechnológiai (vonalkód, RFID) jellegű áruazonosítás is történik az RTLS által automatikusan azonosított áru adatok mellett, így kizárható a téves áruazonosítás.

dupla kontroll 2: A tárolási művelet befejezésekor (**letárolás**) hagyományos azonosítástechnológiai (vonalkód, RFID) jellegű áruazonosítás is történik az RTLS által automatikusan azonosított áru adatok mellett így kizárható a téves áruazonosítás.

Pontosságra vonatkozó KPI kutatást nem találtam a szakirodalomban a WMS és az RTLS rendszerek integrációjából képzett raktár irányításra vonatkozóan; - viszont tapasztalataimra tudok hivatkozni az elvégzett RTLS projektek kapcsán

Iparág	Vállalkozás tevékenysége	Üzemszerű működés (WMS+RTLS) kezdeté (év)	Elért tárolási pontosság (%)	A projekt során elért további eredmény
Autóipar [79]	Indítómotor, generátor gyártása TIER 1	2018	99,90%	raktári átfutási idő 6 óra -> 3 óra
Feldolgozóipar	Lemezgyártás	2022	99,70%	keresési idő 15 perc -> 2 perc
Feldolgozóipar	Sörgyártás	2020	99,00%	kitárolási pontosság 95%-> 99 %
Autóipar	Karosszériaelem gyártás	2019	99,99%	raktári átfutási idő 6 óra -> 5 óra

59. ábra - IBCS Hungary Kft néhány RTLS telepítési referencia

A referenciák alapján **a pontossági érték legalább 99%** volt az eddigi olyan projektjeinkben, amelyekben publikus mérőszámok állnak rendelkezésünkre a mutatószámmal kapcsolatban. A táblázatból megállapítható **legalább elért 1% pontosság növekedés** óriási eredmény raktárak esetében, hiszen az iparágban használt **1 hibás tárolás = 100 USD** teljes költséggel számolva, napi legalább 1.000 tárolási művelet (ki és be jellegű raktári műveletek) esetében a

tárolási hibákból eredő additív költség naponta 1.000.- USD. -vel csökkenthető. Ha csak pusztán a pontossági KPI-t vennénk alapul az RTLS alkalmazásának hatékonyságnövelő vizsgálatánál, már akkor is **2 éven belül megtérülne** a beruházás a megismert árazást alapul véve (5. fejezet).

A referenciák áttekintése során visszaugorva az idő fogalmához kapcsolható mutatószámokra, a WMS + RTLS integrációval ellátott raktári menedzsment esetében látványos javulás érhető el. A feltüntetett értékek között van olyan, amely **akár 50%-al tudta javítani a raktárra jellemző rendelés teljes átfutási idejét** [79]. (WMS-be érkező rendelés idejétől számítva a kikészítési pontra letárlt áru megérkezéséig). Itt meg kell jegyezni, hogy ebben az esetben a hagyományos rádiós mobil adatgyűjtővel támogatott WMS alapú kiszedési rendszer is továbbfejlesztésre került az RTLS bevezetésével egyidőben.

Költségek csökkentése:

A kvantitatív KPI-k vizsgálatát a raktári működtetési költségekhez kapcsolódó vizsgálatommal folytatom. Egy raktári működésének költségei az alábbi összetevőkből áll össze [80] ;

$$K_{\text{működési}} = K_{\text{anyagmozgatási}} + K_{\text{humán}} + K_{\text{energia}} + K_{\text{egyéb}} \text{ [EUR]}$$

ahol ;

$K_{\text{anyagmozgatási}}$; a raktáron belüli anyagmozgatás összes költsége,

$K_{\text{humán}}$; a raktár teljes működtetéséhez szükséges humán erőforrások összes költsége (produktív és inproduktív munkaerő),

K_{energia} ; a raktár működtetéséhez szükséges energia költsége,

$K_{\text{egyéb}}$; a raktár működtetésével kapcsolatos egyéb költségek (karbantartási, hatósági eljárási költségek, stb.),

Az anyagmozgatási költség sokféle – a dolgozat vizsgálati körén kívül álló – raktárra jellemző paraméterekből adódik össze, de mindenképpen összefüggésben van a raktárkiszolgálási útvonalak hosszával és az anyagmozgató gépek és feladataik elvégzési idejével. Ezen összetevők optimalizálásának köszönhetően az anyagmozgatás költsége direkt módon csökkennek. Elérhető olyan állapot is egy raktárban, hogy az optimalásnak köszönhetően akkora mértékű útvonal és idő csökkentést lehet elérni, hogy **anyagmozgató gép(ek) és humán erőforrás(ok) szabadulnak fel a rendszerből**. Átcsoportosítással, más feladatokra történő átirányítással még hatékonyabbá tehető ebben az esetben a raktár működtetése.

Átcsoportosítással, a felszabaduló humán erőforrással pedig a humán erőforrások összes költsége is csökkenthető a fenti képlet alapján. Indirekt befolyásoló tényező, hogy a WMS + RTLS integrációval működő raktár esetében **eliminálódik a rendszerből a raktárismeret fontossága**, hiszen a rendszer minden lépést vezérel (navigál), így **nem szükséges a helyismeret, raktárismeret és akár a nyelv ismerete sem**. Tehát egy RTLS bevezetéssel lépést tehetünk abba az irányba, hogy raktári rendszerünk értékét nem tesszük munkaerő-függővé, azaz a napjainkban jellemző raktári munkatársakra vonatkozó **magas fluktuáció kevésbé befolyásolja így a raktári működtetés biztonságát**.

Az RTLS rendszer további lehetősége, hogy a munkaerő követés esetén elkülöníthetők a produktív és in produktív időszakok, - ami a bérezés szempontjából differenciált lehet.

