

Veszélyes, térbeli események megbízható megfigyelése vezeték nélküli szenzorhálózatokkal

Reziliens, környezetérzékeny, többutas
útvonalválasztási protokollok tervezése és
elemzése

Üveges Bálint Áron

Témavezető:

Dr. Oláh András, PhD

A PhD Disszertáció tézisei



Pázmány Péter Katolikus Egyetem
Információs Technológiai és Bionikai Kar
Roska Tamás Műszaki és Természettudományi Doktori Iskola

2025

1. Bevezető

Az ipari tevékenységek közvetlen és közvetett hatásai kézzel foghatóvá váltak az elmúlt évtizedekben. A klímaváltozás okozta jelenségek, mint például az erdőtüzek, villám árvizek és földcsuszamlások rendszeresen károsítják a környezetet. Az ipari katasztrófák, különösen az olajszivárgások, vegyianyag szennyezések, és üzemi balesetek egyre gyakrabban fordulnak elő és pusztító hatást gyakorolnak az emberi életre, az élő környezetre, valamint az épített infrastruktúrára. Ilyen veszélyes jelenségek időbeni észlelése elősegíti a megelőzést, védekezést, kárenyhítést, valamint a helyreállítást, mely életet és a környezetet mentheti meg.

A vezeték nélküli kommunikáció, a számítástechnika, az érzékelési, valamint az energiatárolási technológiák folyamatos fejlődése lehetővé tette a vezeték nélküli érzékelőhálózatok (wireless sensor networks, WSN) kifejlesztését. A WSN független, autonóm, érzékelő eszközökből, úgynevezett WSN csomópontokból áll, melyek vezeték nélkül kommunikálnak, valamint infrastruktúrától független energiaforrással rendelkeznek. A WSN csomópontokat nagy kiterjedésű területen helyezik el, míg az érzékelt információkat egy vagy több különleges csomópont, úgynevezett nyelő felé továbbítják további felhasználás céljából. Érzékelési képességeik, elosztott architektúrájuk és infrastruktúrától való függetlenségük miatt a WSN-ek különösen alkalmasak térbeli kiterjedésű veszélyes jelenségek megfigyelésére.

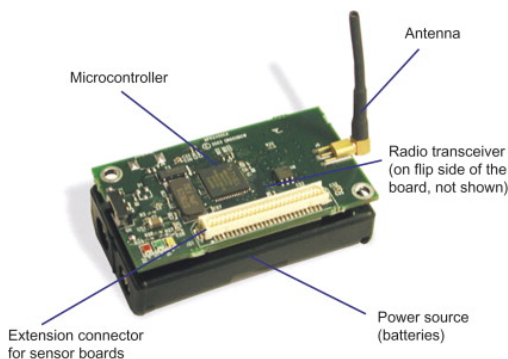
Az információ szállítása egy WSN-ben nem triviális feladat. A hálózat térbeli topológiája miatt a csomópontok többsége nem rendelkezik közvetlen kapcsolattal a nyelőhöz. Az egyes csomópontok adatainak sikeres összegyűjtése érdekében a szomszédos csomópontoknak fogadniuk kell az érkező információt, és azt egy meghatározott útvonalon továbbítaniuk kell a nyelő felé, azaz útvonalválasztást kell végezniük. Az e műveleteket leíró szabályokat útvonalválasztási protokollnak nevezzük. A WSN működése során egyes eszközök merülés vagy elhasználódás miatt meghibásodhatnak, míg veszélyes események során egyszerre több csomópont is megsérülhet. Az ilyen meghibásodások a hálózat egyes részeit leválaszthatják, megakadályozva a WSN megbízható működését. Különböző technikák alkalmazhatók ilyen és hasonló helyzetek megelőzésére és enyhítésére, például több független útvonal létrehozása, több nyelő telepítése, valamint a környezeti, hálózati és energiainformációk felhasználása. Ezen megoldásokkal elérhető a megbízható és rugalmas útvonalválasztás, a hálózat élettartamának meghosszabbítása, valamint a hálózat érzékelési képességeinek fenntartása. Veszélyes esemény bekövetkezése esetén a WSN élettartama tovább növelhető a károsodások mobilitás által történő elkerülésével. A csomópontok mozgása azonban megfelelő útvonalválasztási támogatás nélkül hasonlóan a meghibásodásokhoz kedvezőtlen hatásokkal járhat.

Ebben a téziszfüzetben olyan a korszerű útválasztási protokollokat mutatok be, melyek támogatják az egy- és többnyelős WSN hálózatokat és számos technikát alkalmaznak a megbízható és ellenálló információátvitel biztosítására, akár csomóponti mobilitás esetén is. Ezen felül bemutatok a veszélyes folyamatokra,

az érzékelésre, és a mobilitásra vonatkozó modelleket, valamint az útválasztási protokollok megfigyelés során nyújtott teljesítményének értékelésére szolgáló metrikákat.

2. Vezeték nélküli szenzorhálózatok

A vezeték nélküli szenzorhálózatok földfelszíni, elosztott, távérzékelési megoldást kínálnak: az autonóm működésre képes WSN eszközöket, más néven csomópontokat, a megfigyelt területen telepítik (region of interest, ROI). Ezek az Figure 1 látható eszközök önállóak, azaz saját energiaforrással, érzékelőkkel és vezeték nélküli kommunikációs képességekkel rendelkeznek, így nem függenek az infrastruktúrától, és jelentős késleltetés nélkül képesek hosszú ideig megfigyelést végezni. A WSN csomópontok megfizethetőek, ezért a hálózat érzékelési pontossága és lefedettsége könnyen növelhető új csomópontok hozzáadásával. A WSN-ek korlátozott látótávolság (line-of-sight, LOS) esetén is képesek komplex területek megfigyelésére, ahol más távérzékelési technológiák kudarcot vallanának. Ezen felül a WSN csomópontok mozgása tovább növelheti a pontosságot és a lefedettséget, valamint lehetővé teszi a környezeti változásokhoz való alkalmazkodást. Ezek a tulajdonságok különösen alkalmassá teszik a WSN-eket a környezeti megfigyelésre, akár veszélyes események jelenlétében is. Költség szempontjából a WSN-ek nem csupán a műholdakkal vagy a légi platformokkal, hanem a földre telepített, vezetékes rendszerekkel szemben is versenyképes alternatívát jelentenek, amint azt Silvani és Peres [1] is bemutatta.



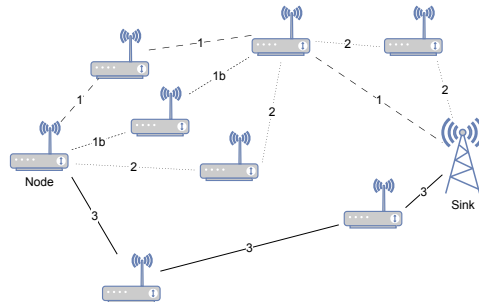
1. ábra. A Mica-Z WSN csomópont és főbb komponensei.

A WSN megfigyelési képességeinek teljes mértékű kiaknázása egy komplex feladat. Az érzékelt információt egy vagy több megkülönböztetett WSN-csomópontnak, úgynevezett nyelőnek kell eljuttatni. Mivel a WSN egy földrajzilag elosztott hálózat, nem minden eszköz kapcsolódik közvetlenül a nyelőhöz: az információátvitel a WSN-csomópontok között, lépésről lépésre történő to-

vábbítással valósítható meg. Ezt, a WSN-ek szempontjából elengedhetetlen tevékenységet útvonalválasztásnak, míg a WSN csomópontokat koordináló szabályok összességét útvonalválasztási protokollnak nevezzük. Az információk sikeres továbbítását csomópontok meghibásodása, zavaró események, változó kommunikációs feltételek és a hálózati topológia változásai akadályozhatják, amelyeket egy megfelelő útvonalválasztási protokollnak kezelnie és csillapítania kell.

3. Vizsgált kutatási területek

A térbeli kiterjedéssel rendelkező veszélyes események WSN-nel történő megfigyelése speciális követelményeket támaszt az útvonalválasztási protokollokkal szemben. Az ilyen eseménynek kitett csomópontok meghibásodhatnak, ami a hálózat egyes részeinek leszakadását eredményezheti, miközben a legértékesebb információkat éppen az esemény közelében lévő csomópontok szolgáltatják. Az olyan megoldások, mint a csomópontok és a nyelő között létrehozott több független útvonal, valamint a mozgásra képes csomópontok javíthatják a hálózat megfigyelési képességeit. Az ilyen megoldásokat azonban megfelelő útválasztási támogatás nélkül nem lehet hatékonyan kihasználni. Kutatásom során a veszélyes események megfigyelésére alkalmazott WSN-ek különböző aspektusait vizsgáltam. Az adott megfigyelt eseménytől függetlenül, a WSN-ek felügyelet nélküli eseménymegfigyelésre történő alkalmazás során adódó követelmények számos hasonlóságot mutatnak. Ezek a követelmények elsődlegesen a rezilienciára, az energiahatékonyságra vagy a megbízhatóságra vonatkoznak. A bemutatott útvonalválasztási protokollok számára reálisztikus környezetként, valamint a tervezési határokat biztosítandó, az erdőtűzet választottam, mint veszélyes esemény.



2. ábra. Különböző útvonalpárok a csomópont és a nyelő között: csomópont-diszjunkt (1,3), kapcsolat-diszjunkt (1,2), és részlegesen diszjunkt (1,1b) útvonalak.

3.1. Többutas útvonalválasztás

Egy kiterjedt területet lefedő WSN-hálózat csomópontjai jellemzően nem kapcsolódnak közvetlenül a nyelőhöz. A távoli csomópontokból érkező információk továbbításához több csomóponton átvitelő kommunikációra van szükség, amely meghatározza a csomópontok sorrendjét – más néven útvonalat –, amelyen keresztül az információt hordozó üzenetek eljuthatnak a nyelőig [2]. Minden útvonal sérülékeny a csomópontok meghibásodásával szemben, amely az adott csomópont összeköttetésének megszakadását eredményezi. A WSN megbízhatóságának növelésére általánosan alkalmazott technika a nyelő felé vezető több útvonal létrehozása, amely így növeli az adott csomópont rendelkezésére álló kapcsolat redundanciáját [3]. A csomópont számára rendelkezésre álló útvonalak szerkezetétől függően a többutas hálózatok tovább osztályozhatók, amint azt a Figure 2 szemlélteti.

