



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

DOKTORI (PHD) ÉRTEKEZÉS

Sebestyén Gergely

**Összefűzött adatgyűjtési eljárások vizsgálata
elárasztásos útválasztáson alapuló
szövevényes vezeték nélküli
szenzorhálózatokban**

Témavezető:

Dr. Kopják József

**ALKALMAZOTT INFORMATIKAI ES
ALKALMAZOTT MATEMATIKAI
DOKTORI ISKOLA**

Budapest, 2024. július 16

Tartalomjegyzék

Bevezetés	7
Motiváció és célkitűzés.....	9
Vizsgálati módszerek.....	10
Az értekezés felépítése.....	11
1. Vezeték nélküli szenzorhálózatok	13
1.1. Ad-hoc hálózatok	13
1.2. Elosztott (Flat) struktúra	13
1.3. Klaszterezés.....	14
1.4. Útválasztás és routing feladatainak definíciója a szenzorhálózatokban	14
1.5. Routing protokollok csoportosítása különböző tervezési szempontok szerint	14
1.6. Hálózat és routing modellezése a szenzorhálózatokban	15
1.7. Közeghozzáférés vezérlése (MAC) a hálózatokban	16
2. IEEE 802.15.4 alapuló hálózatok	17
2.1. IEEE 802.15.4 fizikai és adatkapcsolati réteg.....	18
2.2. WirelessHART	19
2.3. ISA100.11a.....	20
2.4. Zigbee.....	21
3. IQRF vezeték nélküli hálózatok	25
3.1. IQRF fizikai réteg és adatkapcsolati réteg	26
3.2. IQRF hálózati réteg - IQMESH szövevényes hálózati topológia	29
3.3. IQRF alkalmazási réteg - IQRF DPA	34
4. Adatgyűjtés a szenzorhálózatból	34
4.1. Szinkron adatgyűjtés	35
4.1.1. Egyszerű lekérdezés.....	36

4.1.2.	Szinkronizált válaszüzenet.....	37
4.1.3.	Összefűzött adatgyűjtés	37
4.2.	Az adatgyűjtési módszerek összehasonlítása időtartam szerint.....	39
4.2.1.	Egyszerű lekérdezés.....	39
4.2.2.	Szinkronizált válaszüzenet.....	39
4.2.3.	Összefűzött adatgyűjtés	40
4.3.	Az adatgyűjtési módszerek összehasonlítása csomagküldések eloszlása szerint 42	
4.3.1.	Egyszerű lekérdezés.....	43
4.3.2.	Szinkronizált válaszüzenet.....	43
4.3.3.	Összefűzött adatgyűjtés	44
5.	Elemélettartam meghatározása az összefűzött adatgyűjtési eljárásoknál	46
5.1.	Szenzorok energiafogyasztása vezeték nélküli szenzorhálózatokban összefűzött adatgyűjtési módszerrel	46
5.1.1.	Vételi üzemmód.....	50
5.1.2.	Kérés broadcast-üzenet	52
5.1.3.	Feldolgozás	53
5.1.4.	Szomszédos adatmegosztás	53
5.1.5.	Válaszüzenetek - Response message routing.....	54
5.1.6.	Mélyalvó üzemmód	54
5.2.	Energiafelhasználás elosztása a hálózatban	58
5.3.	A vezeték nélküli szenzorok elem élettartamának becslése.....	59
5.3.1.	Elemélettartam modell tesztelése.....	64
5.4.	Dinamikus alvási ciklusok	65
5.5.	Elmélet gyakorlati alkalmazása.....	68
	Új tudományos eredmények	70

6.	Hálózat stabilitása	71
6.1.	Hálózati topológia modellezése gráffal.....	71
6.1.1.	Kérés broadcast-üzenet	73
6.1.2.	Szomszédos üzenetküldés.....	74
6.1.3.	Válaszüzenet	74
6.2.	Az IQRF hálózat modellje	75
6.2.1.	Hálózathoz történő csatlakozás.....	76
6.2.2.	Felfedezési folyamat - Discovery	76
6.2.3.	Elárasztásos útválasztási	77
6.2.4.	A Hálózatban található redundáns útvonalak	79
6.3.	A hálózati kommunikáció stabilitása	80
6.3.1.	Csomópont stabilitása	81
6.3.2.	Hálózat stabilitása	83
6.4.	A stabilitási tényező	87
6.5.	Adatgyűjtés stabilitása	90
	Új tudományos eredmények	92
7.	Hálózat feltérképezése	93
7.1.	Vezeték nélküli hálózat feltérképezése összefűzött adatgyűjtéssel.....	97
7.2.	Hálózati stabilitás meghatározása összefűzött adatgyűjtéssel.....	100
	Új tudományos eredmények	103
8.	További kutatási lehetőségek.....	104
	Irodalomjegyzék	106
	Saját publikációk.....	113
	További tudományos közlemények	115

