

ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

HABILITÁCIÓS TÉZISFÜZET

DR. GOGOLÁK LÁSZLÓ
FŐISKOLAI DOCENS

IoT alapú intelligens rendszerek és vezeték nélküli technológiák hatása az ipar 4.0 alapú alkalmazásokra.

BIZTONSÁGTUDOMÁNYI DOKTORI ISKOLA

Budapest, 2025.10.13.

Tartalom

1 A kutatás előzményei 3

2 Új tudományos eredmények 8

Tézis 1: 8

Tézis 2: 12

Tézis 3: 17

Tézis 4: 23

3 A kutatás és a bemutatott eredmények hatása, visszhangja 36

4 Irodalmi hivatkozások listája 38

5 A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemények 40

6 További tudományos közlemények 43

1 A kutatás előzményei

Az ipari forradalmak sorában az Ipar 4.0 új korszakot nyitott, amely a gyártási folyamatok digitalizációját és intelligens automatizálását helyezi előtérbe. Az olyan technológiák, mint az IoT (Internet of Things) és a vezeték nélküli szenzorhálózatok (WSN), nagy szerepet kapnak ebben az átalakulásban, hiszen lehetővé teszik az adatok valós idejű gyűjtését, elemzését és hasznosítását, miközben a gyártási rendszerek magasabb szintű integrációját és rugalmasságát biztosítják (Majid, M 2022, De Beelde, B. et al. 2023). Az IoT-alapú rendszerek révén a gyártóeszközök és a gyártási folyamatok intelligensen kapcsolódnak egymáshoz (Garcia et al., 2021, Konstantinidis et al., 2020), ezzel egy új szintre emelve az ellátási lánc hatékonyságát, az energiafelhasználás optimalizálását és a termelékenység növelését. Az IoT alkalmazása az ipari környezetben az önálló működést támogató eszközök, például az automatizált vezérlőrendszerek és a robottechnológia fejlődését eredményezte (McFarlane et al., 2013, Wollschlaeger et al., 2017)., amelyek képesek valós idejű döntések

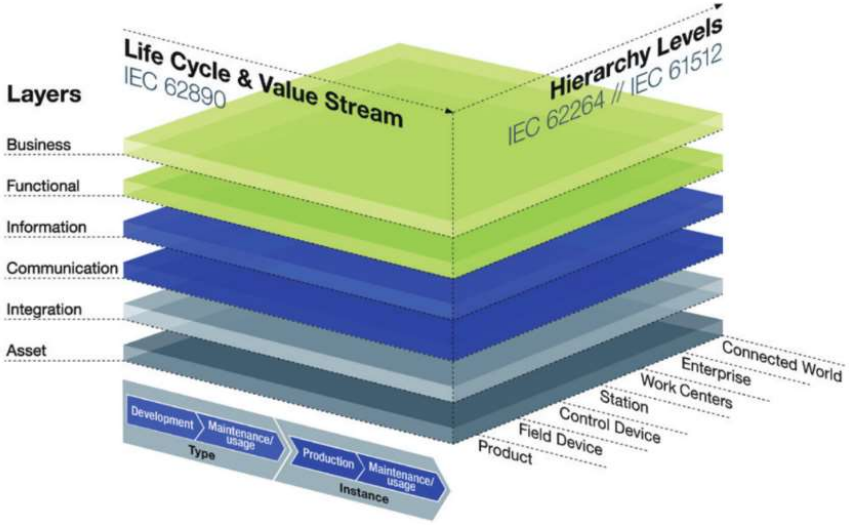
meghozatalára és az erőforrások dinamikus elosztására (Malik, P. K et al. 2021). E technológiák hatása azonban túlmutat az iparon, hiszen jelentős mértékben formálják az oktatás tartalmát és módszertanát is, felkészítve a hallgatókat a jövő gyártási környezetére (Razali, A. et al. 2024) A vezeték nélküli szenzor hálózatok (WSN) további lendületet adnak az Ipar 4.0 fejlődésének. Az érzékelők adatokat gyűjtenek a gyártási folyamatokról, a berendezések állapotáról és a környezeti feltételekről, amelyek lehetővé teszik a prediktív karbantartást és a folyamatos működés biztosítását. A WSN technológiák szoros kapcsolatban állnak az IoT-rendszerekkel, hiszen alapvető elemeik az adatok átvitelének és kezelésének. Ezek az alkalmazások különösen fontosak az összeszerelősorok nyomon követésében, a logisztika hatékonyságának javításában, valamint az intelligens gyártás fenntarthatósági céljainak elérésében.

A kutatásaim során vizsgált témák, mint például az IoT-alapú mobil robotplatformok fejlesztése vagy a vezetéknélküli technológiák alkalmazása az ipari folyamatok monitorozására, rávilágítanak arra, hogy ezek

a technológiák miként támogatják az Ipar 4.0 céljait. E kutatások alapvető betekintést nyújtanak abba, hogy az intelligens rendszerek hogyan járulnak hozzá a hatékonyabb és fenntarthatóbb gyártási és oktatási környezet kialakításához.

A IoT és a vezetéknélküli technológiák hatását az Ipar 4.0 alkalmazásokra a legjobban a RAMI 4.0 (Reference Architectural Model Industry 4.0) referencia modellben tudjuk szemléltetni. A RAMI 4.0 egy háromdimenziós koordináta-rendszerből áll (1. ábra), amely az Ipar 4.0 legfontosabb aspektusait írja le. Ezáltal egy összetett rendszert kisebb, egyszerűbb és könnyebben kezelhető klaszterekre lehet bontani (Schweichhart 2016).

A RAMI 4.0 modell „X” tengelyét a Hierarchia szint (Hierarchy Level) képezi, amely megmutatja, hogyan épül fel egy ipari rendszer a legkisebb egységektől a legnagyobb, legösszetettebb szintekig. Valójában ez a tengely képviseli az IEC 62264 szabványt. A modell „Y” tengelyét az életciklus és értéklánc (Lifecycle and Value Stream) képezi.



1. ábra: RAMI 4.0 referencia modell illusztrációja (Schweichhart 2016)

Ez a tengely a termék vagy rendszer teljes életciklusát ábrázolja az ötlettervezéstől a gyártáson át az újrahasznosításig. Ezeket a folyamatokat az IEC 62890 szabvány határozza meg. A „Z” tengely szerinti rétegek egy hierarchikus rendszerben valósítják meg a rendszer részeit. Az alkatrészek és az emberek az eszközréteg (Asset Layer) részei, amelyeket az integrációs réteg (Integration Layer) kapcsol a virtuális világhoz. Ez az integrációs réteg biztosítja az IT-eszközökkel való

kapcsolatot is, például RFID-olvasók, szenzorok, HMI (Human-Machine Interface) stb. révén. Az információt olyan formátumba alakítják, amelyet számítógépek képesek feldolgozni.