3.2. Környezet-érzékeny protokollok

A WSN-ek célja a kijelölt területen bekövetkező fizikai események megfigyelése. Ha az érzékelt esemény veszélyes és pusztító jellegű, az az érzékelő csomóponton is megsemmisítheti. Egy közbenső csomópont kiesése egy vagy több útvonalon megszakadást, így hálózati kimaradást okozhat. A környezet- és kontextus-érzékeny útválasztási protokollok a csomópontok által érzékelt információkat felhasználva építik fel hálózatot és végzik el az útválasztást. Ez a megközelítés lehetővé teszi, hogy enyhítsék a veszélyes események által okozott csomópontvesztéseket, és proaktív módon felkészítsék a hálózatot ilyen helyzetekre.

3.3. Többutas és többnyelős útvonalválasztási protokollok

Az útvonalválasztási protokollok kidolgozása során a WSN-ek elosztott rendszer jellege és annak kihasználása a megbízható információátvitel érdekében a kutatók figyelmének középpontjában áll. A többnyelős architektúrák és az azt támogató útvonalválasztás szintén kiemelt érdeklődésre tart számot a WSN-ek megjelenése óta. Egy ilyen hálózatban minden csomópont több nyelőhöz is csatlakozhat. Bár a többutas és a többnyelős megközelítések növelhetik a WSN hálózati teljesítményét, rugalmasságát és élettartamát [4], viszonylag kevés útválasztási protokollot tárgyaló kutatás vizsgálta ezek együttes alkalmazását.

3.4. Korlátozott mobilitás

Az elmúlt két évtizedben a mobil vezetékek nélküli érzékelőhálózatokat (mobile WSN, MWSN) különböző szempontokból alapján vizsgálták. A mobilitással összefüggésben kutatásokat végeztek a hálózat élettartamára [5], a megfigyelési hatékonyságra [6], [7], a közeghozzáférési (medium access control, MAC) [8] és az útvonalválasztásra [9] protokollokra vonatkozóan. A veszélyes események megfigyelésének környezeti, technológiai és gazdasági szempontjait figyelembe

vége csak a korlátozott mobilitási képességekkel rendelkező csomópontok tekinthetők megvalósíthatónak. Míg a korábbi munkák részletesen tanulmányozták a korlátozott mobilitást az MWSN lefedettségi képességeinek növelése érdekében, egyetlen munka sem vizsgálta a mobilitást a veszélyes, romboló események megfigyelésének kontextusában. Ráadásul egyik kutatás sem javasolt megfelelő útvonalválasztási algoritmust, amely támogatná a mobilitás miatti topológiai változásokat.

3.5. Konklúzió

Az irodalomkutatás rámutatott arra, hogy az eddig publikált, környezet-érzékeny, többutas útvonalválasztási protokollok nem foglalkoztak a veszélyes események megfigyelésének minden aspektusával, valamint nem végeztek méréseket, amikor a megfigyelt fizikai folyamat térben és időben is változik. Az azonosított hiányosságok orvoslásával, valamint a veszélyes események megfigyelésére szolgáló WSN-ek telepítését támogató útvonalválasztási protokollokkal kapcsolatos korábbi munkák követelményeinek összegyűjtésével és összefoglalásával számos szempontot azonosítottam a hálózat szervezésével, fenntartásával, rezilienciájával és hibatűrésével kapcsolatban. A kiterjedt irodalomkutatás arra enged következtetni, hogy a jelenlegi útvonalválasztási protokollok nem képesek a fent említett képességeket együttesen kihasználni.

Több nyelű esetén a WSN-ek teljesítménye többutas és többnyelűs útvonalválasztási protokollok alkalmazásával tovább javítható. Bár a vizsgált publikációk alkalmazzák ezeket a koncepciókat, nem használják fel a csomópontok közötti kapcsolatot jellemző információkat, nem helyi hatású hibakezelési mechanizmust, és nem vizsgálják a mobilitás hatásait.

A WSN-ek korlátozott mobilitásával kapcsolatos kutatások jellemzően a lefedettséghez kapcsolatos kihívásokra összpontosítanak. Egyik tanulmány sem vizsgálja a veszélyes események megfigyeléséhez és alkalmazkodáshoz kapcsolódó mobilitási koncepciókat. Ezenkívül a vizsgált tanulmányok közül egyik sem vizsgálja az MWSN-ek útvonalválasztással kapcsolatos kérdéseit.

4. Kutatásmódszertan

Kiterjedt irodalomkutatást végeztem annak érdekében, hogy feltérképezzem a környezet-érzékeny, többutas, többnyelűs, és korlátozott mobilitási képességekkel rendelkező útvonalválasztási protokollokat, melyek képesek kiszolgálni veszélyes események megfigyelésére alkalmazott WSN-eket. Az irodalomkutatás eredményeit a vonatkozó protokoll osztályokkal kapcsolatos publikációimban tettem közzé [J1], [J2], [J3]. Az eredmények alapján összeállítottam a WSN-hálózatokban alkalmazott útvonalválasztási protokollokra vonatkozó követelmények.

A tényleges protokoll tervezés és fejlesztés a WSN-nel történő erdőtüz-megfigyelési eredmények felhasználásával kezdődött meg [10], amely a Hadjidj és társai [11] által kidolgozott Heterogeneous Disjoint Multipath Routing Protocol

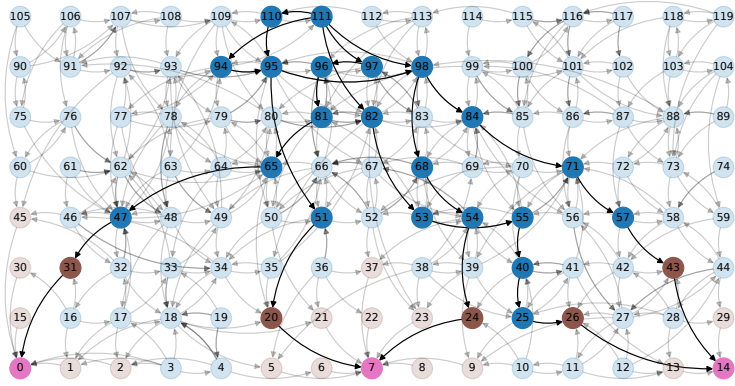
(HDMRP) névre hallgató útvonalválasztási protokollt javasolta, mint alkalmas megoldás. A HDMRP alapjaira épülő, azt környezet-érzékeny, kapcsolat mérési, és hibakezelési képességekkel kiegészítő új protokollt javasoltam, amelynek neve Resilient Reliable Multipath Routing Protocol (R2MRP). Az R2MRP, az összehasonlításra használt korlátozott árasztásos protokoll, (restricted broadcast), a HDMRP, valamint az Environment-Fusion Multipath Routing Protocol (EFMRP) [12] protokoll az OMNeT++ szimulációs környezetben [13], a WSN-specifikus Castalia keretrendszer [14] felhasználásával került megvalósításra. Számos szimulációs mérést végeztem a hálózati teljesítmény, az energiahatékonyság és a reziliencia kiértékelésének érdekében. Ezentúl megvalósítottam az Alexandridis és társai [15] által javasolt sejtautomata-alapú erdőtűz modellt. Létrehoztam továbbá egy új, térbeli képességekkel rendelkező érzékelési modellt. A két modell segítségével a protokollok viselkedése ellenséges események, azaz erdőtűz során is érdemben mérhető és értékelhető.

A javasolt R2MRP protokollt, az érzékelési modellt, a szimulációs eredményeket és a többutas, környezetérzékeny protokollokat tárgyaló irodalomkutatást kézirat formájában publikáltam [J2], a megfelelő forráskóddal együtt [O1].

Az R2MRP eredményeire építve három fő terület határoztam meg a további kutatásokhoz: a) a többnyelős hálózati architektúrákat, b) többszempontú döntéselemzési (multi-criteria decision analysis, MCDA) technikák alkalmazását az útvonalválasztás során, valamint c) a korlátozott mobilitás a hálózat megfigyelés és ellenállóképességére gyakorolt hatásának vizsgálatát.

A vonatkozó irodalomkutatás eredményei alapján, az R2MRP képességeinek további bővítésének eredményeként javasoltam az Multi-sink Resilient Reliable Multipath Routing Protocol (MsR2MRP) protokollt. A protokoll képes kihasználni a többnyelős WSN-ek nyújtotta előnyöket, valamint alkalmazza a Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) MCDA módszert [16]. Ezen felül, az alkalmazás réteggel együttműködve képes az egyes WSN csomópontok mozgásának útvonalválasztási támogatására is. A protokoll teljesítményének, ellenállóképességének, és energiahatékonyságának értékeléséhez intenzív szimulációs méréseket végeztem. A szimulációk számítási igényeinek kiszolgálása érdekében nagy teljesítményű számítási (high performance computing, HPC) környezetet alakítottam ki, míg a méréseket a Komondor HPC rendszeren végeztem el [17]. A protokollt összehasonlítottam továbbá az Sustainable Multipath Routing Protocol (SMRP)-vel, amely egy hasonló képességekkel rendelkező, korszerű útválasztási protokoll [12]. A csomópontok mozgásának szimulálására javasoltam egy korlátozott mobilitási modellt. Mindkét protokollt normális működési körülmények között, korlátozott mobilitás mellett, valamint ellenséges események jelenlétében is vizsgáltam. Az MsR2MRP diszjunkt többutas és hibatűrési képességeinek értékeléséhez új mérőszámokat javasoltam.

A javasolt MsR2MRP protokollt, a mobilitási modellt, az új mérőszámokat és a szimulációs eredményeket ismertető kéziratot, mely tartalmazza a többutas és többnyelős útvonalválasztási protokollokról, valamint a korlátozott mobilitásról szóló irodalmi áttekintéseket, folyóirat cikk formájában publikáltam [J3]. A



3. ábra. Az MsR2MRP által létrehozott logikai topológia. A nyelő rózsaszín, a határ csomópont barna, az érzékelő csomópont kék színnel van jelölve.

kapcsolódó forráskódot [O2] szintén elérhetővé tettem.