Az anyagmozgató gépek precízebb, kifinomultabb, - üzemidejüket (töltöttségi állapotukat) is figyelembe vevő vezérlése **jelentős energiát takarít meg**. A szakirodalmi kutatásban vizsgált, elágazásokban történő fékezés – megállás – gyorsítás jelensége [68] az egyik legfontosabb paraméter ami befolyásolja az egy feltöltés alatt elérhető üzemidőt. Egyenletes sebesség tartása mellett, valamint az **RTLS rendszer segítségével valós időben mérhető sebességkorlátozások betartása mellett kiiktatható** (vagy vizsgálható) a rendszerből a felesleges – vezetési magatartástól függő - **energiapazarlás**.

Ezzel egyidőben az egyenletesebb üzemeltetési sebességek befolyásolják a karbantartási költségeket is, hiszen az állandó erős fékezés a legfontosabb gyökérok a sűrűbben jellemző karbantartási igénynek.

Az egyéb költségek vizsgálatához kitűnő eszköz az RTLS, hiszen a rendszer előnye, hogy a raktári történések historikusan visszaforgathatók az időben, illetve lehetőség van adott időintervallum utólagos vizsgálatára is. Az RTLS alapszolgáltatások (Zónák vizsgálata, Működési hatékonyság vizualizációja, Hő térképek, Spagetti térképek) segítik a raktári menedzsmentet abban hogy egy-egy energiahatékonysági kérdésben gyökérokat tudjon keresni és megtalálni.

Kvalitatív mutatószámok összehasonlítása ;

Egy baleset megelőzése is fontosabb dolog a teljes raktári működtetéstől, ezért a balesetvédelem, **munkabiztonság fejleszthetősége a raktári üzemeltetés legfontosabb mutatószáma**. A raktári anyagmozgatás legbalesetveszélyesebb pontjai azok a helyek vagy helyzetek, amikor két anyagmozgató gép, vagy anyagmozgató gép és ember kerül közvetlen vagy közeli kapcsolatba egymással.

A leggyakoribb helyzetek ;

- raktári elágazásba egyszerre érkező anyagmozgató gépek, vagy egyszerre érkező anyagmozgató gép és ember találkozása,
- raktári tárolási művelet közben tolató anyagmozgató gép és ember / vagy másik anyagmozgató gép találkozása,
- karbantartási vagy speciális feladatot végző eszköz körüli lehatárolt veszélyes munkatér és ember találkozása,
- raktári nyílászárón keresztül érkező ember vagy anyagmozgató gép amely a raktári útvonalra kapcsolódik a nyílászáró után.

Az RTLS működtetése kapcsán a virtuális zónák használatával **a fenti helyzetek mindegyike elkerülhető**. Olyan raktári működés esetén, ahol a raktár összes dolgozója és az összes anyagmozgató gép valós idejű követése megvalósított, a fenti helyzetek elkerülhetők még **a találkozások várható megtörténte előtt figyelmeztetéssel vagy beavatkozással**. Az RTLS virtuális zónákhoz kapcsolódó triggerei alkalmasak arra, hogy elektronikus kapcsolatba kötött külső hardver eszközöket is vezéreljenek;

- anyagmozgató eszköz sebességtartó automatika,
- anyagmozgató eszköz vészfékező rendszere,
- emberhez kötött ruha / védősisak heptikus (rázás, rezgés) jelzőrendszerrel,
- nyílászárók automata nyitó / záró eszközeinek vezérlése, stb.

Nem ismert a raktári technológiában balesetvédelemre szolgáló univerzálisabban alkalmazható eszköz mint az RTLS technológia. Vannak olyan iparágak, ahol kifejezetten csak a balesetvédelem miatt alkalmazzák a technológiát (pl. vegyipar, gyógyszeripar), ezért kifejlesztésre kerültek kifejezetten a balesetvédelemre fókuszáló speciális RTLS hardverek is (pl. rezgésre alkalmas RTLS tag-el ellátott védősisak).

A munkabiztonsági szempontok alapján működtetett RTLS tag-ek kétirányú (TWR) kommunikációs üzemmódban működtethetők, hiszen szükség van a tágak felé is kommunikálni a balesetveszély elhárítása érdekében. A szakirodalmi feldolgozás során megállapításra került, hogy ezzel protokollal működő RTLS tag-ek nagyobb energiaigényűek, azaz a balesetmegelőzésre használt RTLS rendszereket úgy kell tervezni, hogy ezt figyelembe vegyünk.

A kvalitatív KPI-k vizsgálata során szándékosan a dolgozat végére hagytam egy olyan mutatószám bemutatását, ami talán a leginkább kifejezi **az RTLS technológia alapján működtetett raktári konfiguráció a digitalizáció és ipar 4.0 koncepció irányába történő elköteleződésének előnyét.**

Arról már sok szó esett a dolgozatban, hogy az RTLS technológiával lefedett raktári működtetés legfontosabb előnye, hogy amíg a hagyományos adatbeviteli technológiák (vonalkód, RFID stb.) kizárólag „pontoszerű”, - egy adott kapu, adatbeviteli pontra jellemző - adatokat tudnak szolgáltatni a raktári működésről, addig az RTLS a teljes raktári működés folyamatáról képes adatokat gyűjteni a raktár teljes területét lefedve.

Reziliens működés esetében egyik napról a másikra előfordulhat olyan raktári konfiguráció változás, hogy

- a tárolási helyek teljesen más helyekre kerülnek,
- a korábbi útvonalak megszűnnek, helyettük újak jönnek létre,
- a tárhelyeket szükséges átrendezni,
- esetleg az eddigi beérkeztetési terület hirtelen kitárolási területté változik,
- kamionrampák anyagáramlása változik az ellenkezőjére,
- anyagmozgató gépek, emberi erőforrások kétszereződnek meg, vagy éppen csökkennek a felére stb.