A RAMI 4.0 modellt szükséges ahhoz, hogy megfelelően illeszteni tudjuk a kutatásaim eredményeit az IPAR 4.0 elvárásaihoz. A legfrissebb publikációim evvel kapcsolatban íródtak és ezeket kutatási eredményeket fogom bemutatni a tézisekben. A kutatásaim két fő irányvonala az IoT és a vezetéknélküli szenzorhálózatokkal kapcsolatos ipari alkalmazások és ezek Ipar 4.0 elvárásaihoz illesztése. Kutatásaim kapcsolódnak a vezetéknélküli szenzorhálózaton alapuló termékkövetéshez és az ipari robotrendszerek pozicionálásához is.

2 Új tudományos eredmények

Tézis 1: Az IoT (Internet of Things) alkalmazások és a Wireless Sensor Network (WSN) technológiák szerves részét képezik az Ipar 4.0 keretrendszerének, és a RAMI 4.0 modell különböző rétegeibe és dimenzióiba is beilleszthetők, valamint az IoT-eszközök és a vezeték nélküli technológiák az Ipar 4.0 alapú alkalmazások kulcsfontosságú elemei, mivel lehetővé teszik a valós idejű adatgyűjtést, az automatizált és intelligens gyártási rendszerek kialakítását, valamint a hálózatba kapcsolt, energiahatékony és rugalmas termelési folyamatokat.

Az Ipar 4.0 az automatizált és digitalizált gyártási folyamatokat helyezi előtérbe, amely megköveteli az decentralizációt és a valós idejű adatfeldolgozást. Ahhoz, hogy a tézist igazolni tudjuk meg kell vizsgálnunk a fent említett technológiák illeszkedését a RAMI modell minden szintjéhez, dimenziójához [1]. Ezt igazolnunk legkönnyebb a hierarchia szinttel („X" tengely) tudjuk megtenni. Az IoT-eszközök, mint az okos szenzorok, aktuátorok és csatlakoztatott ipari berendezések közvetlenül az eszközszinten találhatók [1] . Ezek a

hálózatba kötött eszközök biztosítják az adatok gyűjtését és cseréjét. A vezeték nélküli szenzorhálózatok szintén az eszközszinten helyezkednek el. Ezek felelősek az érzékelési adatgyűjtésért (pl. hőmérséklet, rezgés) és az adatok továbbításáért a hálózat magasabb szintjeire. A WSN hálózatok egy nagy előnye, hogy akár beltéri lokalizációra, helymeghatározásra is tudjuk őket használni. Az Ipar 4.0 megoldásoknál sok esetben szükség van az ilyen lokalizációs eljárásokra, hogy követni tudjuk a termékek helyét a gyártósorokon, illetve a raktárakban egyaránt [2]. A kutatás során arra kerestünk megoldást, hogy hogyan lehet végig követni egy összeszerelés alatt álló terméket a gyártósoron [4][5]. A pillanatnyi helyzetmeghatározás mellett próbáltunk más adatokat, környezeti hatásokat is elmenteni a termékről. Ehhez szükség volt a szenzorokat hálózatba kapcsolni egymással. Az IoT-eszközök által generált adatok átvitelét a WSN biztosítja [3]. Itt a vezeték nélküli kommunikáció protokolljai (pl. ZigBee, LoRa, vagy BLE) kiemelt szerepet kapnak.

A RAMI 4.0 modell „Életciklus és értéklánc” dimenziója („Y” tengely) tekintetében Az IoT és a WSN kulcsfontosságú a termék életciklusának minden szakaszában:

- Tervezés - Az IoT és a WSN adatokat szolgáltat a rendszerek optimalizálásához.
- Gyártás és üzemeltetés - A WSN-en keresztül gyűjtött valós idejű adatok lehetővé teszik a gyártási folyamatok monitorozását és optimalizálását. Az IoT-alapú eszközök pedig a gépek prediktív karbantartását és hatékonyabb üzemeltetését biztosítják.
- Szervizelés - Az IoT szenzorok folyamatos monitorozása segít a termék működési állapotának nyomon követésében.

A RAMI „Z” tengelye képviseli az Ipar 4.0 technológiai szinteket. Az IoT-eszközök és a WSN elemek (szenzorok, aktuátorok és kommunikációs modulok) a „fizikai rétegben” (Asset Layer) helyezkednek el. Az IoT-alapú rendszerek és a WSN adatokat gyűjtenek a fizikai rétegből, amelyeket az „Integrációs rétegen” (Integration

Layer) keresztül továbbítanak a magasabb szintű feldolgozási rétegekhez a „kommunikációs réteg” (Communication Layer) felhasználásával. Az IoT és WSN kommunikációs protokolljai (pl. MQTT, HTTP, ZigBee) ebben a „kommunikációs rétegben” találhatók. Ezek biztosítják az adatok átvitelét és cseréjét az eszközök és rendszerek között. Az „Információs rétegben” (Information Layer) történik meg a begyűjtött IoT és WSN adatok elemzése, tárolása és feldolgozása. Ezen a szinten alkalmazhatóak a Big Data és más analitikai technológiák. A „funkcionális réteg” (Functional Layer) az IoT-eszközök által biztosított funkciók és szolgáltatások, például automatizálási feladatok vagy valós idejű monitorozására és modellezésére szolgál.

Ha összefoglaljuk a fent említett tényeket igazolhatjuk, hogy az IoT eszközök és a WSN megoldások az Ipar 4.0 alapvető építőköveit alkotják, mivel lehetővé teszik az adatgyűjtést, a kommunikációt és az intelligens döntéshozatalt a gyártási rendszerekben és szerves részét képezik az ipari fejlődésnek.