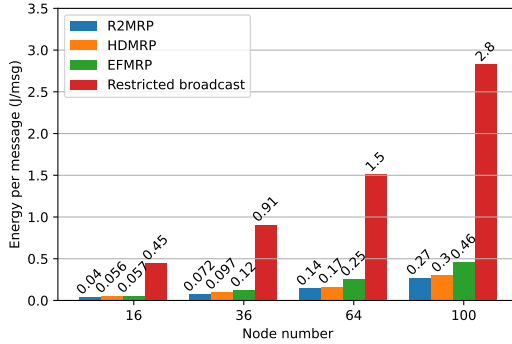
5. Új tudományos eredmények

I. Tézis. *Javasoltam a R2MRP névre hallgató, reziliens, megbízható, környezet-érzékeny, többutas útvonalválasztási protokollt vezeték nélküli szenzorhálózatokhoz számára, amely alkalmas veszélyes események megfigyelésére. A protokoll a környezeti, kapcsolati és energia információk felhasználásával hoz létre egy csomópont-diszjunkt hálózatot. Ezen felül a protokoll képes alkalmazkodni a csomópontok meghibásodásaihoz, valamint az alkalmazással együttműködve a veszélyes események megjelenéséhez, biztosítva a zavartalan információátvitelt. Összehasonlítottam a javasolt R2MRP-t a szakirodalomból ismert, korszerű útvonalválasztási protokollokkal, mint például az EFMRP-vel és a HDMRP-vel. Szimulációs mérések segítségével kimutattam, hogy az R2MRP energiahatékonyság és megbízhatóság tekintetében 10% illetve 30%-kal felülmúlja a referencia protokollokat.*

A tézishoz kapcsolódó publikációk: [J2], [O1]

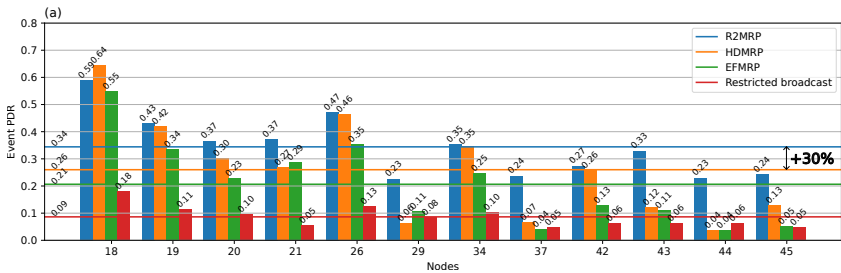
A szakirodalomból ismert hasonló protokollokkal összehasonlítva az R2MRP a hálózat kiépítése során számos információt használ fel. Ezeket az információkat a hálózat minden csomópontja az útvonalak kiépítése során értékeli, hogy energiahatékony és megbízható hálózatot hozzon létre. A 4. ábrán látható energiafelhasználással kapcsolatos mérés azt mutatja, hogy az R2MRP, összehasonlítva a HDMRP, EFMRP és korlátozott elárasztásos protokollokkal, legalább 10%-os javulást képes elérni az üzenetenkénti energiafelhasználás terén. Az eredmények azt mutatják, hogy az R2MRP képes olyan hálózatot építeni,

amelyben az üzenetek sikeres továbbítása jelentősen kevesebb energiát igényel, mint a referencia protokollok esetén.



4. ábra. A különböző útvonalválasztási protokollok által felhasznált átlagos energia egy üzenet sikeres továbbítására.

A megbízhatóság az erdőtűz okozta csomóponti meghibásodások által érintett csomópontok szomszédainak a hálózati teljesítménye alapján került megállapításra. Ebben az esetben az R2MRP képes felülmúlni az összes fent említett protokollt legalább 30%-kal a csomagtovábbítási arány tekintetében, amint azt a 5. ábra illusztrálja. Az eredmények azt mutatják, hogy az R2MRP sikeresen alkalmazkodik a veszélyes események által okozott csomóponti meghibásodásokhoz, és az újrászerveződés során felhasználja a környezeti információkat, így reziliens megfigyelőképességeket biztosít a hálózat számára.



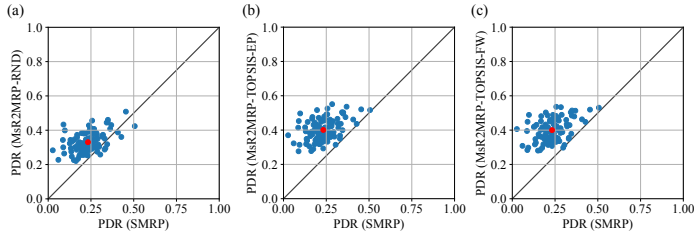
5. ábra. Útvonalválasztási protokollok hálózati teljesítménye: csomópont szintű és átlagos csomagtovábbítási arány.

II. Tézis. Javasoltam a *Multi-sink Resilient Reliable Multipath Routing Protocol (MsR2MRP)* névre hallgató, megbízható, reziliens, energia- és környezetérzékeny, többutas és többnyelős útvonalválasztási protokollt vezeték nélküli

szenzorhálózatok számára, amely támogatja a csomópontok mobilitását, valamint rangsorolási algoritmus segítségével terheléelosztást végez. A protokoll az 1. tézis alapjaira épül, és a vezeték nélküli szenzorhálózatban jelen lévő összes nyelőhöz független alhálózatot hoz létre. Ezen kívül a protokoll támogatja a mobilitást végző csomópontokat, azaz a csomópontok eltávolítását és újraintegrálását, miközben fenntartja a hálózat konzisztenciáját. A protokoll a TOPSIS algoritmus felhasználásával terheléelosztást hajt végre több nyelő és több útvonal között. Szimulációs méréseken segítségével összehasonlítottam a javasolt MsR2MRP-t a korszerű Sustainable Multipath Routing Protocol (SMRP)-vel. Megmutattam, hogy az MsR2MRP a hálózati teljesítmény és a reziliencia tekintetében akár 69%, illetve 25%-kal is felülmúlja az SMRP-t.

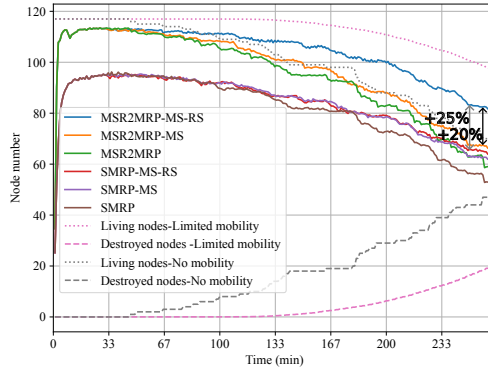
A tézishez kapcsolódó publikációk: [J3], [O2]

Az R2MRP-hez hasonlóan az MsR2MRP is egy környezetérzékeny, többutas útvonalválasztási protokoll. A több nyelő támogatása növeli az egyes csomópontok kapcsolatának redundanciáját, a TOPSIS algoritmus az útvonalválasztás során kihasználja a többutas és többnyelős hálózatok lehetőségeit. Amint a 6/a ábrán látható, az MsR2MRP terheléelosztás alkalmazása nélkül is képes felülmúlni az SMRP-t. Ha azonban a TOPSIS-t egyenlő súlyok (flat weights, FW) vagy energia-preferencia (energy preferred, EP) beállításokkal alkalmazzák, az MsR2MRP átlagosan akár 69%-kal magasabb csomagtovábbítási arányt biztosít az SMRP-hez képest, amint azt a 6/b és 6/c ábrák mutatják.



6. ábra. Csomagtovábbítási arány összehasonlítása SMRP és az MsR2MRP változatok között: (a) Véletlenszerű terheléelosztás, (b) TOPSIS-FW, és (c) TOPSIS-EP beállítás. A kék jelek az egyes futások eredményeit, a vörös jel az összes eredmény átlagát jelöli.

A WSN-t fokozatosan megsemmisítő veszélyes események esetén rendkívül fontos a változó környezethez való alkalmazkodás. Amint azt a 7. ábra eredményei is mutatják, a mobilitást támogató (mobility support, MS) WSN, amely az MsR2MRP mobilitást útvonalválasztási szinten támogató (routing support, RS) változatát használja, a hasonló képességű SMRP-nél jobb teljesítményt nyújt, és a hálózatban elérhetőnek tekintett csomópontok tekintetében 25%-os különbséget ér el.



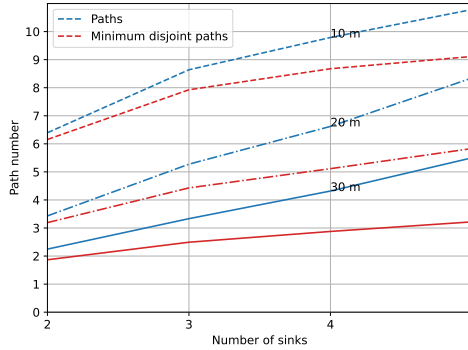
7. ábra. A működő, meghibásodott és elérhető csomópontok száma az idő függvényében erdőtüz esetén. Az MS a mobilitás használatát jelöli, az RS az útvonalválasztási protokoll mobilitás támogatását.

II.1. Altézis. Javasoltam a I. tézis alhálózat-alapú, többnyelős kiterjesztését. Az így kapott protokoll a WSN minden nyelőjéhez egy függetlenül kezelhető alhálózatot hoz létre. A módszer lehetővé teszi a többnyelős WSN-ek dinamikus és igény szerinti kezelését, valamint növeli a hálózati kapcsolatok rezilienciáját és redundanciáját. A szimulációs mérésekből nyert eredmények alapján kimutattam, hogy a hálózatban jelen lévő nyelők számának növekedésével a rendelkezésre álló útvonalak és azok páronkénti diszjunktivitása is növekszik.

Az MsR2MRP nem biztosítja a különböző nyelőkhez tartozó útvonalak közötti csomópont-diszjunktivitást. E korlátozás enyhítése egy jelentősen alacsonyabb komplexitású protokollt tesz lehetővé, amely képes az alhálózatok egyidejű kezelésére. Amint azt a 8. ábrán látható, 255 csomópontos WSN-ből nyert eredmények mutatják, az egy csomópont-hoz vezető útvonalak átlagos száma növekszik a hálózatban elérhető nyelők számával.

Míg a rendelkezésre álló útvonalak száma a rezilienciát jelzi, azok diszjunktivitása ugyanolyan fontos. Szintén a 8. ábrán látható eredmények azt mutatják, hogy a hálózatban rendelkezésre álló nyelők számának növekedésével a diszjunkt útvonalak száma is növekszik. Az eredményekből következik, hogy a külön nyelőhöz vezető útvonalak diszjunktivitása külön mechanizmus nélkül is elérhető egy többnyelős WSN-ben, ezzel növelve a hálózat rezilienciáját.