Ezekben az esetekben egy hagyományos működésű információ beviteli pont (pl. RFID kapu) átmozgatására, áttelepítésére van szükség a raktárban. Ha megvizsgáljuk például egy RFID kapu áttelepítési költségét, akkor az alábbi feladatokra van szükség;

- meglévő kapu szétszerelése, kábelezés lebontása, a helyszín rekonstrukciója,
- az új helyszínre történő kábelezés (áram, kommunikáció),
- az új helyszínre történő áttelepítés, összeszerelés, beüzemelés.

Egy ilyen folyamat átlagos költsége eddigi tapasztalataim alapján legalább 2.000 – 2.500.- EUR költséggel jár, illetve a telepítés közben zárolni szükséges mindkét raktári területet ahol a kapu régi és az új helye is lesz; azaz kiesik a hasznos raktári területből. Ezenfelül az adatbeviteli pont funkciója is kiesik a raktári működés rendszeréből, azaz valamilyen ideiglenes megoldással pótolni kell (pl. manuálisan) az adatbevitelt. Általában nagyléptékű raktári konfigurációs változtatásnál ráadásul nem egy, hanem több ilyen kaput is szükséges mozgatni. Ezek a feladatok tehát nyilvánvalóan óriási idő és költségvonzattal, valamint operatív kiesésekkel járnak.

Ezt a hagyományos „áttelepítési folyamatot” szükséges összehasonlítani az RTLS rendszerrel integrált raktári változattal. Mik a teendők az RTLS-ben egy fenti változtatási igény esetében ?

- a raktári személyzetnek az RTLS digitális iker segítségével a raktári layout-on - pár kattintással át kell húzni egérmutató segítségével – a virtuális zónát egy másik pozícióba.

A művelet gyakorlott raktári vezető esetében egy negyedóra alatt elvégezhető, az áttelepítés költsége zérus, nem kell zárolni semmilyen területet, nincs operatív kiesés.

Ha reprezentálni szeretném azt a mutatószámot, ami a két „áttelepítés” közötti arányt mutatja, akkor az RTLS esetében egy hatalmas szám lenne, úgy is mondhatjuk, hogy összehasonlíthatatlan. Ez a digitalizáció egyik igazi előnye.

Sajnos a mai ipari valóságban ezt még sok vállalat nem látja be, arra hivatkozva, - hogy nem jellemző a sűrű raktári konfigurációs változtatás. Ezzel messzemenően nem tudok egyetérteni, mert a jövőt senki sem tudja megmondani. Mindenesetre aki időben felkészül, - nem érheti meglepetés egy ilyen kihívásra.

A fejezetben megfogalmazott és összegyűjtött információk alapján megfogalmazom harmadik hipotézisem ;

Meghatároztam az RTLS alapú raktározási folyamatok értékelésére szolgáló kvantitatív és kvalitatív mutatószám rendszert, figyelembe véve a vállalati prioritásokat kiszolgáló folyamatfejlesztési keretrendszer működési mechanizmusát !

Meghatároztam a mutatószámok rendszerezésére alkalmas logisztikai rendszerváltozatok összehasonlítható modelljeit, majd elvégeztem a legfontosabb mutatószámok összehasonlítását. A vállalati szempontból legfontosabb kvantitatív mérőszámokon alapuló raktári működtetésre jellemző idő-, útvonalhossz-, pontossági és költségekre alapozott elemzéseket elvégeztem. A kutatás során sor került a legfontosabb kvalitatív mutatószámok elemzésére is, melyek kritikusak és elengedhetetlenek az összehasonlítás során.

8. Hipotézisek összefoglalása

Hatodik fejezet:

Első hipotézisem, hogy a vizsgált és lehatárolt logisztikai, intralogisztikai környezetre vonatkozóan nem található a szakirodalomban és korábbi saját tapasztalataim alapján olyan kidolgozott és általános módszertan, amely megfelelő technológia kiválasztására alkalmas helymeghatározó rendszerek esetében. Továbbá megállapításra és bizonyításra került, hogy a lehatárolt logisztikai környezetre vonatkozóan az UWB (Ultra Wide Band) alapú RTLS a legoptimálisabb technológiai választás.

Hetedik fejezet:

Második hipotézisemben kidolgoztam egy folyamatot arra vonatkozóan, hogy milyen lépésekben javasolt logisztikai hatékonyságot javító UWB-RTLS rendszert bevezetni és működtetni egy lehatárolt modell esetén. A lépések azonosításánál figyelembe vettem azokat a külső és belső feltételeket, amelyek vizsgálata nélkülözhetetlen ahhoz, hogy a kívánt célt

elérjük. Az egymásra épülő lépések feltételrendszere a tézisémet reprezentáló folyamatábrából vizuálisan megismerhető, könnyebben átlátható. A folyamatábra elágazási pontjait reprezentáló kérdések dolgozatomban ezen fejezetében részletesen feltárássra és kidolgozásra kerültek.

Nyolcadik fejezet :

harmadik hipotézisem ;

Meghatároztam az RTLS alapú raktározási folyamatok értékelésére szolgáló kvantitatív és kvalitatív mutatószám rendszert, figyelembe véve a vállalati prioritásokat kiszolgáló folyamatfejlesztési keretrendszer működési mechanizmusát !

Meghatároztam a mutatószámok rendszerezésére alkalmas logisztikai rendszerváltozatok összehasonlítható modelljeit, majd elvégeztem a legfontosabb mutatószámok összehasonlítását. A vállalati szempontból legfontosabb kvantitatív mérőszámokon alapuló raktári működtetésre jellemző idő-, útvonalhossz-, pontossági és költségekre alapozott elemzéseket elvégeztem. A kutatás során sor került a legfontosabb kvalitatív mutatószámok elemzésére is, melyek kritikusak és elengedhetetlenek az összehasonlítás során.