Ábrajegyzék

1. ábra IEEE 802.15.4 csillag és peer-to-peer topológia [17].....	23
2. ábra IQRF elárasztásos útválasztás lépései a koordinátortól a N3 csomópontig [47].	29
3. ábra Hálózati példa logikai (felül) és VRN címekkel (alul).....	31
4. ábra Adatgyűjtési eljárások ideje a hálózati elemszám függvényében.....	35
5. ábra Egy bájt adatgyűjtési időtartama különböző módszerekkel 10 csomópontig [S1]	41
6. ábra Egy bájt adatgyűjtési időtartama különböző módszerekkel 64 csomópontig [S1]	42
7. ábra Az átvitelek számának eloszlása különböző adatgyűjtési módok szerint egy 64 csomópontos hálózatba [S1]	45
8. ábra Szenzorokon mért áramfelvétele az 1. és 4. csomópontok fázisaira [14] osztva az FRC adatgyűjtési módszer során	47
9. ábra IQRF normál (STD RX) és csökkentett energiafelhasználású (LP RX) vételi üzemmód [46].....	51
10. ábra Az elvárt és késői ébredésből adódó hibás működés mélyalvó üzemmódban..	56
11. ábra 8db DCTR-7x IQRF moduloknál mért ébredési idők maximális különbsége másodpercben a különböző alvási periódusokban.....	57
12. ábra Egy csomópont teljes energiafogyasztása (E_{total}) periódusonként egy adatkérésre	58
13. ábra Az elem élettartam meghatározásához szükséges információk és lépések.....	60
14. ábra Li/SOCI2 elem terheléstől függő kisülési görbéi [55].....	61
15. ábra Az elem kapacitásából kiszorgálható adatgyűjtési ciklusok maximális száma 1- 64 elemű hálózatok esetén 1-60 perces adatgyűjtési ciklusokkal.....	62
16. ábra Az elem becsült élettartama ciklusonként 1 (fent) és 4 (lent) kérésre ciklusonként	63
17. ábra A rövidtávú teszthálózat hőmérséklet adatok a pontokkal jelölt szenzorok elemélettartamának végéig	64
18. ábra Egy egyetemi számítógép laborban mért szén-dioxid mért értékek változása egy nap alatt.....	67

19. ábra Elemélettartam becsléséhez használható online kalkulátor felhasználói felülete [77].....	69
20. ábra A hálózatban küldött kérés üzenet irányított körmentes gráf reprezentációja ..	73
21. ábra A hálózatban szomszédsági üzenetküldés irányított gráf reprezentációja	74
22. ábra A hálózatban küldött válasz üzenet irányított körmentes gráf reprezentációja	75
23. ábra Vezeték nélküli hálózat egyetlen hálózati hibával az útválasztási kérés üzenet küldése közben.....	81
24. ábra A hálózati csomópontok felett a csúcsok befoka/foka.....	82
25. ábra A módosított vezeték nélküli hálózat egyetlen hibával az útválasztási kérés üzenete közben.....	83
26. ábra Vezeték nélküli hálózat egyetlen kapcsolat meghibásodásával a 4-es csomópontnál a válaszüzenet továbbítása során több csomópontot is érint	85
27. ábra A módosított hálózat egyetlen kapcsolat meghibásodásával a 4-es csomópontnál a válaszüzenet küldése során, amely csak egyetlen csomópontot érint	86
28. ábra A módosított hálózat egyetlen link meghibásodásával a 4-es csomópontnál a válaszüzenet küldése során FRC adatgyűjtéssel. Az 1., 3. és 6. csomópont (zölddel kiemelve) sikeresen rögzítette a 4-es csomópont adatait a beacon-fázis során küldött adatokat.....	91
29. ábra Hálózati feltérképezés eredménye összefűzött adatgyűjtéssel, a szomszédsági mátrixszal a hálózati koordinátorban	95
30. ábra Szomszédos eszközök bittérképes ábrázolása a válaszüzenetben	95
31. ábra Feltérképezés folyamata FRC és szinkronizált adatküldéssel	96
32. ábra Vezeték nélküli hálózat nagy VRN cím különbségekkel hatótávolságon belül	99
33. ábra Az alacsony befokkal rendelkező csomópont észlelése.....	102