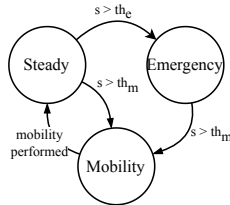
II.2. Altézis. Javasoltam egy alkalmazás-vezérelt, korlátozott mobilitású kiterjesztését a II.1. altézisben megfogalmazott útvonalválasztási protokollnak. A javasolt módszer lehetővé teszi a protokoll számára, hogy az egyes csomópontok mozgást hajtsanak végre, miközben a protokoll proaktív módon átszervezi az érintett alhálózatokat, minimalizálva ezzel az alhálózatokban tapasztalható zavarokat. Ezenkívül a módszer lehetővé teszi a mobil csomópontok számára,



8. ábra. Az elérhető útvonalak, valamint a páronként diszjunkt útvonalak átlagos száma csomópontonként, a hálózatban található nyelők számának függvényében, különböző csomóponttávolságok esetén.

hogy a mozgás befejezése után újra csatlakozzanak az elérhető alhálózatokhoz. Szimulációs mérések segítségével megmutattam, hogy a mobilitási információk felhasználása az útvonalválasztás és a hálózat átszervezése során akár 20%-kal is növeli a hálózat teljesítményét.

Alkalmazás-vezérelt korlátozott mobilitás esetén a csomópont alkalmazásrétegének feladata a környezeti állapot felismerése, ami szükségessé teszi a mozgás végrehajtását az érintett csomópont károsodás elleni védelme érdekében. Ezt a mechanizmust a 9. ábrán látható véges állapotgép valósítja meg.



9. ábra. Az alkalmazás modul véges állapotgépe. Az s az érzékelt értéket jelöli, a th_e a vészhelyzeti küszöbértéket, a th_m a mobilitási küszöbértéket.

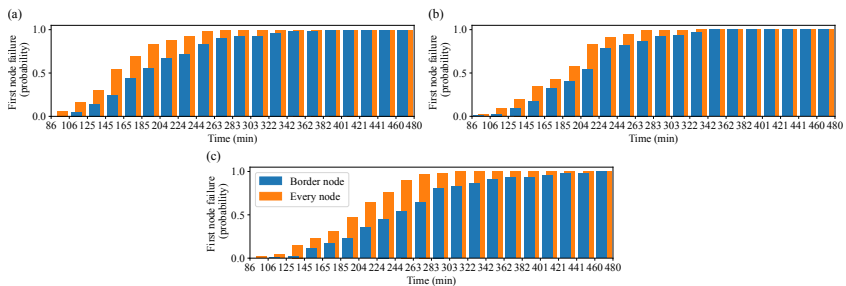
A mozgás megkezdése előtt az alkalmazás réteg utasítja az útvonalválasztási réteget, hogy végezze el az előkészületeket, míg a mozgás befejezése után egy újabb, egyértelmű utasítást küld az útvonalválasztási rétegnek, hogy végezze el a csomópont hálózatba történő újraintegrálást.

A 7. ábrán látható eredmények azt mutatják, hogy veszélyes folyamat jelenlétében a mobilitást támogató MsR2MRP (MsR2MRP-MS-RS) hálózati

teljesítménye jobb, mint a mobilitást nem támogató MsR2MRP változaté (MsR2MRP-MS). A jelenség időbeli előrehaladásával a két változat elérhető csomópontjainak különbsége eléri a 20%-ot.

II.3. Altézis. A II.1. altézisben javasolt útvonalválasztási protokollhoz egy rangsorolási algoritmuson alapuló útvonal kiválasztási mechanizmust javasoltam. A módszer a *Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)* algoritmust alkalmazza a WSN csomópont számára elérhető, információátvitelhez szükséges optimális útvonal kiválasztásához. Az algoritmus a döntéshozatal során értékeli a környezeti, energia- és hálózati információkat. Ezenkívül a módszer alkalmazható az alhálózatok kiépítése során is a hálózat rezilienciájának növelése érdekében. A javasolt mechanizmust hálózati teljesítménnyel és energiahatékonysággal kapcsolatos szimulációs mérésekkel értékeltem. Megmutattam, hogy a mechanizmus útvonalválasztás során történő alkalmazásával 11%-os javulás érhető el a hálózati teljesítmény, illetve 21%-os javulás az energiahatékonyság tekintetében.

A TOPSIS algoritmus különböző attribútumokat értékel, mielőtt az MsR2MRP üzenetet küldene a kiindulási csomópontból a célcsomópontba. Mivel bizonyos attribútumértékek idővel dinamikusan változnak, a számítás ismételt elvégzésének hatására csomópontok alkalmazkodnak a változó környezethez. A 6. ábrán látható hálózati teljesítmény, azaz a hálózat átlagos csomagtovábbítási arányának eredményei azt mutatják, hogy a TOPSIS alkalmazásával 11% növekedés érhető el az MsR2MRP azon változatához képest, amely az útvonalakat egyenletes eloszlással választja ki.



10. ábra. Az első csomópont meghibásodásának és az első határcsomópont meghibásodásának kumulatív eloszlásfüggvénye: (a) Véletlenszerű terheléelosztás, (b) TOPSIS-FW, és (c) TOPSIS-EP beállítás.

Az energiahatékonyság esetében az eredmények a hálózat első csomópontjának merülés okozta meghibásodási valószínűségeként kerültek meghatározásra. A 10/a és 11/b ábrák eredményei azt mutatják, hogy az első csomópont meghibásodásának időbeli valószínűsége 185 perc után éri el az 50%-ot, amennyiben a TOPSIS nem kerül alkalmazásra; azonban a TOPSIS energia-preferált beállí-

tása (TOPSIS-EP) esetén 224 perc, azaz 21%-kal több idő telik el, mire eléri az azonos szintű meghibásodási valószínűséget.

III. Tézis. *Olyan modelleket és mérőszámokat javasoltam, amelyek alkalmasak a környezetérzékeny WSN útvonalválasztási protokollok értékelési környezetének biztosítására, valamint azok képességeinek mérésére. A javasolt elemek a következők: a) egy, az éghető növényzet nedvességtartalmával kiegészített, korszerű erdőtűz modell, b) egy térbeli érzékelési modell, c) az erdőtűz modell és az érzékelési modell integrációja, d) egy valószínűségi mobilitási modell, e) egy, a többutas hálózatok értékelésére szolgáló mérőszám, valamint f) egy, a megfigyelési képességek értékelésére szolgáló mérőszám.*

Szimulációk segítségével bemutattam a modellek hatását az útvonalválasztási protokollok vizsgált aspektusaira, és ahol lehetséges volt, összehasonlítottam a javasolt elemeket az irodalomból már ismert megoldásokkal.

A tézishez kapcsolódó publikációk: [J3] [O2] [C1]

Az értékelési környezet magában foglalja az OMNeT++ szimulációs motort [13] és a WSN-specifikus Castalia keretrendszert [14]. Habár ezek a komponensek biztos alapot nyújtanak a WSN-specifikus kommunikációs protokollok értékeléséhez és fejlesztéséhez, érzékelési és mobilitási modelleik képességei korlátozottak, és nem támogatják térben változó, veszélyes jelenségek modelljeit. Ezeknek a hiányosságoknak a pótlására, valamint az ellenséges események megfigyelésére tervezett, környezetérzékeny útvonalválasztási protokollok értékeléséhez szükséges megbízható környezet biztosítása érdekében térbeli érzékelési modellt, korlátozott mozgási képességet megvalósító mobilitási modellt, valamint továbbfejlesztett erdőtűz modellt is javasoltam. A fent említett modelleket további felhasználás céljából nyilvánosan hozzáférhetővé tettem [O2]. Ezenkívül általános és osztályspecifikus tulajdonságok értékelésére szolgáló mérőszámokat is javasoltam.

III.1. Altézis. *Javasoltam egy érzékelési modellt, amely a térbeli környezeti információkat felhasználva biztosít érzékelő adatokat a WSN-alkalmazás számára. A modell kiértékeli az érzékelő számára releváns környezeti információkat, távolságalapú súlyozást hajt végre, valamint figyelembe veszi az érzékelt jelenség térbeli kiterjedését is. Szimulációs mérésekkel kimutattam, hogy a környezetérzékeny útvonalválasztási protokollok a javasolt érzékelési modell esetén több mint 3%-kal magasabb csomagtovábbítási arányt érnek el, a szakirodalomban ismert más modellekhez képest.*

Az érzékelési modellekkel és a környezetérzékeny protokollokkal kapcsolatos szakirodalom áttekintése alapján arra a következtetésre jutottam, hogy a közzétett érzékelési modellek többsége csak pontszerű eseményeket vesz figyelembe. Továbbá, a protokollok egyszerűsített érzékelési modelleket alkalmaznak, még a térbeli kiterjedésű események esetében is, amint azt az 1. táblázat mutatja.

A vizsgált érzékelési modellekben azonosított hiányosságok áthidalására a térbeli érzékelési modellt alkottam meg. A modell feltételezi, hogy a megfigyelt

1. táblázat. Érzékelési modellek és érzékelési távolságok különböző útvonalválasztási és ütemezési protokollok esetén. Az egyértelmű forrás hiánya esetén következtetéssel nyert adatok a * karakterrel vannak jelölve.

Referencia	Év	Protokoll neve	Protokoll típusa	Érzékelési távolság	Érzékelési modell
[18]	2009	EMA	Útvonalválasztás	100-200 m	Lineáris Korong Modell
[12]	2020	EFMRP	Útvonalválasztás	N/A	Lineáris Korong Modell*
[19]	2021	SMRP	Útvonalválasztás	N/A	Lineáris Korong Modell*
[20]	2020	E3AF	Útvonalválasztás	N/A	Lineáris Korong Modell*
[21]	2023	MS-E3AF	Útvonalválasztás	N/A	Lineáris Korong Modell*
[22]	2017	LDG	Útvonalválasztás	25 m	Logikai Korong Modell*
[23]	2012	MUP	Útvonalválasztás	N/A	Lineáris Korong Modell*
[24]	2022	EAT	Útvonalválasztás	N/A	N/A
[25]	2022	ASSR	Ütemezés	5-60 m	Logikai Korong Modell
[26]	2006	DEEPS	Ütemezés	10 m	Logikai Korong Modell
[27]	2015	DiLCO	Ütemezés	5 m	Logikai Korong Modell
[28]	2006	N/A	Ütemezés	5-30 m	Logikai Korong Modell*
[29]	2011	LAR	Ütemezés	6-15 m	Logikai Korong Modell*

terület tetszőleges pontosságú cellákból áll:

$$f_s(x) = \begin{cases} \min \left(\sum_{b \in \mathbb{B}_x} \frac{1}{d(x, b)^a}, c_{max} \right), & \text{if } x \notin \mathbb{B}_x \\ c_{max} & \text{if } x \in \mathbb{B}_x. \end{cases} \quad (1)$$

Az (1) képletben f_s az érzékelés függvénye; x az érzékelő csomópont pozíciója; $\mathbb{B}_x$ az előre meghatározott távolságon belül lévő égő cellák pozícióinak halmaza; b tetszőleges égő cella pozíciója; $d(,)$ az euklideszi távolságfüggvény; a a szimulációs szintű csillapítási paraméter; és c_{max} az érzékelés maximális értéke. 1 méteres pontosság esetén az f_s függvény a $[0, 8]$ intervallumból vesz fel értékeket, valamint a c_{max} értéke is 8.