Hivatkozások

- [1] RTLS Alliance Gmbh., „Insights from 82 RTLS Vendors Over 25 Years,” LinkedIn post : https://www.linkedin.com/posts/rtls-alliance_rtls-locationintelligence-marketanalysis-activity-7360980895802998786-hmNN?utm_source=share&utm_medium=member_desktop&rcm=ACoAAAGZcR4BomWSoa1iMowOCUZwOdn-06sCuG8, 2025.08.01.
- [2] A. b. Q. I. Decawave Inc. , „Decawave D1000 chip datasheet,” <https://www.qorvo.com/products/d/da007946>.
- [3] OMLOX Szervezet, „Az Omlox története,” 2018. [Online]. Available: <https://omlox.com/community/story-of-omlox>.
- [4] Gartner Inc., „Gartner Magic Quadrant for Indoor Location Services, 2024,” <https://www.gartner.com/en/documents/5237563>, 2024.
- [5] Műszaki Magazin, „Új év, új és régi kihívások a logisztikában 2025-ben.,” 2025. [Online]. Available: <https://www.muszaki-magazin.hu/2025/01/06/logisztikai-kihivasok-2025-uj-ev/>.
- [6] PROLOGIS Research, „Bold Predictions for 2025: Supply Chain Trends to Watch,” 2025. [Online]. Available: <https://www.prologis.com/insights-news/research/bold-predictions-2025-supply-chain-trends-watch>.
- [7] TRANSPACK, „Derékig a vízben – nehéz idők a logisztikai szektorban,” 2025. [Online]. Available: <https://transpack.hu/2025/02/19/logisztika-nehez-idok-logisztika-szektorban/>.
- [8] TRANSPACK, „Három fő ok generálja a raktártechnológiai fejlesztéseket,” 2025. [Online]. Available: <https://transpack.hu/2024/12/26/harom-fo-ok-generalja-a-raktartechnologiai-fejlesztéseket/>.
- [9] SCM Integráció Magazin, „Tendenciák az ipari ellátási láncokban - 2025,” 2025. [Online]. Available: <https://scm-integracio.com/tendenciak-az-ipari-ellatasi-lancokban-2025/>.
- [10] Piac és Profit, „Komoly kihívásokkal néznek szembe a logisztikai szektor szereplői,” [Online]. Available: <https://piacesprofit.hu/cikkek/gazdasag/komoly-kihivasokkal-neznek-szembe-a-logisztikai-szektor-szereploi.html?oldal=1>.
- [11] G. Nagy, B. Illés, Á. Bányai és A. K. Varga, „THE IMPACT OF INCREASING DIGITALIZATION ON THE LOGISTICS SECTOR AND LOGISTICS SERVICES PROVIDERS,” 2023. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/376681909_THE_IMPACT_OF_INCREASING_DIGITALIZATION_ON_THE_LOGISTICS_SECTOR_AND_LOGISTICS_SERVICES_PROVIDERS.
- [12] RTLS Alliance Gmbh., „RTLS ROI Quantifying Efficiency Gains for Finance Teams,” <https://www.rtlsalliance.org/resources/rtls-roi-quantify-efficiency-gains-cost-savings>, 2025.
- [13] P. Tamás és S. Nagy, „TRACKING SYSTEMS IN LOGISTICS,” Advanced Logistic Systems - Theory and Practice, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.32971/als.2024.040>.

- [14] P. Tamás, B. Pallai és H. Matyi, „ORDER PICKING SYSTEM EVALUATION USING RTLS METHOD,” *Advanced Logistic Systems – Theory and Practice*, Vol. 17, No. 1 (2023), pp. 62-70, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.32971/als.2023.008>.
- [15] EU Wiki, „Literature review,” [Online]. Available: <https://wikis.ec.europa.eu/display/ExactExternalWiki/Literature+review>.
- [16] W. MENGIST, T. SOROMESSA és G. LEGESE, „Method for conducting systematic literature review and meta-analysis for environmental science research,” *MethodsX*: 100777., 2020.
- [17] V. KAMARÁSI és G. MOGYORÓSSY, „Sisztematikus irodalmi áttekintések módszertana és jelentősége. Segítség a diagnosztikus és terápiás döntésekhez.,” *Orvosi Hetilap*, 2015.
- [18] D. Denyer és D. Tranfield, „Producing a systematic review,” in *The sage handbook of organizational research methods*, Sage Publications, In A.D. Buchanan & A. Bryman (Eds.), 2009, pp. 671-689.
- [19] H. GITA INDAH, M. RENDY, E. BAYU és D. I. INDRIANY, „Future Research and Trends in Ultra-Wideband Indoor Tag Localization,” 2024. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=10528315>.
- [20] S. Zekavat és R. Buehrer, *Handbook of position location: Theory, practice, and advances.*, IEEE series on digital & mobile communication. Hoboken.: IEEE Press; Wiley., 2019.
- [21] O. George, A.-A. Raed , J. Stephen, N. James, P. Mohammad és R. Jonathan, „Indoor location identification technologies for real-time IoT-based applications: An inclusive survey,” *Computer Science Review* 30 (2018) 55–79, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2018.09.001>.
- [22] K. Hyunsoo és H. Sangwon, „Accuracy Improvement of Real-Time Location Tracking for Construction Workers,” 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/su10051488>.
- [23] K. Christoph, R. Janina és W. Herwig, „Use of real time localization systems (RTLS) in the automotive production,” 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/21693277.2022.2144522>.
- [24] Wikipédia, „Határozatlansági reláció,” [Online]. Available: https://hu.wikipedia.org/wiki/Hat%C3%A1rozatlans%C3%A1gi_rel%C3%A1ci%C3%B3.
- [25] POZYX.IO Inc., „How ultra-wideband works - POZYX.io,” [Online]. Available: <https://www.pozyx.io/pozyx-academy/how-does-ultra-wideband-work>.
- [26] EU Commission, „COMMISSION IMPLEMENTING DECISION (EU) 2024/1467,” 2024. [Online]. Available: https://eur-lex.europa.eu/eli/dec_impl/2024/1467/oj.
- [27] C. Dieter, S. Adnan, L. Sam, v. H. Ben , M. Chris és d. P. Eli, „An Overview of UWB Standards and Organizations (IEEE 802.15.4, FiRa, Apple): Interoperability Aspects and Future Research Directions,” *IEEE*, 2022. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9810941>.