BEVEZETÉS

A vezeték nélküli szenzorhálózatok (Wireless Sensor Network - WSN), melyek az IoT technológiák legfrissebb fejlesztéseivel szorosan összekapcsolódnak, alapvetően átformálták az ipari és fogyasztói alkalmazások széles spektrumát. Ezek a hálózatok, az egészségügytől és a hadászattól kezdve, a környezeti monitorozáson át, az intelligens eszközök integrációjáig, egészen a városi infrastruktúra menedzsmentjéig, kulcsfontosságú szerepet játszanak a jelenkori technológiai környezetben [1]. A vezeték nélküli szenzorhálózatok rendkívül sokrétű alkalmazhatóságukkal kiemelkednek, de egyben felhívják a figyelmet a WSN-ek helyes és tudatos alkalmazásának jelentőségére is. Fontos hangsúlyozni a költséghatékonyság, a műszaki pontosság és a működési jellemzők közötti harmonikus egyensúly megteremtésének szükségességét, valamint a célra leginkább megfelelő eszközök gondos kiválasztását.

Az újabb vezeték nélküli technológiák fejlődésével, mint az LPWAN (Low Power Wide Area Network), számos új lehetőség nyílt meg a piacon. Ilyenek például a SigFox, NB-IoT és LoRaWAN technológiák, amelyek nagy területi lefedettséget biztosítanak [2][3]. Ezek az innovációk alternatív megoldásokat kínálnak olyan helyzetekben, ahol az LPWAN kommunikáció nem bizonyul ideálisnak. Az IoT átjárókkal(gateway) kiegészített WLAN és WPAN technológiák, mint a 6LoWPAN, Bluetooth Low Energy (BLE) mesh és ZigBee, valamint az ipari környezetben alkalmazott WirelessHART és ISA100.11a, jelentős fejlesztéseket hoztak a piacon [4][5]. A megfelelő vezeték nélküli technológia kiválasztása egy adott alkalmazás számára különösen összetett lehet az IoT alkalmazások esetén, ahol különböző rendszerarchitektúrák versengenek egymással. Például egy környezetmonitorozó rendszer kialakításakor egy LPWAN-alapú szenzorrendszer és egy IoT gateway-vel kiegészített WPAN hálózat egyaránt alkalmas lehet a feladat ellátására.

Az IQRF mint ígéretes technológia jelent meg hatékony megoldásokat kínálva az Internet of Things területén [11]. A technológia több mint egy évtizede már elérhető a tudományos szakirodalom is elkezdte felfedezni az IQRF hasznosságát az IoT alkalmazásokban, számos tanulmány bemutatva annak potenciálját és alkalmazását [23][24][25][26][27]. A területen számtalan alkalmazás készült el elsősorban

monitorozási célokra. Annak ellenére, hogy ígéretes vezeték nélküli technológiáknak ígérkezik, és a saját tapasztalataimon és a megjelent tanulmányokat áttekintve az IQRF technológia egyes területei még további kutatási vizsgálatot igényelnek, különösen a hálózati kommunikáció stabilitása tekintetében. A kutatásom során az IQRF technológia által alkalmazott megoldásokat vizsgáltam általánosabb tekintetben. Az IQRF hálózatok szabadalmakban is jól dokumentált sajátosságait vizsgáltam. Az IQRF vezeték nélküli szenzorhálózat, saját protokolljának és szövevényes (mesh) hálózati topológiájának köszönhetően, hatékony és megbízható megoldásként került előtérbe. A kutatásom során részletesen elemeztem az IQRF vezeték nélküli hálózatokat, kiemelve technológiai alapjait, energiafelhasználást a különböző hálózati csomagküldési eljárások során, illetve a hálózat stabilitását.

Az IQRF a széleskörben elterjedt megoldásoktól eltérően nem az IEEE szabványra építő megoldás. Annak érdekében, hogy teljes körűen megértsük az IQRF működési hatékonyságát, szimulációs eszközöket és a valós világból származó telepítési adatokat egyaránt felhasználtam. A kutatási tevékenységem során ipari megbízások és projektek keretében lehetőségem nyílt olyan valós problémák elméleti és gyakorlati hátterének vizsgálatában és megoldásában való aktív részvételre, amelyek kiemelt fontosságúak voltak.