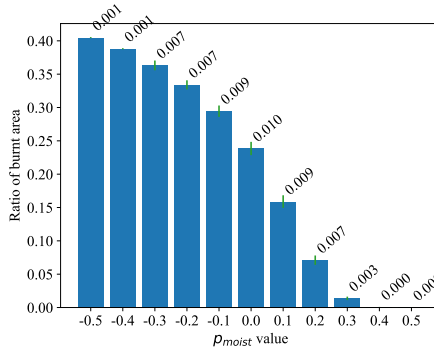
Az érzékelési modellek a környezetérzékeny útvonalválasztási protokollokra gyakorolt hatását vizsgálva, az MsR2MRP 30 m-es érzékelési sugár esetén több mint 3%-kal jobb csomagtovábbítási arányt ér el a logikai korong modellhez, és több mint 1,7%-kal jobb eredményt a lineáris korong modellhez képest, ahogy a 2. táblázatban látható.

III.2. Altézis. *Javasoltam egy korszerű erdőtűz modell továbbfejlesztését, amelynek eredményeként a modell figyelembe veszi a tűznek kitett területen található éghető anyagok nedvességtartalmát. A nedvességtartalom felhasználása valóságosabb képet ad az erdőtűz terjedéséről, ami felhasználható a WSN hálózatok hatékony tervezéséhez és telepítéséhez adott területen. Szimulációs mérésekkel kimutattam, hogy a modell éghető anyag nedvességtartalom paramétere jelentős hatással van az elégett terület nagyságára, magas statisztikai konfidenciával. A kapott szimulációs eredmények azt mutatják, hogy a paraméter akár 40%-kal is megváltoztathatja a elégett terület arányát. Megmutattam*

2. táblázat. Átlagos csomagtovábbítási arány (packet delivery ratio, PDR) és arány változás különböző érzékelési modellek és érzékelési sugarak esetén.

Sugár	Érzékelési modell		
	Logikai Korong Modell (PDR)	Lineáris Korong Modell (Változás)	Térbeli Érzékelési Modell (Változás)
1 m	0.48	+1.13%	+1.03%
5 m	0.47	+0.38%	+0.97%
10 m	0.47	+0.54%	+1.32%
20 m	0.46	+1.41%	+2.73%
30 m	0.46	+1.50%	+3.38%

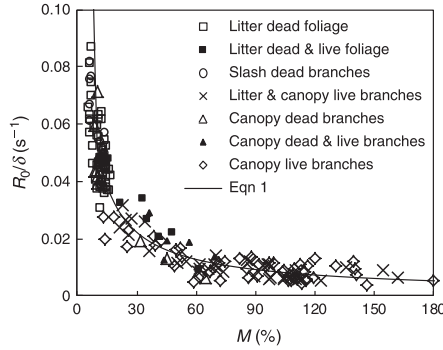
továbbá, hogy a továbbfejlesztett erdőtűz modell viselkedése összhangban van a valódi erdőtűzek vizsgálata során nyert, az éghető anyagok nedvességtartalmára vonatkozó mérési eredményekkel.



11. ábra. A p_{moist} paraméter hatása a leégett terület arányán. A 95%-os konfidencia szint melletti konfidencia intervallum paraméterbeállításoként szintén feltüntetésre került.

Az Alexandridis és társai által javasolt erdőtűz modell [15] a növényzet típusát, sűrűségét és a szél paramétereit veszi figyelembe a tűz terjedési valószínűségének kiszámításához, míg az éghető anyagok nedvességtartalmát már figyelmen kívül hagyja. Az erdőtűz terjedésének pontosabb szimulációja érdekében a módosított erdőtűz modell a növényzet nedvességtartalmát is értékeli, amelyet a p_{moist} paraméter jelöl. A nedvességtartam negatívan befolyásolja a tűz terjedését, amint azt a 11. ábra eredményei is mutatják.

Ezen felül, a szimulációs eredmények Rossa [30] által végzett, Figure 12 ábrán látható valós mérésekkel történő összehasonlítása arra enged következtetni, hogy a kibővített modell viselkedése összhangban áll a valós környezetben megfigyelt



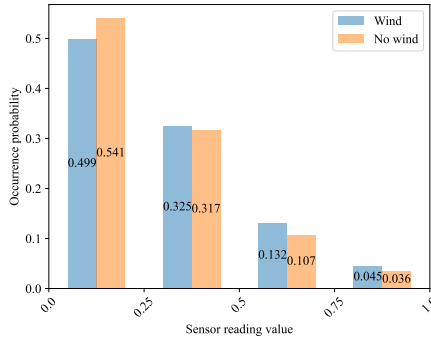
12. ábra. A tűzterjedés és az éghető növényzet magasságának aránya (R_0/δ) a nedvességtartalom függvényében (M) [30].

jelenséggel. A p_{moist} paraméter 0,4-es értéke 120%-os nedvességtartalomnak felel meg, míg a $-0,5$ érték 20%-os tartalomnak.

III.3. Altézés. Javasoltam a III.1 altézésben és a III.2 altézésben ismertetett modellek integrálását, amely modellezi a gázok által továbbított hőnek, azaz konvekciónak kitett érzékelők viselkedését. A javasolt integráció a jelenséggel összefüggésben figyelembe veszi a levegő mozgását, azaz annak irányát és sebességét, hogy meghatározza a hő az érzékelőre gyakorolt hatását. Szimulációs mérések alapján kimutattam, hogy a konvekció beépítése az érzékelési modellbe 26%-kal megváltoztatja az érzékelő észlelését a legfelső kvartilisben.

A vizsgált érzékelési modellek közömbösek az érzékelt jelenség tulajdonságaira, és nem veszik figyelembe a környezet másodlagos hatásait. Az erdőtüzek esetében a szél fontos szerepet játszik a tűz terjedésének irányában és sebességében, de a forró levegő mozgása miatt az érzékelésre is hatással van. A szél tűzérzékelésre gyakorolt hatásának beépítése érdekében az erdőtűz és a térbeli érzékelési modell integrálását javasoltam, amely esetén az érzékelést a szél is befolyásolja. Amint azt a 13. ábra szemlélteti, a WSN működése közben rögzített érzékelési értékek a hálózati csomópont irányába terjedő tűz és szél esetén jelentős különbséget mutatnak attól függően, hogy figyelembe veszi-e az érzékelési modell a szél hatását vagy sem. Külön kiemelendő a legfelső kvartilisben tapasztalható eltérés, ahol a szél figyelembevételének hatására 26%-kal több minta kerül. Jellemzően a környezetérzékeny protokollok és alkalmazások e szenzorértékek hatására aktiválódnak.

III.4. Altézés. Javasoltam egy valószínűség-alapú mobilitási modellt, amely a korlátozott mobilitás releváns jellemzőit foglalja magában. A mobilitási modell lehetővé teszi a WSN csomópontok számára, hogy előre rögzített távolságra, sztochasztikus módon megválasztott irányba mozogjanak. Az irány valószínűségét befolyásolja a környezetben található egyéb csomópontok, valamint veszélyes



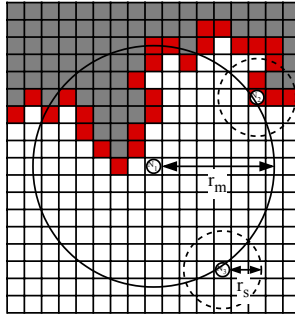
13. ábra. A nullától eltérő érzékelési értékek a térbeli érzékelési modell esetén, szél információ felhasználásával és anélkül.

folyamatok jelenléte. A modell egyesíti magában a korlátozott mobilitási technológiákra jellemző pontatlanságot, valamint a szenzorhálózatokban megosztott információk felhasználásának eredményét.

A WSN csomópontok gazdaságos hardverével kombinált, kültérben megvalósítható mozgást biztosító technológiák csak korlátozott pontosságot nyújtanak. Az ilyen megoldások viselkedésének elfogadható számítási komplexitással történő modellezésére a korlátozott mobilitás modellt javasoltam. Amint a 14. ábrán látható, a modell a WSN csomópont számára egy rögzített r_m távolság megtételét teszi lehetővé. A modell feltételezi, hogy WSN csomópont a távolságot szakaszosan teszi meg, így képes felmérni környezetét, valamint felismerni a szomszédos csomópontokat és azok relatív távolságát a MAC rétegből származó információk alapján. A kapcsolat fenntartása, de a sűrű topológia elkerülése érdekében a mozgást végző csomópont inkább egyetlen szomszéd közelségét részesíti előnyben több szomszédos csomóponttal szemben. Mivel mind a mozgás, mind az érzékelés pontossága korlátozott, a csomópont mozgása valószínűség-alapú, amelyet a fent említett tényezők befolyásolnak.

III.5. Altézés. *Javasoltam egy mérőszámot a többutas útvonalválasztási protokollok által létrehozott útvonalak értékelésére. A mérőszám normalizált skálán jellemzi a hálózatban rendelkezésre álló útvonalak diszjunktivitását. Javasoltam továbbá egy mérőszámot a térbeli kiterjedéssel rendelkező jelenségek megfigyelésére szánt WSN-ek megfigyelési teljesítményének értékelésére. A mérőszám a WSN valós potenciálját jellemzi a megfigyelt jelenséggel kapcsolatos információk továbbításával összefüggésben. Összehasonlítottam mindkét javasolt mérőszámot az irodalomból ismert, hasonló mérőszámokkal. Megmutattam, hogy a javasolt mérőszámok bővebb hatókörben és részletesebben mutatják be a vizsgált tulajdonságot, az összehasonlított mérőszámokhoz képest.*

Minden WSN értékelésének fontos része a felhasznált mérőszámok. A hálózat



14. ábra. A korlátozott mobilitási modell és az erdőtűz sejtaut ómata állapota. Cella színek magyarázata: piros – égő, szürke – leégett, fehér – érintetlen.

teljesítményét illetően a leggyakrabban használt mérőszám a csomagtovábbítási arány (packet delivery ratio, PDR). Ez a mérőszám az elküldött és a nyelőhöz sikeresen eljuttatott üzenetek arányát adja meg. Hálózati szinten, átlagként használva a mérőszámot, az egyes kiugró értékek könnyen eltorzítják az eredményt, elfedve a csomópont-nyelő kapcsolatok ingadozását. A WSN-ekben, a konkrét alkalmazástól függően, a hálózat átlagos PDR értékénél fontosabb, hogy egy meghatározott időintervallumon belül a lehető legtöbb csomóponttól érkezzen információ.