- [28] F. R. A.-O. Mohammed, J. Steffen, R. Thomas és T. Kerstin, „UWB-Based Real-Time Indoor Positioning Systems: A Comprehensive Review,” 2024. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2076-3417/14/23/11005>.
- [29] SEWIO Inc., „HID - SEWIO Inc. RTLS szállító honlapja,” [Online]. Available: <https://www.sewio.net/>.
- [30] Siemens UWB , „Siemens UWB RTLS szállító,” [Online]. Available: <https://www.siemens.com/global/en/products/automation/identification-and-locating/simatic-rtls.html>.
- [31] B. Amina, F. Fabien, L. Leonardo és S. Robert, „Advancements in Industrial RTLSs: A Technical Review of UWB Localization Devices Emphasizing Antennas for Enhanced Accuracy and Range,” 2024. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2079-9292/13/4/751>.
- [32] J. Bartosz, D. Damian és J. K. Wlodek, „Using the Fingerprinting Method to Customize RTLS Based on the AoA Ranging Technique,” 2016. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/16/6/876>.
- [33] Y. Zhang és Y. Hwang, „Measurements of the characteristics of indoor penetration loss,” Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference (VTC), [Online]. Available: doi: 10.1109/VETEC.1994.345395..
- [34] A. Astafiev, A. Zhiznyakov és D. Privezentsev, „Development of Indoor Positioning Algorithm Based on Bluetooth Low Energy beacons for Building RTLS-Systems,” 2019. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8867751>.
- [35] C. Jiayu, C. Hainan és L. Xiaowei, „Collecting building occupancy data of high resolution based on WiFi and BLE network,” 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.02.016>.
- [36] S. Duong, A. Trinh és T. Dinh, „Bluetooth Low Energy Based Indoor Positioning on iOS Platform,” 2018. [Online]. Available: DOI: 10.1109/MCSoc2018.2018.00021.
- [37] J. Je-sung, K. Youngsun, N. Yunyoung és Y. Kangbin, „An Indoor Positioning System Using Bluetooth RSSI with an Accelerometer and a Barometer on a Smartphone,” [Online]. Available: DOI: 10.1109/BWCCA.2015.142.
- [38] K. Fredrik, K. Martin, B. Bo, T. Fredrik és P. Magnus, „Sensor fused indoor positioning using dual band WiFi signal measurements,” 2015. [Online]. Available: DOI: 10.1109/ECC.2015.7330777.
- [39] Z. Wei, H. Xianghong, Y. Kegen, Q. Weining, Z. Shoujian és H. Xiaoxing, „A novel WiFi indoor positioning strategy based on weighted squared Euclidean distance and local principal gradient direction,” Sensor Review, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1108/SR-06-2017-0109>.
- [40] A. Moustafa, E. Moustafa, R. Hamada, T. Marwan és Y. Moustafa, „WiDeep: WiFi-based Accurate and Robust Indoor Localization System using Deep Learning,” 2019. [Online]. Available: DOI: 10.1109/PERCOM.2019.8767421.

- [41] F. Yu, M. Jiang, J. Liang, X. Qin, M. Hu és T. Peng, „Improved AdaBoost-based fingerprint algorithm for WiFi indoor localization,” 2014. [Online]. Available: DOI: 10.1109/ITAIC.2014.7064997.
- [42] H. Noelia, M. A. Jose és O. Manuel, „Fuzzy classifier ensembles for hierarchical WiFi-based semantic indoor localization,” 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2017.08.007>.
- [43] A. Jimenez és F. Seco, „Comparing Decawave and Bespoon UWB location systems: Indoor/outdoor performance analysis,” 2016. [Online]. Available: DOI: 10.1109/IPIN.2016.7743686.
- [44] G. Vignesh, C. Elizabeth, B. Genevieve és R. Damien, „Indoor performance analysis of LF-RFID based positioning system: Comparison with UHF-RFID and UWB,” 2017. [Online]. Available: DOI: 10.1109/IPIN.2017.8115901.
- [45] Y. Leehter, A. W. Yeong-Wei, Y. Lei és L. Zhe Zheng, „An integrated IMU and UWB sensor based indoor positioning system,” 2017. [Online]. Available: DOI: 10.1109/IPIN.2017.8115911.
- [46] R. Jimenez, R. Antonio és S. Fernando, „Comparing Ubisense, BeSpoon, and DecaWave UWB Location Systems: Indoor Performance Analysis,” 2017. [Online]. Available: DOI: 10.1109/TIM.2017.2681398.
- [47] Q. Jun és L. Guo-Ping, „A Robust High-Accuracy Ultrasound Indoor Positioning System Based on a Wireless Sensor Network,” 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/s17112554>.
- [48] D. K. Haryanto, K. Kanisius és H. Samuel, „The Comparison Between Geo-magnetism and WiFi for Indoor Positioning System for Public Places,” 2018. [Online]. Available: DOI: 10.1109/ROBIONETICS.2018.8674685.
- [49] S. Woo, J. Seongsu, M. Esmond, X. Linyuan és C. Changsu, „Application of WiFi-based indoor positioning system for labor tracking at construction sites: A case study in Guangzhou MTR,” 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.07.009>.
- [50] A. Abdulrahman, A.-S. Abdulmalik, A. Mansour, A. Ahmad és A.-H. Suheer, „Ultra Wideband Indoor Positioning Technologies: Analysis and Recent Advances,” 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/s16050707>.
- [51] Y. Paul K., Z. Shaghayegh, K. Bong-Soo és J. Edward, „Robust Biomechanical Model-Based 3-D Indoor Localization and Tracking Method Using UWB and IMU,” 2017. [Online]. Available: DOI: 10.1109/JSEN.2016.2639530.
- [52] W. Klaus, H. Stefan, K. Josef, L. Erik és M. Paul, „High-accuracy positioning for indoor applications: RFID, UWB, 5G, and beyond,” 2016. [Online]. Available: DOI: 10.1109/RFID.2016.7487999.
- [53] L. Juan, Z. Zhenyan, W. Chun, L. Chang és X. Degui, „Indoor Multifloor Localization Method Based on WiFi Fingerprints and LDA,” 2019. [Online]. Available: DOI: 10.1109/TII.2019.2912055.