A kutatásom célja volt, hogy az IQRF hálózatoknál felmerült problémákra és még nem kidolgozott kérdésekre adhassak megoldást. Az átfogó céлом volt továbbá, hogy tervezőknek, mérnököknek és döntéshozóknak átfogó erőforrást biztosítson a hatékonyabb és megbízhatóbb vezeték nélküli szenzorhálózatok telepítéséről.

MOTIVÁCIÓ ÉS CÉLKITŰZÉS

A kutatói munkám során számos kutatás-fejlesztési tevékenységben, ipari megbízásban és projektben vettem részt, amelyek során lehetőségem nyílt a valóságban felmerülő elméleti és gyakorlati problémák mélyreható vizsgálatára és megoldására. Ezek a projektek gyakran matematikai modellezésen, szimuláción és informatikai fejlesztéseken alapultak, lehetővé téve számomra, hogy elméleti ismereteimet gyakorlati környezetben is kamatoztassam és ezzel bővítsem szakmai tapasztalatomat. A szenzorhálózatok területe különösen érdekes számomra, mivel számos kihívást és finomításra váró problémát kínál, amelyek új, innovatív megoldások megtalálására ösztönöznek. Ez a terület külön motivációt jelentett számomra, tekintettel arra, hogy bár a vezeték nélküli hálózatok már hosszú ideje jelen vannak a mindennapokban, mégis léteznek megoldatlan problémák, különösen a kevésbé ismert technológiák körében, amelyek új lehetőségeket kínálnak. Az IQRF vezeték nélküli technológia egy ilyen kevésbé ismert megoldás, amellyel több projektem során is foglalkoztam. Az IQRF innovatív megközelítéseket kínál, de számos olyan kérdést és problémát is felvetett, amelyek megoldásának kidolgozása további motivációt adott a kutatómunkámhoz.

A kutatásom középpontjában az IQRF alapú vezeték nélküli szenzorhálózatok telepítése és üzemeltetése során tapasztalt problémák és felmerülő kérdések állnak. Az IQRF technológia, bár széles körben alkalmazott megoldás a vezeték nélküli szenzorhálózatok területén, jelentős eltéréseket mutat a közeghozzáférés és útválasztási protokollok terén a hagyományos megoldásokhoz képest. Ez felveti a szükségességét annak vizsgálatának, hogy az IQRF technológiával megvalósított hálózatok hogyan kezelik az energiaellátás és a kommunikációs hatékonyság kérdéseit, különös tekintettel a hálózati elemek élettartamára és a kommunikációs hibákra. A hálózati elemek élettartamának meghatározása kiemelten fontos a vezeték nélküli szenzorhálózatok esetében, mivel az elemes tápellátású eszközök határozzák meg a hálózat karbantartási ciklusait és megbízhatóságát. Az elemélettartam közvetlen befolyásolja a hálózat teljesítményét, mivel az energia kimerülése eszköz kieséseket okozhat, ami kommunikációs hibákhoz és adatvesztéshez vezethet. E problémakör megértése kulcsfontosságú a megbízható és hosszú távú működés biztosításához.

Az IQRF hálózatok egyik jellegzetessége az elárasztásos útvonalválasztás alkalmazása, amely bár egyszerűsíti az útválasztási döntéseket, nem biztosítja a leghatékonyabb adatátvitelt a redundáns útvonalak miatt. Ez a megközelítés különösen problémás lehet a többugrásos (multihop) kommunikáció során, ahol az energiahatékonyság és az adatátviteli megbízhatóság kulcsfontosságú. A hálózat időosztásos közeghozzáférési módszere tovább bonyolítja a helyzetet, mivel korlátozza a kommunikációs lehetőségeket és növeli a hibás adattovábbítások kockázatát.

A kutatásom célja, hogy feltárja az IQRF alapú szenzorhálózatok telepítésével és működtetésével kapcsolatos kihívásokat, különös tekintettel az elemélettartam, kommunikációs hatékonyság és hibatűrés kérdéseire. A cél, hogy javaslatokat tegyek az energiahatékonyság javítására, a kommunikációs megbízhatóság növelésére és az útválasztási stratégiák optimalizálására az IQRF technológia keretein belül. Az eredmények hozzájárulhatnak a vezeték nélküli szenzorhálózatok hatékonyabb tervezéséhez és üzemeltetéséhez, különösen azokban az alkalmazásokban, ahol az energiahatékonyság és a hálózati stabilitás kritikus fontosságú.