Tézis 2:

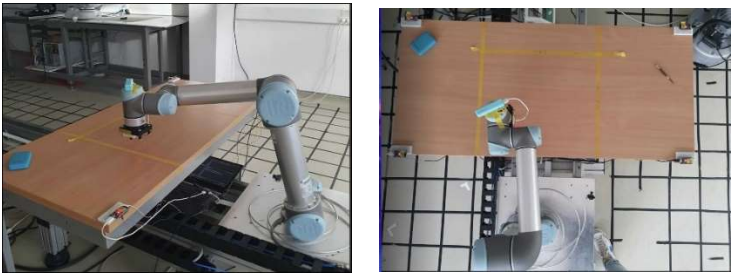
A vezeték nélküli szenzorhálózaton (WSN) alapuló RSSI-alapú helymeghatározás hatékony megoldás az Ipar 4.0 automatizált rendszereiben, amely lehetővé teszi az ipari robotok autonóm navigációját és munkafolyamatokba való integrációját. A technológia valós idejű adatfeldolgozást biztosít, csökkenti a fizikai infrastruktúra szükségességét, és adaptív módon képes reagálni a dinamikusan változó környezetre.

Kutatásom egyik fő irányvonala az IoT és a WSN megoldások alkalmazása Ipar 4.0 megoldások esetében [6][8][9]. A célunk az volt, hogy igazoljuk a vezeték nélküli szenzorhálózatokra (WSN) épülő RSSI-alapú helymeghatározás alkalmazhatóságát ipari robotok navigációja esetében. Az Ipar 4.0 keretrendszerében kiemelt szerepet kapnak az intelligens gyártó rendszerek, amelyek autonóm működést, valós idejű adatelemzést teszik lehetővé [7]. Ennek megfelelően a kutatás során a következő szempontokat vizsgáltuk:

- Mennyire pontos az RSSI-alapú helymeghatározás ipari környezetben?

- Milyen tényezők befolyásolják az RSSI mérési eredményeket?
- Lehet-e az RSSI technológiát adaptálni egy intelligens ipari robot navigációs rendszeréhez?

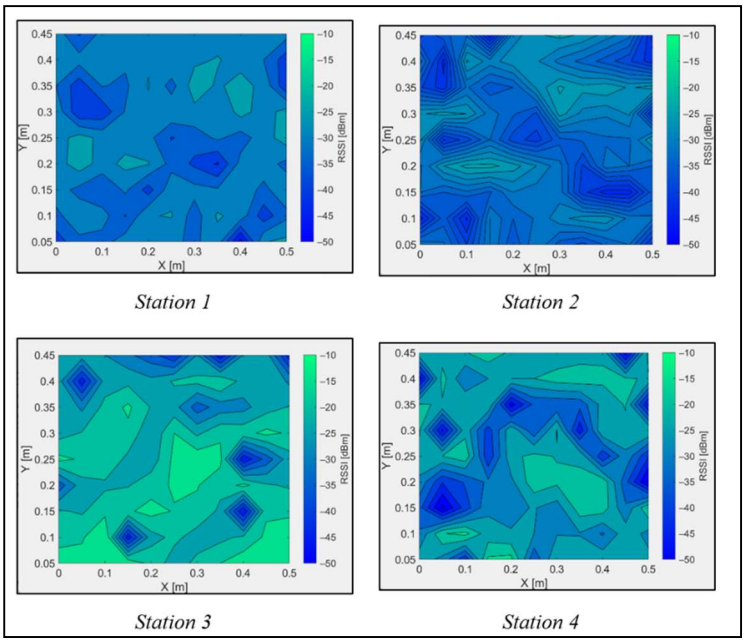
A tézis igazolása érdekében laboratóriumi környezetben kísérleteket végeztünk, amelyek során különböző mérési konfigurációkkal elemeztük az RSSI értékek stabilitását és pontosságát.



2. ábra: A WSN hálózat telepítve az ipari robotcellánál [6]

Az RSSI (Received Signal Strength Indicator) egy mérőszám, amely a vezeték nélküli kommunikáció során fogadott jel erősségét jellemzi [6]. Az RSSI-alapú helymeghatározás azzal a feltételezéssel működik, hogy a jel intenzitása csökken a távolság növekedésével. A

laboratóriumi megvalósítás egy ESP32 mikrovezérlőkre épülő WiFi-hálózat segítségével történt. A robot munkaterületét egy 5 cm-es felbontású rácshálózatként modelleztük, ahol minden egyes pontban 4 különböző helyen elhelyezett érzékelővel rögzítettük az RSSI értékeket. Az ábra négy különálló hőtérképet tartalmaz, amelyeket a négy mérési állomás (receiver) készített a munkaterületen belül (3. ábra).



3. ábra: 4 munkaállomás hőtérképe (Heat Map) [6]

Minden egyes hőtérkép egy vizuális reprezentációja az RSSI jelek térbeli eloszlásának az adott leadó szempontjából. Az ábrán a színek eltérései a különböző jelerősséget reprezentálják. Az egyes hőtérképek nem egyforma lefedettséget és jelerősséget mutatnak, ami arra utal, hogy az RSSI jelek terjedése nem homogén a munkaterületen belül. Ez annak köszönhető, hogy az érzékelők nem egyenletesen fogadják a jeleket, ami az ESP32 mikrovezérlők egyedi tulajdonságaiból fakadhat. Továbbá, a munkaterületen belüli akadályok vagy fémes felületek visszaverődése torzíthatja a jelerősséget. Egyes állomások jobban tudják követni a jeleket egy adott tartományon belül, míg más állomásokon a mérési torzulások nagyobb mértékűek.

A kutatás [6] eredményének összefoglaló táblázata néhány random pozíció esetében látható az 1. táblázatban.

1. táblázat: RSSI helyzet meghatározás alapján kapott pozíciók

Random pozició	Eredeti pozíció	Pozició meghatározás 1. mérés esetében	Távolság az eredeti pontól [cm]
R1	14	3	5
R2	36	11	42,7
R3	58	20	36,1
R4	80	91	5,0
R5	82	89	20,6
R6	60	40	14,1
R7	38	92	25,5
R8	16	58	22,4
R9	18	74	25,5

Következtetésként a legnagyobb eltérések olyan területeken voltak, ahol a hullám visszaverődések torzították az adatokat. A helymeghatározás 5–10 cm-es pontossággal működött a legjobb esetben, de a cikk eredményei alapján az RSSI alapú helymeghatározás bizonyos körülmények között pontos és megbízható módszer lehet az ipari robotok navigációjához. Azonban a rendszer tökéletesítése szükséges az Ipar 4.0 követelményeinek teljes kielégítéséhez. A WSN alapú helymeghatározás költséghatékony és könnyen telepíthető. A rendszer lehetőséget biztosít biztonsági zónák létrehozására így akár „safety” megoldások