- [54] S. Sadowski és P. Spachos, „Comparison of RSSI-Based Indoor Localization for Smart Buildings with Internet of Things,” 2018 IEEE 9th Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference, IEMCON, 2018. [Online].
- [55] S. Dena, M. Osama és K. Khashayar, „Data integration using deep learning and real-time locating system (RTLS) for automated construction progress monitoring and reporting,” 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105778>.
- [56] R. Thota, S. Sara, U. Sarwar, M. Bani-Yaghoub és G. Sutkin, „Accurate Estimation of Individual Transmission Rates Through Contact Analytics Using UWB Based Indoor Location Data,” In Proceedings of the 2024 International Conference on Smart Applications, Communications and Networking, SmartNets 2024, Harrisonburg, VA, USA, 28–30 May 2024, 2024. [Online].
- [57] Z. Yuxuan és W. Manyi, „The LOS/NLOS Classification Method Based on Deep Learning for the UWB Localization System in Coal Mines,” 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/app12136484>.
- [58] K. Jeong-Ho, A. Hyun-Gi, K. Nobuyoshi és K. Won-Suk, „Bias and Deviation Map-Based Weighted Graph Search for NLOS Indoor RTLS Calibration,” 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/electronics13203993>.
- [59] K. Dae-Ho és P. Jae-Young, „Enhanced UWB Ranging Utilizing Denoising Neural Network,” 2024. [Online]. Available: DOI: 10.1109/LCOMM.2024.3374398.
- [60] A. Ambrose, C. Savur és F. Sahin, „Low Cost Real Time Location Tracking with Ultra-Wideband,” 2022. [Online]. Available: In Proceedings of the 2022 17th Annual System of Systems Engineering Conference, SOSE 2022, Rochester, NY, USA, 7–11 June 2022.
- [61] K. Alex, E. d. O. G. Victor és C. N. Victor, „Estimation of Measurement Uncertainty of the Real-Time Location System (RTLS) with Ultra-Wideband (UWB) Technology,” 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/metrology3020007>.
- [62] A.-K. Mohammad, A. Majdeddin és Y. Mazen, „Line-of-sight aware accurate collaborative localization based on joint TDoA and AoA measurements in UWB-MIMO environment,” 2024. [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10586-024-04302-z>.
- [63] Zebra Technologies Inc., „What Is RTLS (Real-Time Location Systems)?,” ZEBRA, 2020. [Online]. Available: <https://www.zebra.com/us/en/resource-library/faq/what-is-rtls.html>.
- [64] Zebra Technologies Inc., „ZEBRA RTLS Devices Homepage,” 2020. [Online]. Available: <https://www.zebra.com/us/en/products/location-technologies/ultra-wideband.html>.
- [65] Ubisense Inc., „Ubisense Inc.,” 2025. [Online]. Available: <https://ubisense.com/location-technology/>.
- [66] B. Patricia, K. Susann és B. Thomas, „Framework for the Classification of Real-time Locating System (RTLS) use cases in Matrix Production Systems,” in *Fraunhofer Institute of Manufacturing Engineering and Automation IPA*, 57th CIRP Conference on Manufacturing Systems 2024, 2024.