VIZSGÁLATI MÓDSZEREK

A kutatási tevékenységem során kezdeti lépésként mélyreható irodalomkutatást végeztem, amely magában foglalta az IQRF hálózatok és más, hasonló vezeték nélküli kommunikációs technológiák alapjait, valamint a matematikai modellezésükre vonatkozó szakirodalmat. Céлом az volt, hogy átfogó képet kapjak azokról a technológiai és elméleti alapokról, amelyek lehetővé teszik ezeknek a hálózatoknak a hatékony működését és alkalmazását különböző környezetekben. Különös figyelmet fordítottam a vezeték nélküli hálózatok adatgyűjtési technikáira, kommunikációs protokolljaikra és azok energiagazdálkodására, valamint ezen területek matematikai modellezési megközelítéseire.

A kutatás következő szakaszában gyakorlati vizsgálatokba kezdtem, amelyek keretében különféle IQRF alapú vezeték nélküli hálózatokat elemeztem, hogy megértsük azok alkalmazási sajátosságait és kihívásait. Ez magában foglalta az adatgyűjtési lehetőségeket, a hálózati kommunikációs stabilitás és az energiafelhasználás mélyreható

vizsgálatát. Ezen analízisek alapján matematikai modelleket alkottam, amelyek célja az volt, hogy előre jelezzék a szenzorhálózatok teljesítményét különböző operációs körülmények között, beleértve az energiahatékonyság és a kommunikációs megbízhatóság optimalizálását.

Ezen felül, a kutatásaim során lehetőségem nyílt bekapcsolódni valós ipari projektekbe, ahol közvetlenül tesztelhettem az IQRF hálózatokat különféle alkalmazási környezetekben. Ez a gyakorlati munka kulcsfontosságú volt számomra, mivel lehetővé tette, hogy valós körülmények között szerezhessenek tapasztalatokat, amelyeket aztán felhasználhattam a modellek továbbfejlesztésére. Az ipari alkalmazásokból származó adatok és megfigyelések betekintést nyújtottak a vezeték nélküli hálózatok valós világbeli teljesítményébe, így jelentősen hozzájárultak a kutatásaim során alkalmazott modellezési technikák finomításához és validálásához. Az ipari projektek során szerzett tapasztalatok nemcsak hogy erősítették elméleti megértésemet, de hozzájárultak a kutatási eredményeim gyakorlati alkalmazhatóságának növeléséhez is.

AZ ÉRTEKEZÉS FELÉPÍTÉSE

Az értekezésem egy átfogó leírással kezdődik, amely bemutatja a kutatás során alkalmazott vezeték nélküli szenzorhálózatok alapfogalmait és a valós környezetben alkalmazott technológiákat, különös figyelmet fordítva az IQRF technológiára, mint egy kevésbé elterjedt, de ígéretes megoldásra. Ennek érdekében az első fejezetben az IEEE 802.15 alapú hálózatokat is bemutatom, amelyek széles körben alkalmazott és alaposan tanulmányozott technológiák, így szilárd alapot nyújtanak az IQRF technológia értékeléséhez. A második fejezet részletesen tárgyalja az IQRF technológiát, hangsúlyozva annak hasonlóságait és különbségeit az IEEE 802.15 alapú hálózatokhoz képest, ami elengedhetetlen az IQRF mélyebb megértéséhez és helyének meghatározásához a vezeték nélküli kommunikációs technológiák között.

A következő rész, a harmadik fejezet, az IQRF alapú szenzorhálózatokban alkalmazható adatgyűjtési technikákat veszi górcső alá, összehasonlítva azokat az időtartam és a hálózaton belüli csomagküldések számának eloszlása alapján. Ez a rész

kulcsfontosságú az adatgyűjtési módszerek hatékonyságának és alkalmazhatóságának megértésében.

A negyedik fejezet bemutatja és összehasonlítja az IQRF vezeték nélküli hálózaton keresztül történő adatgyűjtési eljárásokat, kiemelve azok időtartamát és a csomagküldések eloszlását. Emellett részletesen tárgyalja a összefűzött adatgyűjtési módszert, amely a későbbi fejezetek alapvető eleme is.