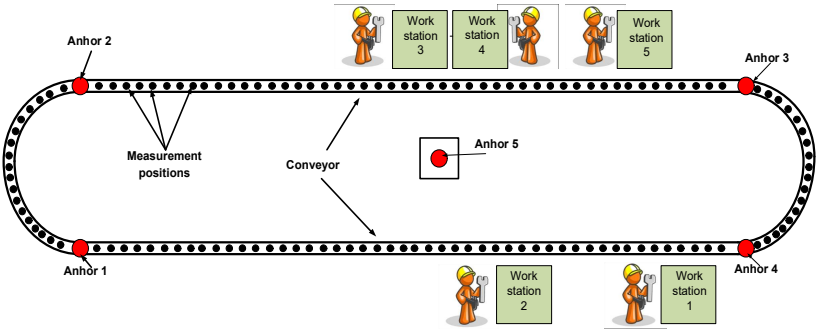
kialakítására is használható. Az eredmények részletesebb kiértékelése az [6] publikációban található.

Tézis 3:

A vezeték nélküli szenzor hálózatok (WSN) és IoT-technológiák integrálása az Ipar 4.0 környezetben lehetővé teszi az intelligens összeszerelési rendszerek fejlesztését. Az adaptív felügyeleti rendszerek valós idejű mérés és adatgyűjtést biztosítanak, optimalizálják az összeszerelési folyamatokat, és növelik a gyártás rugalmasságát, miközben csökkentik az emberi beavatkozás szükségességét és növelik a termékek minőségét.

A tézisem az Ipar 4.0 elvárásainak megfelelő összeszerelő rendszerek fejlesztésére összpontosít, különös tekintettel a vezeték nélküli szenzorhálózatok (WSN) és az IoT alkalmazására. A kutatásom fő célja egy testreszabott, WSN-alapú felügyeleti rendszer kifejlesztése, amely képes az összeszerelési folyamatok hatékony monitorozására és irányítására [5][14].

Kutatásunk fő irányvonala a gyártósorokon összeszerelés alatt álló termékek követése és minőségének biztosítása. Vezetéknélküli szenzorhálózatot telepítettünk egy összeszerelő és gyártó rendszerre, amivel követni tudtuk a termékek helyét és az azokat ért környezeti hatásokat. A kutatásunkat laboratóriumi és valós ipari környezetben is megvalósítottuk. A rendszernek két fő feladata volt: Az egyik az, hogy a minden pillanatban lokalizálni tudjuk az összeszerelés alatt álló terméket. A másik pedig az, hogy a termékeken lévő szenzorok segítségével követni tudjuk a termékeket ért hatásokat (hőmérséklet, páratartalom, ütések). A szenzorhálózat elhelyezkedése a 4. ábrán látható.



4. ábra: A gyártósor grafikus ábrázolása [5]

A kutatás során 5 fix pozícióban elhelyezett vezetéknélküli szenzort (piros pontok - horgonyok) telepítettünk. A fekete pontok az RSSI mérések helyét jelölik az RSSI térkép elkészítésére. A gyártósoron 5 munkaállomás található. Kutatásom során a "fingerprint" lokalizációs módszert alkalmaztam, amely a vezetéknélküli jel erősséget (RSSI) használja a gyártósoron lévő alkatrészek pontos helyzetének meghatározására. Az RSSI alapú helymeghatározás matematikai modellje azon alapul, hogy a jel erőssége fordítottan arányos a távolsággal. Ennek pontos matematikai modellezése lehetővé teszi a gyártósorokon mozgó alkatrészek dinamikus nyomon követését. A helyzetmeghatározásra neurális hálót (ANN) és súlyozott k-legközelebbi szomszéd (WkNN) módszert használtunk. Az eredményeket a 2. táblázatban foglaltam össze.

2. táblázat: Helyzetmeghatározással kapcsolatos eredményeket összesítő táblázat

Mérési szempont	Érték
Átlagos lokalizációs hiba (ANN, labor)	0.5 m
Átlagos lokalizációs hiba (ANN, ipari környezet)	1.2 m
Átlagos lokalizációs hiba (WkNN, labor)	0.3 m
Átlagos lokalizációs hiba (WkNN, ipari környezet)	0.8 m
5 horgony alkalmazása	0.6 m
4 horgony alkalmazása	0.75 m
3 horgony alkalmazása	1.2 m

A valós ipari környezetben végzett kutatásunk eredményeit egy laboratóriumi (tantermi) környezethez viszonyítva értékeltük. Laboratóriumi környezetben mindkét algoritmus jól teljesített, de a WkNN módszer pontosabb volt (0.3m hiba az ANN 0.5m hibájával szemben). Ipari környezetben az ANN pontossága csökkent, a lokalizációs hiba 1.2 méterre nőtt, míg a WkNN hiba csak 0.8 méter volt. A WkNN algoritmus robusztusabbnak bizonyult az ipari környezetben, ahol a rádiójelek interferenciája és visszaverődése jelentős hatással lehetett a lokalizáció pontosságára. A

kutatásunkban azt is vizsgáltuk, hogy milyen eredményeket kapunk, ha különböző számú fix pozíciójú jeladót (horgonyt) alkalmazunk. A lokalizációs pontosság a horgonyok számának növekedésével javult, mivel több referenciaérték állt rendelkezésre a helymeghatározáshoz. 5 horgony alkalmazása esetén a lokalizációs hiba 0.6 méterre csökkent, ami jelentősen jobb eredmény a kevesebb horgony használatához viszonyítva. A 3 horgony alapú rendszer esetén a hiba jelentősen megnőtt (1.2 m), mivel kevesebb pont állt rendelkezésre a helymeghatározás pontos elvégzéséhez. A helymeghatározás mellett megalkottunk egy négy rétegű modellt is, amely képes a szenzorokról érkező mérési adatok összegyűjtésére, továbbítására és kiértékelésére is.

A munkánkban [5] bemutatott négy rétegű WSN-alapú felügyeleti modell bizonyítja, hogy az érzékelők valós idejű adatokat szolgáltatnak az összeszerelési folyamatok állapotáról, így lehetővé válik a gyártás optimalizálása. Az ipari környezetben végzett mérések kimutatták, hogy a lokalizációs algoritmusok, különösen a WkNN módszer, jelentősen csökkentik a pozíciómeghatározási hibát,

amely kulcsfontosságú az összeszerelési folyamatok precizitása és hatékonysága szempontjából.