- [67] T. Sebastian, S. Brendan, D. Roy és L. Eric, „Real-time locating systems (RTLS) in future factories: technology review, morphology and application potentials,” in *University of Twente*, 54th CIRP Conference on Manufacturing Systems, 2021.
- [68] H. Farouq, D. Husam, L. In Gyu, L. Yinglei, Y. Sang Won és C. Sung Hoon, „Introduction of a real time location system to enhance the warehouse safety and operational efficiency,” 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.107541>.
- [69] E. Durio és W. Dermawan, „DETERMINING KEY PERFORMANCE INDICATORS WITH BALANCED SCORECARD APPROACH FOR CONSTRUCTION PROJECT WAREHOUSE EFFICIENCY,” *Journal of Economics and Business UBS*, 2023. [Online]. Available: e-ISSN: 2774-7042 p-ISSN: 2302-8025.
- [70] HID-SEWIO Inc., „Z-axis based on UWB signal,” 2024. [Online]. Available: <https://docs.sewio.net/docs/z-axis-based-on-uwb-signal-3244326.html>.
- [71] HID-SEWIO Inc., „Z-axis based on barometer,” 2024. [Online]. Available: <https://docs.sewio.net/docs/z-axis-based-on-barometer-3244328.html>.
- [72] T. Cservik, „Tárolási rendszerek,” 2020. [Online]. Available: <https://cserviktimas.wordpress.com/2020/04/28/tarolasi-rendszerek/>.
- [73] T. K. Palett, „EUR raklap méretei szemlélve,” Palett Trading Kft., 2022. [Online]. Available: <https://pallettrading.hu/en/eur-epal-raklap-meretei-keppel-szemleltetve>.
- [74] G. B. és S. K., „AN APPROACH TO RTLS SELECTION,” 24th International Conference on Production Research (ICPR 2017), 2017. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/profile/Bartlomiej-Gladysz/publication/323177691_AN_APPROACH_TO_RTLS_SELECTION/links/5a847e1aa6fdcc201b9ef17d/AN-APPROACH-TO-RTLS-SELECTION.pdf.
- [75] T. Ruppert és J. Abonyi, „Integration of real-time locating systems into digital twins,” 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jii.2020.100174>.
- [76] K. Bóna és P. Molnár-Major, „Using Indoor Positioning Systems (IPS), for Supporting the Digital Mapping and Evaluation of Material Handling Processes, in *Intralogistics Systems*,” 2025. [Online]. Available: https://acta.uni-obuda.hu/MolnarMajorBona_157.pdf.
- [77] P. Miriam, M. Marek, T. Jozef, H. Anton és L. Laura, „USE OF SEWIO REAL-TIME LOCATION SYSTEM IN PRACTICE: TECHNICAL PREPARATION OF HARDWARE, DATA COLLECTION AND ANALYSIS,” 1Technical University of Kosice, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Industrial and Digital Engineering, 2024. [Online]. Available: DOI: 10.17973/MMSJ.2024_03_2024005.
- [78] R. Alliance, „Rethinking RTLS- from lost assets to unseen operational chaos,” RTLS Alliance (LinkedIn oldal), 2025. [Online]. Available: https://www.linkedin.com/posts/rtls-alliance_rtls-operationalexcellence-healthtech-activity-7385033639270584320-hM1N?utm_source=share&utm_medium=member_desktop&rcm=ACoAAAGZcR4BomWSoa1iMowOCUZwOdn-06sCuG8.

- [79] I. H. r. videó, „Az SEG Automotive digitalizált logisztikája kétszer gyorsabban komissiózik,” Youtube videó, 2018. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=P-00q6U654A>.
- [80] V. Bapatla és J. Anitha, „Implementation of an Asset Tracking Embedded System using Ultra-Wide Band Technology,” 4th International Conference on Evolutionary Computing and Mobile Sustainable Networks, 2024.
- [81] K. Elisa, N. Faddrizal és N. H. Vembri, „Determining key performance indicators for warehouse performance measurement – a case study in construction materials warehouse,” Department of Industrial Engineering, Universitas Islam Indonesia, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201815401058>.
- [82] F. Alberto, T. Emiliano, B. Guilia és C. Paolo, „Review-based method for evaluating key performance indicators: an application on warehouse system,” The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2024) 130:297–310, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s00170-023-12684-4>.
- [83] C. Alessandro, G. Sabrina, Z. Giovanni és R. Carlo, „OverallWarehouse Effectiveness (OWE): A New Integrated Performance Indicator for warehouse operations,” Department of Management and Production Engineering, Politecnico di Torino, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/logistics9010007>.
- [84] V. Lukisinky, M. Pimonenko, M. Paaanen és T. Schulzenko, „DEVELOPMENT OF METHODOLOGY AND TOOLS FOR COMPARATIVE ASSESMENT OF OPERATIONAL EFFICIENCY OF KPI-BASED LOGISTICAL INFRASTRUCTURE,” Aalto University, Helsinki, 2013. [Online]. Available: DOI 10.2478/ttj-2013-0019.
- [85] Supply Chain Management, „8 KPIs for an Efficient Warehouse,” Supply Chain Management, [Online]. Available: <https://www.ascm.org/ascm-insights/8-kpis-for-an-efficient-warehouse/>.

Ábrajegyzék

1. ábra – 82 darab RTLS szállító vállalat jött létre az elmúlt 25 évben.....	5
2. ábra - Gartner® Magic Quadrant™ for Indoor Location Services.....	7
3. ábra - Az SLR irodalomkutatás folyamata.....	12
4. ábra - Keresési találatok száma (2000-2025) - RTLS rendszerek raktárban, intralogisztikában.....	15
5. ábra - Keresési találatok száma (2000-2025) - RTLS rendszerek raktárban, intralogisztikában.....	15
6. ábra - Találatok száma (2000-2025) Raktározási folyamatok fejlesztésére alkalmas RTLS technológiai szempontú kiválasztása	16
7. ábra - Találatok eloszlása (2000-2025) Raktározási folyamatok fejlesztésére alkalmas RTLS technológiai szempontú kiválasztása	16
8. ábra - Találatok eloszlása (2000-2025) Folyamatfejlesztés raktárban, intralogisztikában RTLS technológia használatával	17
9. ábra - Találatok eloszlása (2000-2025) Folyamatfejlesztés raktárban, intralogisztikában RTLS technológia használatával	17