Az ötödik fejezet az elemélettartam meghatározását elemezi, különösen az összefűzött adatgyűjtési eljárás szempontjából, ami alapvető jelentőséggel bír a hálózati eszközök karbantartási stratégiái és az energiahatékonyság optimalizálása szempontjából.

A hatodik fejezet a hálózati kommunikációs stabilitás vizsgálatával foglalkozik, bemutatva a hálózatok gráffal történő modellezését és ezen modell alapján a stabilitás meghatározását.

Végül, a hetedik fejezet a hálózat feltérképezési stratégiáinak elemzésével zárul, amely kulcsfontosságú a hálózati topológia megértéséhez és a hálózatok optimalizálásához.

Az értekezés célja, hogy részletesen bemutassa az IQRF alapú vezeték nélküli szenzorhálózatok előtt álló kihívásokat és lehetőségeket, valamint ezekre adott válaszokat, ezzel hozzájárulva a vezeték nélküli kommunikációs technológiák fejlődéséhez és gyakorlati alkalmazásához.

1. VEZETÉK NÉLKÜLI SENZORHÁLÓZATOK

A szenzorok a szensorhálózatban ad-hoc módon, azaz előre meghatározott rendszer nélkül kerülnek telepítésre. Emiatt a hálózatnak képesnek kell lennie az önszerveződésre, és alkalmazkodnia kell a véletlenszerű csomópont eloszláshoz. Fontos a felügyelet nélküli működés biztosítása is, hiszen a szenzorok gyakran nehezen hozzáférhető vagy távoli helyeken vannak telepítve. A szenzorok többsége stacionárius a telepítés után, ellentétben a mobil ad-hoc hálózatokkal, ahol az állomások mozgásban vannak. Bizonyos alkalmazásokban azonban lehetnek mobil állomások is, általában alacsony mobilitással. A szensorhálózatokban az információ általában több forrásból (szenzorból) egy központi nyelő (bázisállomás) felé áramlik, de előfordulhat multicast vagy peer-to-peer forgalom is. A szenzorok energia-, számítási- és tárolási-kapacitása erősen korlátozott, ami miatt hatékony erőforrás-menedzsmentre van szükség. A szensorhálózatok alkalmazása specifikus, és a tervezési követelmények az alkalmazástól függően változhatnak, például precíziós felügyeleti rendszerek és periodikus időjárás-monitorozás között [1][7][10][80].

1.1. Ad-hoc hálózatok

A vezeték nélküli szensorhálózatok tipikusan önszerveződő ad-hoc jellegűek. Ez azt jelenti, hogy a hálózati struktúra nem előre tervezhető, hanem dinamikusan alakul ki a szenzorok közötti interakciók során. A fizikai összeköttetések, vagyis a linkek, véletlenszerűen jönnek létre, aminek eredményeként egy véletlen fizikai topológia alakul ki. Ugyanakkor a logikai topológia kialakítása kiemelten fontos a hálózat hatékony működése érdekében, különös tekintettel a skálázhatóságra, ami kulcsfontosságú a hálózat bővülése során [7][10].

1.2. Elosztott (Flat) struktúra

Az elosztott, vagy flat struktúrában nincs előre meghatározott logikai felépítés, és minden egyes node, azaz hálózati csomópont, részt vesz a hálózat vezérlésében. A node-ok közvetlen információt csak a közvetlen szomszédairól szereznek, ezért rendszeresen frissíteniük kell az információkat az egész hálózaton belül, például periodikusan elküldve

az általuk tárolt routing táblát. Azonban ez a struktúra nem skálázható hatékonyan, különösen nagyobb hálózatok, például több ezer node esetén [6][7][10].

1.3. **Klaszterezés**

A klaszterezés során a hálózatot különböző klaszterekre osztjuk, ahol minden node legalább egy klaszter tagja. Minden klaszternek van egy vezérlője, a cluster head, amely irányítja a klaszteren belüli csomópontokat. Az átjáró, vagy gateway állomások biztosítják a klaszterek közötti kommunikációt. Ez a megközelítés jobban skálázható, bár felveti a kérdést, hogy a klaszterek hogyan szereznek információt a távolabbi klaszterekről. Ez a probléma egy magasabb hierarchiaszinten is fennáll, amit a klaszter vezérlők hierarchikus fába szervezésével lehet orvosolni [6][7][8][10].