A hálózat összefüggőségének értékeléséhez egy új mérőszámot, az elérhetőséget javasoltam. A mérőszám azon csomópontok arányát vagy számát adja meg, amelyek sikeresen továbbítottak üzenetet a nyelőnek az adott időintervallumban. A mérőszám idő függvényében értelmezhető, és nem ad áteresztőképességet érintő információkat.

Többutas tulajdonságok esetén egy gyakran használt mérőszám a csomópont számára elérhető útvonalak átlagos száma. Bár a mérőszám jól értelmezhető alapot nyújt az összehasonlításához, nem ad információt az útvonalak egyéb tulajdonságairól. A javasolt diszjunktivitási-szám megmutatja a rendelkezésre álló útvonalak páronkénti diszjunktivitását, és betekintést nyújt az útvonalak redundanciájába. A különböző mérőszámok áttekintése a 3. táblázatban található.

6. Lehetséges alkalmazások

A disszertációban bemutatott tézisek számos alkalmazási lehetőséget kínálnak. A javasolt útvonalválasztási protokollok, az R2MRP [J2] és az MsR2MRP [J3] számos különböző szempont alapján került kiértékelésre, lehetővé téve azok valós környezetben történő alkalmazását. Az Európai Unió által támogatott projektek, mint például a SenForFire projekt [31] vagy a lezárult FIRESENSE

3. táblázat. Javasolt és vizsgált mérőszámok többutas WSN-ek számára

Név	Osztály	Leírás	Előny	Korlát
Csomagtovábbítási arány	Hálózati teljesítőképesség	Küldött és fogadott csomagok arányának átlaga, a nyelön mérve.	Általánosan elfogadott mérőszám.	Nem fedi fel a csomópont szintű hiányosságokat.
Távolság-korrigált csomagtovábbítási arány	Hálózati teljesítőképesség	A nyelvő-csomópont relatív távolságával súlyozott csomópont-nyelvő csomagtovábbítási arányok átlaga.	Lefedettséggel kapcsolatos teljesítményt jellemez.	Nem fedi fel a csomópont szintű hiányosságokat. Nehezen értelmezhető.
Élő csomópontok aránya	Hálózati teljesítőképesség	A működő, kommunikálni képes csomópontok és az összes csomópont aránya.	A hálózat működőképességét jelzi.	Nem ad üzenetküldés sikerességéről információt.
Elérhetőség	Hálózati teljesítőképesség	A nyelvőhöz sikeresen üzenetet küldő csomópontok aránya vagy száma.	Felfedi a csomópont szintű hiányosságokat.	Idő függvényében értelmezhető, áteresztőképességről nem ad információt.
Útvonalak átlagos száma	Többutas	A csomópontonként elérhető átlagos útvonalszám.	Könnyen értelmezhető.	Egyszerű, részleteket nem fed el.
Diszjunktivitás-szám	Többutas	A páronként diszjunkt útvonalak átlagos aránya csomópontonként.	Az útvonalak tulajdonságait jellemzi.	Relatív érték.

projekt [32], [33], már vizsgálta a WSN-ek erdőtűz megfigyelésére való alkalmazását. Ilyen környezetben a javasolt protokollok sikeresen bevezethetők, értékelhetők és a kapott eredmények alapján továbbfejleszthetők. Az erdőtűz megfigyeléséhez kapcsolódó termékek és szolgáltatások egyes országokban már elérhetőek, például Kanadában [34] vagy Németországban [35]. A magánszektor új kezdeményezései szintén jelzik a javasolt módszerek megvalósíthatóságát.

Mindkét javasolt útvonalválasztási protokoll, az összes referencia protokoll, az alkalmazás, az érzékelési, mobilitási és erdőtűz modell nyilvánosan elérhető a GitHub [36] forrásmegosztó platformon és a Zenodo [O1], [O2] nyílt kutatási adattárban. Ezen munkák közzététele nemcsak a bemutatott eredmények megismételhetőségét teszi lehetővé, hanem más akadémiai és ipari szereplőknek is segít munkájuk értékelésében, egy általános, hozzáférhető és megbízható szimulációs környezetben. A közzétett forráskódok egyúttal nyílt felhívást is jelentenek a tudományos közösség számára a javasolt protokollok újbóli vizsgálatára, képességeik továbbfejlesztésére, és új alkalmazások keresésére. Hasonlóképpen, a javasolt mérőszámok segíthetnek az útvonalválasztási protokollokkal foglalkozó kutatóknak munkájuk értékelésében és összehasonlításában, különös tekintettel a többutas és többnyelős protokollok területén.

A bemutatott TOPSIS-alapú terheléelosztási megoldás újra felhasználható többutas útvonalválasztási protokollokban, ahol a hálózat kiépítése vagy működése során különböző kapcsolat-, környezet-, energia- és hálózati információk állnak rendelkezésre. Lehetséges jelöltek az SMRP [19], LIEMRO [37] és ReInForM [38] protokollok, ahol nincs, vagy csak korlátozott terheléelosztási mechanizmus létezik jelenleg. Ilyen protokollokban a TOPSIS alkalmazása javíthatja a rezilienciát és az energiahatékonyságot. Ezzel szemben az ACO-alapú útvonalválasztási protokollok, mint például az E3AF [20], nem tesznek jelentős előnyre szert a mechanizmus által, mivel az ACO algoritmus feromon koncepciója hasonló szerepet tölt be.

Az MsR2MRP útvonalválasztási protokollhoz javasolt alkalmazás-vezérelt mobilitás újra felhasználható az alábbi kritériumoknak megfelelő útvonalválasztási protokollokban is: a) a hálózat minden tagjának meg kell őriznie az útvonalválasztási információk ideiglenes állapotát az útvonalválasztási táblázat felépítése előtt, b) a redukált útvonalválasztási információk alapján ismételt útvonalválasztási táblázat felépítése hurokmentes hálózatot kell eredményezzen, c) léteznie kell egy dedikált üzenetküldési eljárásnak, amely eltávolítja a mobilitást végző csomópontokat az érintett csomópontok útvonalválasztási táblázatából, és elindítja az útvonalválasztási információkkal kapcsolatos ismételt információmegosztást. Az SMRP-hez hasonló protokollok teljesítik a fent felsorolt kritériumokat, így képesek az ismertetett módon támogatni a mobilitást. Azokban a protokollokban, ahol az útvonalválasztási táblázat felépítése egy több lépésből áll, mint például a Directed Diffusion, a javasolt megközelítés bonyolult vagy megvalósíthatatlan lehet. Az ütemezésen és szinkronizáláson alapuló útvonalválasztási protokollok, mint például a LEACH, szintén nem alkalmasak a mechanizmus támogatására.

A WSN esemény megfigyelése során felmerülő szempontokat vizsgáló kuta-

tások többsége egyszerűsített modelleket használ a szimulációs keretrendszer részeként. A javasolt modellek és azok integrációja olyan keretrendszert biztosít, amely lehetővé teszi az útvonalválasztási protokollok és alkalmazások megbízható értékelését. A térbeli érzékelési modell alkalmas bármely térbeli kiterjedésű, mérhető fizikai jelenség modellezésére, legyen az intenzitásában állandó, mint például egy olajszennyezés, vagy változó, mint például egy gáz vagy tűzvész. A környezet, különösen a szél érzékelésre gyakorolt hatásának beépítése szintén elősegíti a jelenségek pontosabb mérését. A javasolt érzékelési modellek és a referencia modellek a mérési környezettel integrálva kerültek közzétételre, így újra felhasználható platformot biztosítanak a környezetérzékeny WSN protokollok és alkalmazások fejlesztéséhez, értékeléséhez és összehasonlításához.

Ebben a tézisfüzetben és a kapcsolódó értekezésben az R2MRP és az MsR2MRP protokollokat a WSN környezetben mutattam be, azonban mindkét protokoll rendelkezik olyan képességekkel, amely lehetővé teszi más környezetekben történő alkalmazásukat is. Az IoT elterjedésével számos fogyasztói és ipari hálózatot telepítettek, amelyek reziliens kommunikációt igényelnek. Míg a szenzorhálózatok esetében a destruktív hatást kifejtő jelenségek fizikaiak, bizonyos hálózatokban olyan események, mint a csomópont teljesítményének változása, a rádiós összeköttetés vagy az átmenő forgalom változása is olyan jelenségnek tekinthetők, amelyekhez a hálózatnak alkalmazkodnia kell. A közelmúltban többutas megoldásokat alkalmaztak az internetes protokollcsalád különböző szegmenseiben, például a Transmission Control Protocol (TCP) [39] vagy a Quick UDP Internet Connections (QUIC) protokoll [40] többutas kiterjesztésével. Ezek a kiterjesztések nem garantálják a csomópontok egymástól független útvonalait, azonban e tulajdonság javíthatja a kapcsolat rezilienciáját és fejlett terheléelosztási képességeket biztosíthat.

7. Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani témavezetőmnek, Dr. Oláh Andrásnak, hogy bizalmat szavazott nekem, vállalta témavezetésemet és bevezetett vezeték nélküli szenzorhálózatok kihívásokkal és izgalmakkal teli világába. Köszönettel tartozom továbbá az elmúlt évek során nyújtott folyamatos támogatásért, iránymutatásért, és biztatásért.

Szeretném megköszönni a családomnak az évek során nyújtott támogatást. Kiváltképp hálás vagyok feleségemnek, Malicsek Katalinnak, hogy lehetővé tette doktori tanulmányaim megkezdését, végig mellettem állt és támogatott a legnehezebb időszakokban is. Köszönöm, Kati!

Szeretném megköszönni Dr. Kovács Ferencnek, amiért meggyőződtem, hogy érdemes elkezdeni a doktori tanulmányokat, annyi az ipar területén eltöltött év után is.

Köszönöm bírálóimnak, Dr. Levendovszky Jánosnak és Dr. Kovács Lórántnak, hogy vállalták értekezésem bírálatát, és kérdéseikkel, valamint javaslataikkal segítették a kézirat fejlődését.