A kutatásunk továbbá rávilágított arra, hogy a WSN technológia csökkenti az emberi beavatkozás szükségességét, mivel az automatizált adatgyűjtés és döntéshozatal jelentősen lecsökkenti az emberi operátorok általi manuális ellenőrzések számát. Az adaptív felügyeleti rendszerek segítségével az érzékelők folyamatosan megfigyelik a szerelési folyamatokat, és a hibák azonnali észlelése révén lehetővé válik a valós idejű beavatkozás, amely minimalizálja a gyártási hibákat és növeli a végtermék minőségét. Ez azt igazolja, hogy a WSN technológia megfelelő tervezése és implementálása elengedhetetlen az Ipar 4.0 követelményeihez való illeszkedéshez.

Az eredmények megerősítik, hogy a WSN és IoT technológiák integrációja kulcsfontosságú az intelligens összeszerelési rendszerek megvalósításában, és ezek a fejlesztések elengedhetetlenek az Ipar 4.0 sikeres alkalmazásához.

Tézis 4:

A vezeték nélküli szenzor hálózatok (WSN), a Wi-Fi és az Ultra-Wideband (UWB) a vezeték nélküli lokalizációs technológiák integrációja alkalmazható egészségügyi intézményekben használt diagnosztikai berendezések nyomon követésére. Ezáltal segít optimalizálni a kórházi eszközgazdálkodást és a betegellátási folyamatokat, mivel valós idejű információt biztosít a berendezések helyzetéről és elérhetőségéről.

Az egészségügyi környezetben egyre növekvő igény mutatkozik a pontos és valós idejű beltéri helymeghatározás iránt, amely túlmutat a hagyományos GPS-technológiákon. A kórházak egyik legnagyobb kihívása a mobil diagnosztikai eszközök követése, valamint a személyzet tevékenységének összehangolása [2].

A különféle korházi tárgyak, orvostechnikai műszerek, akár a személyzet pontos helyének meghatározása értékes időt takaríthat meg az ellátó személyzet számára a napi munka során. Ez különösen fontos lehet a kórház nagyobb

terheltsége esetén, mint például egy járvány vagy valamilyen váratlan baleset bekövetkezte.

Munkánk keretében egy magyarországi járóbeteg-ellátó intézményben egy olyan gyakorlati megoldást dolgoztunk ki, amely az intézményben közösen használt mobil ultrahang készülék lokalizációját és nyomon követését valósítja meg. A rendszer kidolgozására három technológiát teszteltünk: Wi-Fi (RSSI alapú módszer), Bluetooth Low Energy (BLE) jeladók, valamint Ultra-Wideband (UWB) ToF-alapú trilaterációval.

Az egészségügyi intézményekben alkalmazott lokalizációs rendszereknek kiemelten pontosnak, megbízhatónak és interferenciával szemben ellenállónak kell lenniük. Ezek az épületek gyakran vastag falakkal rendelkeznek, és egyes részlegeken, mint például a radiológián az ólomárnyékolás vagy más jelfogó anyagok is jelen lehetnek, amelyek csökkentik a rádiófrekvenciás technológiák hatékonyságát. Továbbá az épületekben rendszerint már működnek Wi-Fi hálózatok, amelyeket a technológia kiválasztásánál figyelembe lehet venni [10].

A munkánk célja egy olyan rendszer kifejlesztése volt, amely képes jelezni egy konkrét eszköz, a mi esetünkben egy MINDRAY M6 mobil ultrahang készülék (5. ábra) helyzetét az épületen belül. A rendszer legfontosabb követelménye az volt, hogy jelezze, ha a diagnosztikai készüléket a kijelölt helyétől több mint 3 méteres távolságra elmozdították.



5. ábra: MINDRAY M6 mobil ultrahang készülék [8]

Az eszközt a klinikai gyakorlatban gyakran mozgatják a betegek ágya mellé vagy más vizsgálati helyiségekbe, azonban a használat után vissza kellene kerülnie az eredeti állomására. Mivel ez a gyakorlatban nem mindig történik meg, a napi munkafolyamatokban fennakadások, késések és konfliktusok alakulhatnak ki. E probléma megoldására olyan pozicionáló megoldást kellett találni, amely valós idejű jelzést ad az eszköz helyváltoztatásáról. A kiválasztott megoldásnak egyszerűnek, kis méretűnek, olcsónak és könnyen beszerezhetőnek kellett lennie. A rendelkezésre álló modulok közül az ESP32 mikrovezérlő bizonyult a legalkalmasabbnak [2]. A megoldásokat konkrétan ESP32-WROOM-32D fejlesztőlapokkal implementáltuk, egyedi Arduino-kóddal és MATLAB-alapú adatfeldolgozással.

ESP32 modul választása számos előnnyel járt a beltéri Wi-Fi alapú lokalizációs rendszer kialakításánál. Az ESP32-WROOM-32D chip kétmagos processzorral rendelkezik, ami lehetővé teszi a párhuzamos feldolgozást. Ez különösen fontos a lokalizációs rendszerekben, ahol a valós idejű, gyors adatfeldolgozás

a Wi-Fi jelek folyamatos mérése és kiértékelése alapvető követelmény.

Az ESP32 beépített Wi-Fi és Bluetooth funkciókkal is rendelkezik [10], így biztosítva a vezeték nélküli kommunikációt, ami a jövőbeni fejlesztések és integrációk szempontjából előnyös. Emellett olcsó, könnyen beszerezhető, széles körű dokumentációval és közösségi támogatással bír. Energiatakarékos üzemmódjai révén hosszabb üzemidő érhető el akkumulátoros vagy power bankról történő működtetés esetén. Továbbá kompatibilis az Arduino IDE-vel és számos nyílt forráskódú könyvtárral, ami gyors fejlesztést és egyszerű prototípus-készítést tesz lehetővé.

A kísérletek során több ESP32-WROVER modul is alkalmazásra került, amely nagyobb RAM-kapacitásával és stabilabb működésével lehetővé tette az UWB-alapú lokalizáció megvalósítását.