10. ábra - Találatok eloszlása (2000-2025) Hatékonysági mutatószámok RTLS technológiával támogatott raktárak esetében	18
11. ábra - Találatok eloszlása (2000-2025) Hatékonysági mutatószámok RTLS technológiával támogatott raktárak esetében	18
12. ábra – Helymeghatározás síkban, 3 darab Anchor segítségével, ideális esetben	21
13. ábra - Nem pontos távolságmérés esetében algoritmus vagy szűrő segítségével becsülhető meg a pont pozíciója	21
14. ábra - Rádiójelhez szekvenciálisan összegzett szinuszoidok eredője	23
15. ábra - UWB impulzusjel visszaverődései	23
16. ábra - IEEE 802.15.4 szabvány szerinti UWB csatornák kiosztása	24
17. ábra - UWB szabványok evolúciója (2007-2020).....	25
18. ábra - A világban elterjedt UWB protokollok	25
19. ábra - RTLS tagek [29], [30]	26
20. ábra - RTLS Anchor-ok [29], [30].....	27
21. ábra - UWB szabványú (A) Anchor és (T) RTLS Tag közötti távolságmérés – TWR protokollal [28]..	27
22. ábra - TDoA távolságmérés és időszinkronizáció több Anchor csoport esetében [29]	28
23. ábra - Benouakta(2024) által összeállított legnagyobb UWB chipgyártók által támogatott protokollok	29
24. ábra - BLE-RSSI technológia mérési pontatlansága [25], két mérendő pont távolsága között nagy amplitúdójú „ugrások” érzékelhetők	31
25. ábra - Azonosítási rendszerek osztályozása szolgáltatási szintjük alapján (Berkhan, 2024).....	35
26. ábra - Helymeghatározás szükségessége az egyes fejlesztési irányokban a folyamatok érettsége szerint (Berkhan, 2024)	36
27. ábra - RTLS bevezetések száma az egyes fejlesztési irányokban, 80 vállalat felmérése alapján	37
28. ábra - Thiede (2021) on-line felmérése lehetséges RTLS fejlesztési irányokról	37
29. ábra - RTLS-FFMS-WMS rendszer kapcsolata, Farouq(2017) szerint	38
30. ábra - Egy raktári kiszedési művelet hatékonyságának mutatószámai (Farouq (2017)	39
31. ábra - Etgar Durio Balanced Scorecard módszerrel összegyűjtött raktári KPI-k	41
32. ábra - Stratégia - KPI - mérőszám - osztályozás.....	41
33. ábra - A vizsgált logisztikai tárolási módok lehatárolása (zöld színnel jelöltek a szóba jöhető tárolási módok)	45
34. ábra - Darabárus tárolási mód esetén szóba jöhető RTLS helyszínek (zölddel jelölve).....	47
35. ábra - RTLS tag általános rögzítési pozíciója EUR raklap esetében	49
36. ábra - Küpper(2022) - BMW üzem elvárt logisztikai pontosságok	50
37. ábra - Az egyes RTLS technológiák összehasonlítása	52
38. ábra - RTLS kiválasztása súlyozási rendszer alapján	54
39. ábra - RTLS rendszer alapelemei	55
40. ábra - Ipar 4.0 definíció	56
41. ábra – Virtuális zóna és trigger az RTLS applikációs szerver raktári layout-ján.....	59
42. ábra - Anyagáram követés és e-kanban RTLS virtuális zónák segítségével	59
43. ábra - Keresési idő csökkentése RTLS virtuális zóna használatával.....	60
44. ábra - Veszélyzónák létrehozása virtuális zóna segítségével	60
45. ábra - Fizikai zónában eltöltött idő vizsgálata (RTLS szolgáltatás)	61
46. ábra - Anyagmozgató eszközök működési hatékonyságának vizsgálata	61
47. ábra - RTLS hőtérkép (Heatmap)	62
48. ábra - Spagetti térkép.....	62
49. ábra - RTLS követési stratégiák.....	67
50. ábra - RTLS bevezetési költségek változása a raktár területének függvényében.....	69

51. ábra - Pilot RTLS rendszer hardver elemei [77]	70
52. ábra - Raktári adatbeviteli műveletek csökkentése RTLS alkalmazásával.....	71
53. ábra - Tokozott RTLS tag vonalkódos jelöléssel.....	72
54. ábra - Virtuális Zóna adatszerkezete	73
55. ábra - RTLS rendszer bevezetésének, használatának lépései.....	76
56. ábra - WMS-sel támogatott raktár tárolási feladat (K-->C) vázlata.....	79
57. ábra - WMS + RTLS-sel támogatott raktár tárolási feladat (K-->C) vázlata	81
58. ábra - tárolási művelet algoritmus a WMS + RTLS raktári menedzsment modellben	83
59. ábra - IBCS Hungary Kft néhány RTLS telepítési referencia.....	84

A dolgozatban használt rövidítések, kifejezések, idegen szavak jegyzéke

Szó	Rövidítés, idegen megfelelő kifejtése	Magyar jelentés
AIDC	Automatic Identification and Data Capture	Automatikus azonosítási és adatrögzítési technológia
AUTO ID	Automatic Identification	Automatikus azonosítási (rendszer)
RTLS	Real Time Location System	Valós idejű helymeghatározó rendszer
UWB	Ultra Wide Band	Szélessávú rádió
GPS	Global Positioning System	Globális helymeghatározó rendszer
ROI	Return of Investment	Beruházás megtérülési (idő)
TIER 1	Legfelsőbb szintű (beszállító)	1. szintű beszállítók: Közvetlen beszállítók a fő gyártóhoz vagy egy elsődleges ügyfélhez. Például egy olyan vállalat, amely generátorokat szállít egy autógyártónak, 1. szintű beszállító.
SLR	Systematic Literature Review	Szisztematikus irodalmi áttekintés
TOF	Time of Fly	Rádióhullám repülési ideje
TWR	Two Way Range	Kétirányú UWB kommunikáció protokoll
TDOA	Time Difference Of Arrival	Érkezés időkülönbségén alapuló távolságmérési protokoll UWB technológia esetében
BLE	Bluetooth Low Energy	Alacsony energiaigényű Bluetooth kommunikációs protokoll
BLE-RSSI	Received Signal Strenght Indication	Bluetooth jelerősség változáson alapuló mérés
WMS	Warehouse Management System	Raktár Irányítási Rendszer
FFMS	Forklift Flot Management System	Raktári anyagmozgató gép irányítási rendszer
IOT	Internet of Things	A „dolgok internete” = szenzorokból álló hálózat a valós és a digitális iker között
MES	Manufacturing Execution System	Gyártást végrehajtó rendszer