Köszönöm Tihanyi Attilának, hogy mérőeszközöket, időt, és szakmai segítséget biztosított a tűzérzékelés vizsgálatok során.

Köszönettel tartozom volt munkatársaimnak, Dr. Hilt Attilának, Dr. Járó Gábornak, Kéki Veronikának, Székely Szabolcsnak, és Dr. Tündik Ákosnak, hogy bízattak és támogattak a doktori képzés megkezdésében.

Szeretném megköszönni a Roska Tamás Műszaki és Természettudományi Doktori Iskola végzett doktorainak, Dr. Nemes Csabának és Dr. Varga Balázsnak, hogy megosztották velem doktori tanulmányaik tapasztalatait, nehézségeit, és tanulságait.

Köszönöm Dr. Anna Förster, Dr. Abdelkrim Hadjidj, és Dr. Justin K. Yim segítségét, akik készségesen válaszoltak egy ismeretlen e-mailjeire és betekintést engedtek kutatási területükbe.

Köszönöm Dr. Vida Tivadarénének, azaz Katinka néninek a doktori tanulmányi ügyeim intézését és egyengetését. Köszönöm szépen Barnáné Ódor Mónika támogatását az Erasmus+ pályázatok kapcsán, amelynek segítségével kiváló nyári egyetemeken tudtam részt venni, hogy elmélyítsem a kutatási területemen tudásomat.

Szeretném továbbá megköszönni doktorandusz társaimnak, hogy együtt és egymást támogatva vészeltük át a doktoranduszi éveket.

Valamint köszönöm az évek során biztosított anyagi segítséget: a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alap által támogatott Vízimentést segítő, mesterséges intelligencia alapú szenzorrendszer a katasztrófavédelem számára (TKP2021-NVA-27) névre hallgató Tématerületi Kiválósági Program támogatását; az Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal által létrehozott Egyetemi Kutatói Ösztöndíj Programban elnyert EKÖP-24-4-I ösztöndíj pályázatot; az Emberi Erőforrás Fejlesztési Operatív Program EFOP-3.6.3-VEKOP-16-2017-00002 projektjének finanszírozását; az Európai Unió által alapított Erasmus+ program támogatását; valamint a Pázmány Péter Katolikus Egyetem Információs Technológiai és Bionikai Karának Dékáni Doktoranduszi Ösztöndíját.

A szerző publikációi

Folyóirat publikációk

- [J1] **B. Á. Üveges**, M. Lőrincz és A. Oláh, „Resilient multipath routing protocol to enable hazardous event monitoring with wireless sensor network”, *Telfor Journal*, 15. évf., 1. sz., 20–25. old., 2023, ISSN: 2334-9905. DOI: 10.5937/telfor2301020q. cím: <http://dx.doi.org/10.5937/telfor2301020q> (hiv. old. 5).
- [J2] **B. Á. Üveges** és A. Oláh, „Enhanced reliability in hazardous event detection: A resilient multipath routing protocol for wireless sensor networks”, *IET Wireless Sensor Systems*, 14. évf., 4. sz., 111–131. old.,

2024. máj., ISSN: 2043-6394. DOI: 10.1049/wss2.12078. cím: <http://dx.doi.org/10.1049/wss2.12078> (hiv. old. 5–7, 18).

- [J3] B. Á. Üveges és A. Oláh, „Resilient Multi-Sink, Multipath Routing for Mobility-Limited Wireless Sensor Networks in Hostile Event Monitoring”, *IEEE Access*, 1–1. old., 2025, ISSN: 2169-3536. DOI: 10.1109/access.2025.3581731. cím: <http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3581731> (hiv. old. 5, 6, 9, 13, 18).

Konferencia publikációk

- [C1] B. Á. Üveges, „Deploying wireless sensor networks: effect of spatial topology on routing performance”, *PHD PROCEEDINGS ANNUAL ISSUES OF THE DOCTORAL SCHOOL FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY AND BIONICS*, vol. 19 évf., 1. old., 2024, ISSN: 2064-7271. cím: <https://m2.mtmt.hu/api/publication/34903639> (hiv. old. 13).

Egyéb publikációk

- [O1] B. Á. Üveges, *Wireless sensor network based wildfire monitoring with application-specific multi-path routing*, 2024. DOI: 10.5281/ZENODO.10639881. cím: <https://zenodo.org/doi/10.5281/zenodo.10639881> (hiv. old. 6, 7, 20).
- [O2] B. Á. Üveges, *MSR2MRP: Multi-sink Reliable Resilient Multipath Routing Protocol*, *ieee_access_2025* verzió, 2025. márc. DOI: 10.5281/zenodo.15100991. cím: <https://doi.org/10.5281/zenodo.15100991> (hiv. old. 7, 9, 13, 20).

Irodalomjegyzék

- [1] X. Silvani, F. Morandini, E. Innocenti és S. Peres, „Evaluation of a Wireless Sensor Network with Low Cost and Low Energy Consumption for Fire Detection and Monitoring”, *Fire Technology*, 51. évf., 4. sz., 971–993. old., 2014. okt., ISSN: 1572-8099. DOI: 10.1007/s10694-014-0439-9. cím: <http://dx.doi.org/10.1007/s10694-014-0439-9> (hiv. old. 2).
- [2] A. Förster, „Introduction to Wireless Sensor Networks”, A. Förster, szerk. John Wiley & Sons, Ltd, 2016, Multi-Hop Communications fejr., 77–97. old., ISBN: 9781119345343. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119345343.ch5>. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/9781119345343.ch5>. cím: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9781119345343.ch5> (hiv. old. 4).

- [3] S. Chaudhari, „A survey on multipath routing techniques in wireless sensor networks”, *International Journal of Networking and Virtual Organisations*, 24. évf., 3. sz., 267–328. old., 2021, ISSN: 1741-5225. DOI: 10.1504/IJNV0.2021.115818. eprint: <https://www.inderscienceonline.com/doi/pdf/10.1504/IJNV0.2021.115818>. cím: <http://dx.doi.org/10.1504/IJNV0.2021.115818> (hiv. old. 4).
- [4] M. Eslaminejad és S. A. Razak, „Fundamental Lifetime Mechanisms in Routing Protocols for Wireless Sensor Networks: A Survey and Open Issues”, *Sensors*, 12. évf., 10. sz., 13508–13544. old., 2012. okt., ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s121013508. cím: <http://dx.doi.org/10.3390/s121013508> (hiv. old. 4).
- [5] L. Nguyen és H. T. Nguyen, „Mobility based network lifetime in wireless sensor networks: A review”, *Computer Networks*, 174. évf., 107236. old., 2020. jún., ISSN: 1389-1286. DOI: 10.1016/j.comnet.2020.107236. cím: <http://dx.doi.org/10.1016/j.comnet.2020.107236> (hiv. old. 4).
- [6] S. M. Mohamed, H. S. Hamza és I. A. Saroit, „Coverage in mobile wireless sensor networks (M-WSN): A survey”, *Computer Communications*, 110. évf., 133–150. old., 2017. szept., ISSN: 0140-3664. DOI: 10.1016/j.comcom.2017.06.010. cím: <http://dx.doi.org/10.1016/j.comcom.2017.06.010> (hiv. old. 4).
- [7] D. Popescu, F. Stoican, G. Stamatescu, O. Chenaru és L. Ichim, „A Survey of Collaborative UAV–WSN Systems for Efficient Monitoring”, *Sensors*, 19. évf., 21. sz., 4690. old., 2019. okt., ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s19214690. cím: <http://dx.doi.org/10.3390/s19214690> (hiv. old. 4).
- [8] Q. Dong és W. Dargie, „A Survey on Mobility and Mobility-Aware MAC Protocols in Wireless Sensor Networks”, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 15. évf., 1. sz., 88–100. old., 2013, ISSN: 1553-877X. DOI: 10.1109/surv.2012.013012.00051. cím: <http://dx.doi.org/10.1109/SURV.2012.013012.00051> (hiv. old. 4).
- [9] D. Swapna és M. Nagaratna, „A review on routing protocols for mobile wireless sensor networks (MWSN): comparative study”, *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 2023. júl., ISSN: 0976-4348. DOI: 10.1007/s13198-023-01963-8. cím: <http://dx.doi.org/10.1007/s13198-023-01963-8> (hiv. old. 4).
- [10] N. Moussa, A. E. B. E. Alaoui és C. Chaudet, „A novel approach of WSN routing protocols comparison for forest fire detection”, *Wireless Networks*, 26. évf., 3. sz., 1857–1867. old., 2018. nov. DOI: 10.1007/s11276-018-1872-3. cím: <https://doi.org/10.1007/s11276-018-1872-3> (hiv. old. 5).

- [11] A. Hadjidj, A. Bouabdallah és Y. Challal, „HDMRP: An Efficient Fault-Tolerant Multipath Routing Protocol for Heterogeneous Wireless Sensor Networks”, *Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering*, Springer Berlin Heidelberg, 2012, 469–482. old. DOI: 10.1007/978-3-642-29222-4_33. cím: https://doi.org/10.1007/978-3-642-29222-4_33 (hiv. old. 5).
- [12] X. Fu, G. Fortino, P. Pace, G. Aloï és W. Li, „Environment-fusion multipath routing protocol for wireless sensor networks”, *Information Fusion*, 53. évf., 4–19. old., 2020, ISSN: 1566-2535. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2019.06.001>. cím: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1566253519301654> (hiv. old. 6, 14).
- [13] A. Varga és R. Hornig, „An Overview of the OMNeT++ Simulation Environment”, *Proceedings of the 1st International Conference on Simulation Tools and Techniques for Communications, Networks and Systems & Workshops*, Simutools '08 sor., Marseille, France: ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics és Telecommunications Engineering), 2008, 1–10. old., ISBN: 9789639799202. DOI: 10.5555/1416222.1416290 (hiv. old. 6, 13).
- [14] D. Pediaditakis, Y. Tselishchev és A. Boulis, „Performance and Scalability Evaluation of the Castalia Wireless Sensor Network Simulator”, *Proceedings of the 3rd International ICST Conference on Simulation Tools and Techniques*, SIMUTools '10 sor., Torremolinos, Malaga, Spain: ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics és Telecommunications Engineering), 2010, 1–6. old., ISBN: 9789639799875. DOI: 10.4108/ICST.SIMUTOOLS2010.8727. cím: <https://doi.org/10.4108/ICST.SIMUTOOLS2010.8727> (hiv. old. 6, 13).
- [15] A. Alexandridis, D. Vakalis, C. Siettos és G. Bafas, „A cellular automata model for forest fire spread prediction: The case of the wildfire that swept through Spetses Island in 1990”, *Applied Mathematics and Computation*, 204. évf., 1. sz., 191–201. old., 2008. okt., ISSN: 0096-3003. DOI: 10.1016/j.amc.2008.06.046. cím: <http://dx.doi.org/10.1016/j.amc.2008.06.046> (hiv. old. 6, 15).
- [16] C.-L. Hwang és K. Yoon, *Multiple Attribute Decision Making*. Springer Berlin Heidelberg, 1981, ISBN: 9783642483189. DOI: 10.1007/978-3-642-48318-9. cím: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9> (hiv. old. 6).
- [17] B. Drávai és I. Z. Reguly, „Performance and efficiency: A multi-generational benchmark of modern processors on bandwidth-bound HPC applications”, *Future Generation Computer Systems*, 169. évf., 107793. old., 2025. aug., ISSN: 0167-739X. DOI: 10.1016/j.future.2025.107793. cím: <http://dx.doi.org/10.1016/j.future.2025.107793> (hiv. old. 6).