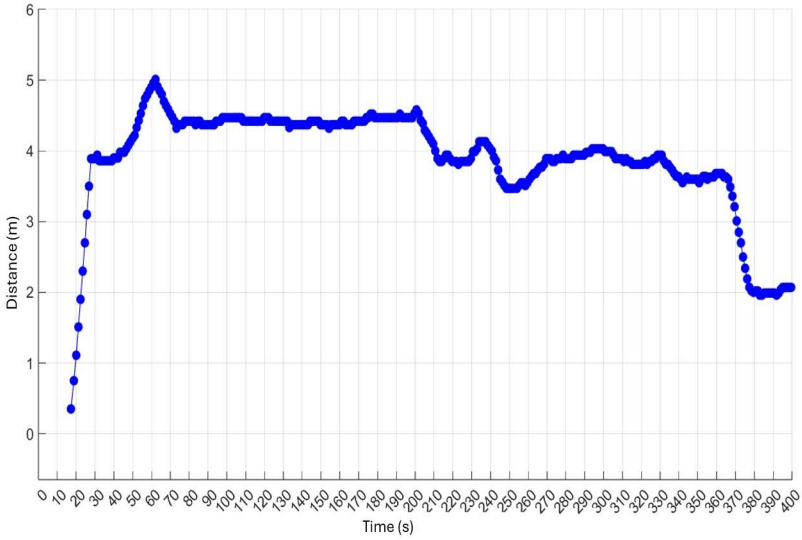
Az ESP32 modulok programozásához az Arduino IDE került felhasználásra. Az Arduino környezet előnye a felhasználóbarát felület, az egyszerű könyvtárkezelés és a

széles körben elérhető bővítmények, amelyek különféle szenzorok, kommunikációs protokollok és perifériák integrálását teszik lehetővé. Az Arduino platform kifejezetten gyors prototípus-fejlesztésre alkalmas, mivel alapfunkciók (pl. Wi-Fi kommunikáció, Bluetooth kapcsolat) rövid kód segítségével is megvalósíthatók. Az ESP32 mikrokontroller sokoldalúsága (GPIO, ADC, DAC, SPI, I2C) révén számos hardverkomponens integrálható, miközben az energiafogyasztás szabályozható. A mérési eredmények MATLAB környezetben kerültek vizualizálásra, ahol a soros porton keresztül kapott adatok feldolgozása és kiértékelése történt. Az ESP32 modul beépített Wi-Fi képességei továbbá hatékonyan felhasználhatók beltéri lokalizációs rendszerekben a meglévő vezeték nélküli infrastruktúra kiaknázásával. Az alkalmazott módszer a Received Signal Strength Indicator (RSSI) értékekre épült, amelyekből helyzetbecslés végezhető. Ez a technika költséghatékony megoldást kínál, ugyanakkor érzékeny a környezeti változásokra: nagy tárgyak elmozdítása, bútorok átrendezése vagy a belső terek átalakítása jelentősen módosíthatja a rádiójelek terjedését, így az adatbázis

rendszeres frissítést igényel. Ez különösen dinamikus környezetekben jelent kihívást, ahol a belső elrendezés gyakran változik. Mindazonáltal a Wi-Fi alapú lokalizáció előnye, hogy alacsony költséggel telepíthető, hiszen nincs szükség új infrastruktúrára, mivel az épületekben eleve működnek Wi-Fi hálózatok. Ugyanakkor kültéri környezetben a Wi-Fi lefedettség és jelstabilitás korlátozott, így a módszer hatékonysága csökken. A beltéri lokalizáció számos technológiát foglal magában, amelyek mind különböző előnyökkel és hátrányokkal rendelkeznek [2].

A munkánk során először a különféle technológiák stabilitását vizsgáltuk. Arra voltunk kíváncsiak, hogyan változik a jelszint időben egy bizonyos helyiségben. A Wi-Fi alapú rendszer (6. ábra) működőképes volt az eszköz elmozdításának jelzésére, azonban a pontos távolság meghatározásában nem bizonyult megbízhatónak. A tesztelt egyszerű Wi-Fi-alapú lokalizációs rendszer beltéri környezetben működik és az eszközök pozícióját a Wi-Fi jelek erőssége, pontosabban az RSSI-értékek alapján határozza meg. Az általunk

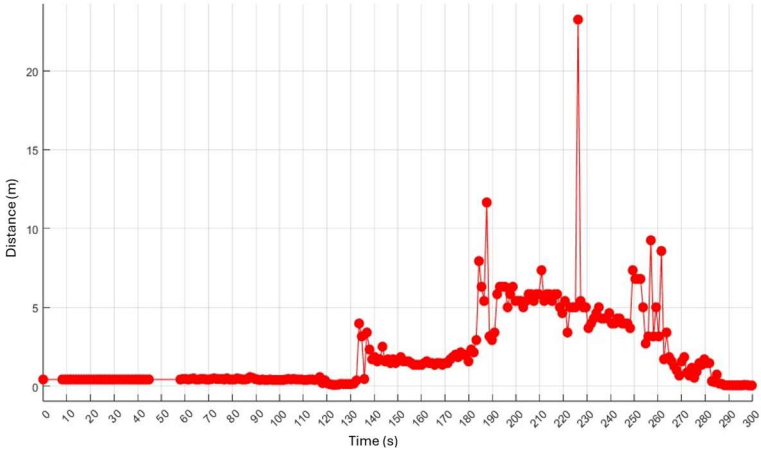
használt ESP32 mikrokontrollerek segítségével az adatok UDP protokollon keresztül kerülnek továbbításra, ami gyors és időzített kommunikációt tesz lehetővé az eszközök között. A rendszer ujjlenyomat-alapú módszert alkalmaz, amely egy előzetesen rögzített jeltérképet használ referenciaként; ehhez viszonyítja a pillanatnyi jelerősségeket a pozíció kiszámítása érdekében. Ez a rendkívül olcsó és egyszerű rendszer hatékonynak bizonyult annak jelzésére, ha egy eszközt elmozdítottak, ugyanakkor a távolság pontos meghatározásában nem volt kellően precíz. Előnye, hogy nem igényelt új infrastruktúrát, mivel az épület meglévő Wi-Fi hálózatára támaszkodott. Ugyanakkor hátrányt jelentett, hogy érzékenyen reagált a környezeti változásokra és zajokra, amelyek kedvezőtlenül befolyásolták a pontosságát



6. ábra: A Wi-Fi jel stabilitásának grafikonja [2]

Az ESP32 modul beépített Bluetooth-funkciói szintén tesztelésre kerültek, lehetővé téve az eszközök vezeték nélküli működését. Bár a Bluetooth-alapú távolságmérés egyszerű és kényelmes megoldás, a beltéri környezetben jelentős pontossági problémák adódtak. Az RSSI-értéket erősen befolyásolták a környezeti tényezők, például a falak, ajtók, emberi mozgás és az elektromágneses interferencia, ami gyakran pontatlan mérésekhez vezetett (7. ábra). Ugyanakkor az eszközök közötti távolság meghatározása mégis hasznos lehet olyan esetekben,

amikor a cél mindössze annak ellenőrzése, hogy az eszközök egy kijelölt területen például egy helyiségben belül maradnak-e. Ez a módszer leginkább akkor alkalmazható hatékonyan, ha a cél az eszközök mozgásának érzékelése, amely hang- vagy fényjelzéssel kombinálva riasztást adhat, amennyiben az eszköz elhagyja a kijelölt zónát.