1.4. **Útválasztás és routing feladatainak definíciója a szenzorhálózatokban**

Az útválasztás, vagy routing, a hálózatok egyik alapvető művelete, amely során fontos döntéseket kell hozni. Amikor egy adatkérés felmerül, a hálózatnak három alapvető kérdésre kell választ adnia: Először is meg kell állapítani, hogy létezik-e egyáltalán útvonal a két érintett csomópont között. Másodsor, ha létezik ilyen útvonal, meg kell vizsgálni, hogy annak használata megengedett-e a hálózati forgalomszabályozás szempontjából. Harmadszor, ha az első kérdésre a válasz nemleges, a hálózatnak megoldást kell találnia erre a helyzetre.

A routing alapvetően két részből áll: a szabályokból és az adatokból. A szabályok meghatározzák, hogy melyik útvonalon történjen az üzenet továbbítása, míg az adatok azokat az információkat tartalmazzák, amelyek a döntés meghozatalához szükségesek. A döntés meghozatalának helye lehet centralizált vagy elosztott, és a routingnak adaptívnek kell lennie, azaz képesnek kell lennie alkalmazkodni a hálózat aktuális állapotához [7][8][9][10].

1.5. **Routing protokollok csoportosítása különböző tervezési szempontok szerint**

A routing protokollokat több szempont szerint csoportosíthatjuk. A hálózati struktúra alapján elosztott (flat), hierarchikus és elhelyezkedés alapú protokollokat különböztethetünk meg. A protokoll működése alapján pedig többutas (multipath-based), lekérdezésen alapuló (query-based), megállapodáson alapuló (negotiation-based),

szolgáltatminőségi (QoS-based) és koherens (coherent-based) típusokat ismerünk[4][6][9].

WSN-ben a routing tervezésekor figyelembe kell venni az energiatakarékosságot a pontosság és megbízhatóság elvesztése nélkül. A node-oknak kettős szerepet kell betölteniük: adatküldőként és útvonalirányítóként is működniük kell. Egy node kiesése jelentős topológia-módosulást és új útválasztási folyamatot eredményezhet. További fontos tervezési szempontok közé tartozik az adatküldési modell, amely lehet idővezérelt (folyamatos), eseményvezérelt, vagy lekérdezés-vezérelt, attól függően, hogy milyen alkalmazási környezetben használjuk a szenzorhálózatot. A routing döntéseinek nagymértékben függeniük kell az adatküldési modelltől. A hibatűrés és a skálázhatóság is kiemelten fontos tervezési kérdések a WSN-ben. A hálózatnak képesnek kell lennie több node kiesését is kezelni, ami többszintű redundancia beépítését igényelheti. A hálózat dinamikáját és a lefedettségi szempontokat is figyelembe kell venni a tervezés során. Az adatösszegzés, vagyis az aggregation, lehetővé teszi az adatok tömörítését és az energiatakarékosság növelését. Végül a szolgáltatásminőség, vagy QoS is fontos szempont, különösen az időkritikus alkalmazások esetében [7][8][9][10].

1.6. Hálózat és routing modellezése a szenzorhálózatokban

A hálózat és routing modellezéséhez matematikai megközelítést alkalmazunk, ahol a hálózatot gráfként ábrázoljuk. Ebben a modellben a szenzorok és a közöttük lévő rádiós összeköttetések gráf csomópontokként és élökként jelennek meg. A hálózat gráfja lehetővé teszi a routing algoritmusok vizualizációját és értelmezését gráfelméleti algoritmusok segítségével. Ebben a gráfmodellben a csomópontok a hálózat szenzorait, az élék pedig a szenzorok közötti kommunikációs összeköttetéseket képviselik. Az élék lehetnek irányítottak vagy irányítatlanok, attól függően, hogy a kommunikáció egyirányú-e vagy kétirányú. Például, ha egy állomás nem vesz részt az üzenet továbbításában, azt az élék irányítottságával jelezhetjük. Emellett a távolság fogalma is értelmezhető a csomópontok között, ahol meghatározható a link költsége vagy minősége. A gráfot jelölhetjük $G(N, E)$ formában, ahol N a csomópontok halmaza, E pedig az élék halmaza.