- [18] B.-L. Wenning, D. Pesch, A. Timm-Giel és C. Görg, „Environmental monitoring aware routing: making environmental sensor networks more robust”, *Telecommunication Systems*, 43. évf., 1. sz., 3. old., 2009. szept., ISSN: 1572-9451. DOI: 10.1007/s11235-009-9191-8. cím: <https://doi.org/10.1007/s11235-009-9191-8> (hiv. old. 14).
- [19] X. Fu, Y. Yang és O. Postolache, „Sustainable Multipath Routing Protocol for Multi-Sink Wireless Sensor Networks in Harsh Environments”, *IEEE Transactions on Sustainable Computing*, 6. évf., 1. sz., 168–181. old., 2021. jan., ISSN: 2377-3782. DOI: 10.1109/TSUSC.2020.2976096. cím: <http://dx.doi.org/10.1109/TSUSC.2020.2976096> (hiv. old. 14, 20).
- [20] F. H. El-Fouly és R. A. Ramadan, „E3AF: Energy Efficient Environment-Aware Fusion Based Reliable Routing in Wireless Sensor Networks”, *IEEE Access*, 8. évf., 112145–112159. old., 2020, ISSN: 2169-3536. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3003155 (hiv. old. 14, 20).
- [21] F. H. El-Fouly, M. Kachout, Y. Alharbi, J. S. Alshudukhi, A. Alanazi és R. A. Ramadan, „Environment-Aware Energy Efficient and Reliable Routing in Real-Time Multi-Sink Wireless Sensor Networks for Smart Cities Applications”, *Applied Sciences*, 13. évf., 1. sz., 2023, ISSN: 2076-3417. DOI: 10.3390/app13010605. cím: <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/1/605> (hiv. old. 14).
- [22] M. Hammoudeh és tsai., „A Wireless Sensor Network Border Monitoring System: Deployment Issues and Routing Protocols”, *IEEE Sensors Journal*, 17. évf., 8. sz., 2572–2582. old., 2017. ápr., ISSN: 2379-9153. DOI: 10.1109/jsen.2017.2672501. cím: <http://dx.doi.org/10.1109/JSEN.2017.2672501> (hiv. old. 14).
- [23] A. Jamil, D. J. Parish, R. C.-W. Phan, I. Phillips, J. Whitley és G. Oikonomou, „Maximise unsafe path routing protocol for forest fire monitoring system using Wireless Sensor Networks”, *2012 IEEE 3rd International Conference on Networked Embedded Systems for Every Application (NESEA)*, IEEE, 2012. dec., 1–8. old. DOI: 10.1109/nesea.2012.6474018. cím: <http://dx.doi.org/10.1109/NESEA.2012.6474018> (hiv. old. 14).
- [24] B. Banuselvasaraswathy és V. Rathinasabapathy, *Environmental Aware Thermal (EAT) Routing Protocol for Wireless Sensor Networks*, 2022. dec. DOI: 10.1002/9781119777465.ch6. cím: <http://dx.doi.org/10.1002/9781119777465.ch6> (hiv. old. 14).
- [25] A. Naife Alauthman, W. N. Shuhadah Wan Nik és N. A. Mahiddin, „Adaptive Sensor Sensing Range to Maximise Lifetime of Wireless Sensor Network”, *International journal of Computer Networks & Communications*, 14. évf., 1. sz., 71–83. old., 2022. jan., ISSN: 0975-2293. DOI: 10.5121/ijcnc.2022.14105. cím: <http://dx.doi.org/10.5121/ijcnc.2022.14105> (hiv. old. 14).

- [26] D. Brinza és A. Zelikovsky, „DEEPS: Deterministic Energy-Efficient Protocol for Sensor networks”, *Seventh ACIS International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking, and Parallel/Distributed Computing (SNPD'06)*, IEEE, 261–266. old. DOI: 10.1109/snpd-sawn.2006.31. cím: <http://dx.doi.org/10.1109/SNPD-SAWN.2006.31> (hiv. old. 14).
- [27] A. K. Idrees, K. Deschinkel, M. Salomon és R. Couturier, „Distributed lifetime coverage optimization protocol in wireless sensor networks”, *The Journal of Supercomputing*, 71. évf., 12. sz., 4578–4593. old., 2015. nov., ISSN: 1573-0484. DOI: 10.1007/s11227-015-1558-x. cím: <http://dx.doi.org/10.1007/s11227-015-1558-x> (hiv. old. 14).
- [28] M. Cardei, J. Wu és M. Lu, „Improving network lifetime using sensors with adjustable sensing ranges”, *International Journal of Sensor Networks*, 1. évf., 1/2. sz., 41. old., 2006, ISSN: 1748-1287. DOI: 10.1504/ijsn.2006.010833. cím: <http://dx.doi.org/10.1504/IJSNET.2006.010833> (hiv. old. 14).
- [29] H. R. Karkvandi, E. Pecht és O. Yadid-Pecht, „Effective Lifetime-Aware Routing in Wireless Sensor Networks”, *IEEE Sensors Journal*, 11. évf., 12. sz., 3359–3367. old., 2011. dec., ISSN: 1558-1748. DOI: 10.1109/jsen.2011.2159110. cím: <http://dx.doi.org/10.1109/JSEN.2011.2159110> (hiv. old. 14).
- [30] C. G. Rossa, „The effect of fuel moisture content on the spread rate of forest fires in the absence of wind or slope”, *International Journal of Wildland Fire*, 26. évf., 1. sz., 24–31. old., 2017. jan., ISSN: 1049-8001. DOI: 10.1071/WF16049. eprint: <https://connectsci.au/wf/article-pdf/26/1/24/146300/wf16049.pdf>. cím: <https://doi.org/10.1071/WF16049> (hiv. old. 15, 16).
- [31] M. Guijarro és tsai., *Prevención, detección y monitorización de incendios forestales mediante redes inalámbricas de sensores de bajo coste: el proyecto SenForFire*, Este trabajo se enmarca en el proyecto Interreg Sudoe SenForFire. Red inalámbrica de sensores de bajo coste para prevención y detección precoz de incendios forestales (S1/1.1/E0040), cofinanciado por la Unión Europea., 2025 (hiv. old. 18).
- [32] A. A. Salah, J. Han, E. Pauwels és P. de Zeeuw, „Multimodal monitoring of cultural heritage sites and the FIRESENSE project”, *Proceedings of the 4th International Symposium on Applied Sciences in Biomedical and Communication Technologies*, ISABEL '11 sor., ACM, 2011. okt., 1–5. old. DOI: 10.1145/2093698.2093850. cím: <http://dx.doi.org/10.1145/2093698.2093850> (hiv. old. 20).

- [33] C. Tunca, S. Isik, M. Y. Donmez és C. Ersoy, „Ring Routing: An Energy-Efficient Routing Protocol for Wireless Sensor Networks with a Mobile Sink”, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 14. évf., 9. sz., 1947–1960. old., 2015. szept., ISSN: 1536-1233. DOI: 10.1109/tmc.2014.2366776. cím: <http://dx.doi.org/10.1109/TMC.2014.2366776> (hiv. old. 20).
- [34] *SenseNet Inc. - Wildfire Detection in Minutes — sensenet.ca*, <https://www.sensenet.ca/>, [Accessed 28-10-2025], 2025 (hiv. old. 20).
- [35] *Ultra Early Wildfire Detection / Dryad Networks*, <https://www.dryad.net/>, [Accessed 28-10-2025], 2025 (hiv. old. 20).
- [36] *GitHub - manoe/Castalia: An OMNeT-based simulator for low-power wireless networks such as Wireless Sensor Networks and Body Area Networks — github.com*, <https://github.com/manoe/Castalia>, [Accessed 22-10-2025] (hiv. old. 20).
- [37] M. Radi, B. Dezfouli, S. A. Razak és K. A. Bakar, „LIEMRO: A Low-Interference Energy-Efficient Multipath Routing Protocol for Improving QoS in Event-Based Wireless Sensor Networks”, *2010 Fourth International Conference on Sensor Technologies and Applications*, IEEE, 2010. júl., 551–557. old. DOI: 10.1109/SENSORCOMM.2010.89. cím: <http://dx.doi.org/10.1109/SENSORCOMM.2010.89> (hiv. old. 20).
- [38] B. Deb, S. Bhatnagar és B. Nath, „ReInForM: Reliable information forwarding using multiple paths in sensor networks”, *28th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks, 2003. LCN '03. Proceedings.*, IEEE, 2003, 406–415. old. DOI: 10.1109/LCN.2003.1243166. cím: <http://dx.doi.org/10.1109/LCN.2003.1243166> (hiv. old. 20).
- [39] A. Ford, C. Raiciu, M. J. Handley és O. Bonaventure, *TCP Extensions for Multipath Operation with Multiple Addresses*, RFC 6824, 2013. jan. DOI: 10.17487/RFC6824. cím: <https://www.rfc-editor.org/info/rfc6824> (hiv. old. 21).
- [40] Y. Liu, Y. Ma, Q. D. Coninck, O. Bonaventure, C. Huitema és M. Kühlewind, „Multipath Extension for QUIC”, Internet Engineering Task Force, Internet-Draft draft-ietf-quic-multipath-16, 2025. aug., Work in Progress, 38 old. cím: <https://datatracker.ietf.org/doc/draft-ietf-quic-multipath/16/> (hiv. old. 21).