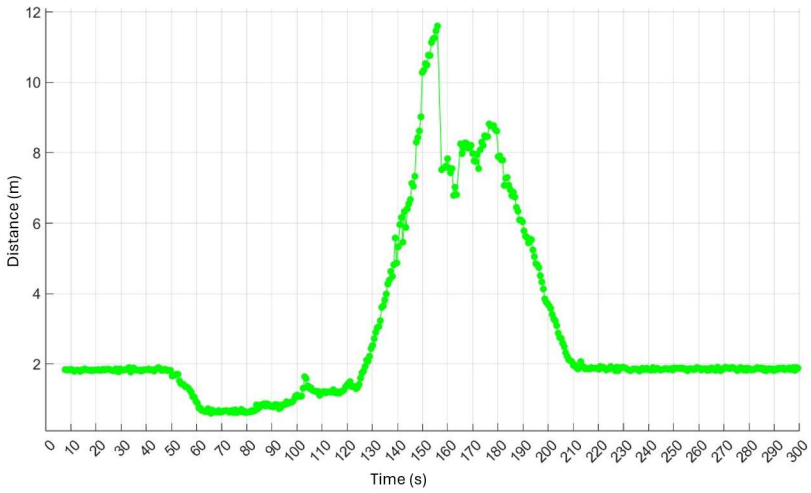
7. ábra: Bluetooth jel stabilitásának grafikonja [2]

Az UWB alapú rendszer: három ESP32-WROVER modullal és a Decawave DW1000 chippel valósítottuk meg [2]. A rendszer nanomásodperces impulzusokat használ a pontos távolságméréshez, és ellenáll a beltéri

többutas terjedésnek. A Time of Flight (ToF), Time of Arrival (ToA) és Time Difference of Arrival (TDoA) módszerekkel néhány centiméteres pontosság érhető el, így ez a technológia bizonyult a legmegbízhatóbbnak.

Az UWB-alapú lokalizációs rendszer esetében három ESP32-Wrover modult használtunk. A rendszer rendkívül rövid, nanoszekundumos impulzusokra épül, amelyek precíz és energiahatékony távolságmérést tesznek lehetővé. Az UWB-technológia széles frekvenciatartományban működik (500 MHz felett) [2] és kiválóan ellenáll a beltéri többutas terjedésből eredő interferenciáknak, így visszaverődő környezetben is pontos helymeghatározást biztosít. A rendszer egy jeladó (tag) és több referencia pont (anchor) közötti távolságot méri, jellemzően ToF, ToA és TDoA időalapú technikák alkalmazásával. Ezek az időalapú módszerek lehetővé teszik a pozíció centiméteres pontosságú meghatározását (8. ábra).

Az ábrák időalapú megjelenítése lehetővé teszi a lokalizációs rendszer dinamikus viselkedésének, stabilitásának és valós idejű teljesítményének elemzését.



8. ábra: Az UWB-alapú rendszer stabilitásának grafikonja [2]

Mivel a mérési folyamat során az RSSI és távolságértékek folyamatosan változnak az idő függvényében, az időalapú ábrázolás jól szemlélteti a rendszer reakcióját a mozgásra, az interferenciákra és a környezeti zajokra.

Térbeli (x, y koordinátás) ábrázolás esetén a hibák összegződnek, és a valós idejű fluktuációk kevésbé követhetők. Az időalapú megjelenítés pontosan megmutatja mennyire stabil a mért jel, milyen gyorsan reagál a rendszer a pozícióváltozásra és hol jelentkeznek

jelvesztések vagy zavarok. E megközelítés tehát nemcsak az aktuális helymeghatározás eredményét mutatja, hanem a mérési folyamat minőségét és megbízhatóságát is vizsgálhatóvá teszi.

A vizsgált technológiák közül az UWB-alapú lokalizációs rendszer bizonyult mind megvalósíthatónak, mind kellően pontosnak az adott feladat szempontjából. Emeletenként három referencia pont telepítésével az eszközök pozíciója megbízhatóan meghatározhatóvá vált, és lehetőséget biztosított a kórházi diagnosztikai berendezések valós idejű nyomon követésére is.

3 A kutatás és a bemutatott eredmények hatása, visszhangja

A bemutatott kutatásaim eredményeit konferenciákon, workshopokon és folyóiratokban egyaránt bemutattam, illetve publikáltam. A tézisekkel kapcsolatos publikált eredményekre összesen 44 független hivatkozás található az MTMT adatbázisában. A hivatkozó publikációk között hazai és nemzetközi publikációk is találhatók. Az egyik legnagyobb hatású cikknek a „Wireless Sensor Network Aided Assembly Line Monitoring According to Expectations of Industry 4.0” [14], tekinthető, amelyet eddig 15 alkalommal idéztek. Ez a munka jelentős szerepet játszott a beltéri helymeghatározás és az intelligens érzékelőhálózatok fejlődésében, különösen a mesterséges intelligencia-alapú lokalizációs algoritmusok terén. Az ezt idéző publikációk jellemzően IoT-alapú pozícionálási rendszereket és mélytanulási módszereket fejlesztettek tovább főként az okosgyárak és az érzékelőhálózatok fejlesztésének támogatására. Olyan IoT-alapú gyártási megoldásokat és gépi tanulási

modelleket fejlesztettek tovább, amelyek segítenek az összeszerelősorok optimalizálásában.

A kiterjesztett valósággal kapcsolatos publikációm („Augmented Reality Based Distant Maintenance Approach” [3]) 17 idézést kapott, főként az ipari karbantartás és a távoli segítségnyújtás területén. Az ezt idéző tanulmányok az AR-alapú karbantartási rendszerek és az ember-gép együttműködés fejlesztésére fókuszálnak. Kutatásaink során olyan eredményeket publikáltunk, amelyek irányadó, referencia értékkel bírnak más, hasonló témájú tudományos munkák számára. Különösen azoknak a kutatóknak nyújtanak nélkülözhetetlen hivatkozási alapot, akik az Ipar 4.0-hoz kapcsolódó területeken, azon belül is az IoT és WSN alapú rendszerek fejlesztésével és elemzésével foglalkoznak.

4 Irodalmi hivatkozások listája

Majid, M., Habib, S., Javed, A. R., Rizwan, M., Srivastava, G., Gadekallu, T. R., & Lin, J. C. W. (2022). Applications of wireless sensor networks and internet of things frameworks in the industry revolution 4.0: A systematic literature review. Sensors, 22(6), 2087.

Malik, P. K., Sharma, R., Singh, R., Gehlot, A., Satapathy, S. C., Alnumay, W. S., ... & Nayak, J. (2021). Industrial Internet of Things and its applications in industry 4.0: State of the art. *Computer Communications*, *166*, 125-139.

García, J.R.R., Martinetti, A., Becker, J.M.J., Singh, S. and van Dongen, L.A., „Towards an industry 4.0-based maintenance approach in the manufacturing processes," *In Research Anthology on Cross-Industry Challenges of Industry 4.0*, IGI Global: Hershey, PA, USA, pp. 1219–1243, 2021.

Konstantinidis, F.K., Kansizoglou, I., Santavas, N., Mouroutsos, S.G. and Gasteratos, A., „MARMA: A Mobile Augmented Reality Maintenance Assistant for

Fast-Track Repair Procedures in the Context of Industry 4.0," *Machines*, vol 8, no. 4, p. 15, 2020.

McFarlane, D., Giannikas, V., Wong, A.C. and Harrison, M., „Product intelligence in industrial control: Theory and practice," *Annual Reviews in Control*, vol. 37, no. 1, pp. 69–88, 2013.

Wollschlaeger, M., Sauter, T. and Jasperneite, J., „The Future of Industrial Communication: Automation Networks in the Era of the Internet of Things and Industry 4.0," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 11, no. 1, pp. 17-27, 2017.

De Beelde, B., Plets, D., & Joseph, W. (2021). Wireless Sensor Networks for Enabling Smart Production Lines in Industry 4.0. *Applied Sciences*, *11*(23), 11248.

Razali, A., Ani, F., & Hashim, N. (2024). Sustaining the role of the university in the society through the Industrial Revolution (IR) 4.0. In *Integration of artificial intelligence in education and industry* (pp. 39-51) Springer

Schweichhart, Karsten. "Reference architectural model industrie 4.0 (rami 4.0)." *An Introduction* 40 (vol. 9999, pp. 1–13. Springer, Heidelberg (2016).

Yong, C. H., Lee, W. P., & Lazarus, C. (2021). Industry 4.0 reference architectural models: Critical review and opportunities. *International Journal of Advanced Research in Engineering Innovation*, *3*(4), 40-49.

5 A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemények

[1] Pletikoszity, Á., Fürstner, I., & Gogolák, L. Industry 4.0 and Rami Model Based Art in Microindustry for Polishing Application. In Security-Related Advanced Technologies in Critical Infrastructure Protection: Theoretical and Practical Approach (pp. 331-340). Dordrecht: Springer Netherlands. (2022).

[2] Gogolák, L. Wireless Sensor Network Based Localization for Enhanced Device Tracking in Healthcare Environments, Analecta Technica Szegedinensia 19, 1 pp. 1-8., (2025)

[3] Simon, J., Gogolák, L., Sárosi, J. and Fürstner, I., „Augmented Reality Based Distant Maintenance Approach," *Actuators*, vol. 12, no. 7, p. 15, (2023).

[4] Simon, J., & Gogolák, L. Development of an IoT based 3D printed Mobile Robot Platform for training of Mechatronics Engineering Students. *Analecta Technica Szegedinensia*, *18*(1), 18-30. (2024).

[5] Gogolák, L. and Fürstner, I., „Wireless Sensor Network Aided Assembly Line Monitoring According to Expectations of Industry 4.0," *Aplied Sciences*, vol. 11, no. 1, 25, (2021).

[6] Gogolák L, Robot Navigation Based on Wireless Sensor Networks and Its Security Challenges in Industrial Environments, Critical Infrastructure Protection: Advanced Technologies for Crisis Prevention and Response) pp. 161-176. , (2025)

[7] Simon, J., Gogolák, L., & Sárosi, J. (2024). Deep Reinforcement Learning-Assisted Teaching Strategy for Industrial Robot Manipulator. *Applied Sciences (2076-3417)*, *14*(2023).

[8] Simon, J. Gogolák, L. From Digital Design to Edible Art: The Role of Additive Manufacturing in Shaping

the Future of Food, Journal Of Manufacturing And Materials Processing 9 : 7 Paper: 217 , 22 p. (2025)

[9] Gogolák, L., Simon, J., Pletikosity, Á., & Fürstner, I. Quantitative Assessment of UAV Assisted Particle Spraying Distribution in Agriculture: An Image Analysis Approach Using Water-Sensitive Papers. International journal of electrical and computer engineering systems, 15(7), 553-562. (2024).

[10] Simon, J. and Gogolák L. Supply Chain Management Using Automatic Guided Vehicle Systems in Smart Factory Logistics, The Impact of the Energy Dependency on Critical Infrastructure Protection, Springer Nature Switzerland (2025) 765 p. pp. 611-624. Paper: Chapter 49 , 14 p.

6 További tudományos közlemények

A fejezetben csak azok a folyóiratokban publikált tudományos közlemények kerülnek felsorolásra, melyek jegyezve vannak a Scopus vagy Web of Science, illetve az MTA IX. adatbázisokban.

[11] Szuchy, P., Molnár, T., Bíró, I., Csikós, S., Gogolák, L., & Sárosi, J. (2021). Bending fatigue tests of carbon fiber reinforced epoxy resin composite plates. *Acta Polytechnica Hungarica*, *18*(2), 199-213.

[12] Arsovic, B., Namestovski, Z., & Gogolak, L. (2013). Improvement of university courses on teachers'training faculty by using of hypervideo design projects. Metalurgia International, 18(5), 231.

[13] Fürstner, I., & Gogolak, L. (2015). Presentation of the developed mechatronic devices for exhibition purposes. *International Journal of Electrical and Computer Engineering Systems*, *6*(1), 23-28.

[14] Gogolak, L., Pletl, S., & Kukolj, D. (2013). Neural network-based indoor localization in WSN environments. *Acta Polytechnica Hungarica*, *10*(6), 221-235.