A hálózat gráfjában az útvonal egy olyan út, amelyben egyetlen él sem ismétlődik. Egy gráf összefüggőnek tekinthető, ha minden csomópontból létezik útvonal minden más csomópontba. A hurok egy olyan út, amely visszatér a kiindulási csomóponthoz, míg egy fa egy összefüggő gráf, amelyben nincsenek hurkok. A feszítő fa vagy teljes fa, egy olyan fa, amely a gráf összes csomópontját tartalmazza. Ezek a modellezési technikák lehetővé teszik a hálózat és routing algoritmusok hatékony tervezését és elemzését. Különösen fontosak a szenzorhálózatok tervezésekor, ahol a hálózat dinamikus jellege és a szenzorok korlátozott képességei miatt kiemelt figyelmet kell fordítani az útválasztásra és a hálózati forgalom optimalizálására [7][8][9][10].

1.7. Közeghozzáférés vezérlése (MAC) a hálózatokban

A hálózatok közeghozzáférési módszereit két fő csoportba sorolhatjuk. Az első a pont-pont közötti összeköttetés, ahol bármely két csomópont között létrejöhet közvetlen kapcsolat. Ebben az esetben a csatorna dedikált, ami azt jelenti, hogy nincs szükség a MAC-re, mivel a kommunikáció exkluzív és zavartalan. A második csoport az üzenetszórásos csatorna, amely minden csomópont számára elérhető. Itt a közös csatorna hozzáférési jogáért folytatott küzdelem kritikus kérdéssé válik, hiszen el kell dönteni, hogy melyik állomás kapja meg a hozzáférést.

Alternatív elnevezések a MAC-re vonatkozóan a többszörös hozzáférésű (Multiple Access) és a véletlen hozzáférésű (Random Access) kifejezések. A csatornakiosztás lehet statikus vagy dinamikus. A statikus megosztási módszerek közé tartozik a frekvenciaosztásos (FDM), az időosztásos (TDM) és a kódosztásos (CDM) multiplexing. Bár ezek hatékony módszerek, nagy állomásszám és/vagy nem egyenletes forgalom esetén a csatorna kihasználtsága drasztikusan csökkenhet [6].

A dinamikus csatornakiosztás lehetővé teszi a változó igényeknek megfelelően történő hozzáférés jogának kiosztását. Ennek során a rendszer alkalmazkodik az aktuális hálózati forgalomhoz és biztosítja az optimális erőforrás-kihasználást. A csatornakiosztás vizsgálatánál több fontos feltételezést kell figyelembe venni. Például, hogy az N független állomás egymással kommunikál egyetlen csatornán keresztül. Ütközés akkor lép fel, ha két keret időben átlapolódik, ami az összes állomás számára érzékelhető. Megkülönböztethetünk folyamatos időt és résekre osztott időt. A csatornafigyelés azt

jelenti, hogy az állomások képesek-e megállapítani adás előtt, hogy a csatornát már használja-e valaki [6].

2. IEEE 802.15.4 ALAPULÓ HÁLÓZATOK

Kutatásom során az IQRF hálózatokat vizsgálva megállapítottam, hogy alkalmazási területeiken jelentős hasonlóságok mutatkoznak az IEEE szabványok által meghatározott LR-WPAN hálózatokkal, különös tekintettel a ZigBee rendszerekre. Ennek fényében, a könnyebb összehasonlíthatóság érdekében, részletesen ismertetem az IEEE 802.15.4 szabványt, amely a ZigBee alapját is képezi. Az IEEE 802.15.4 alapú megoldások bemutatása kulcsfontosságú annak érdekében, hogy megalapozott összehasonlítási alapot nyújthassak az IQRF hálózatok számára, valamint lehetővé tegye az IQRF hálózatok specifikus problémáinak mélyebb megértését. Bár az IQRF és az IEEE 802.15.4 hálózatok számos ponton eltérnek egymástól, alkalmazási területük és technológiai jellemzőik révén kiváló összehasonlítási alapot biztosítanak a kutatásom számára [6][17][18][19][30][31].

A vezeték nélküli technológiák jelentős része az IEEE 802.15 szabványcsaládra épül, ezen belül is kiemelkedő az IEEE 802.15.4, ami alacsony sebességű vezeték nélküli személyi hálózatokra (LR-WPAN) lett kifejlesztve. Ezt a szabványt 2003-ban határozta meg az IEEE 802.15 munkacsoport. Az IEEE 802.15.4 meghatározza az OSI modell fizikai és adatkapcsolati rétegét az LR-WPAN hálózatok számára, és alapot nyújt számos más specifikációnak is, mint például a Zigbee, ISA100.11a, WirelessHART, MiWi, 6LoWPAN, Thread, Matter és SNAP. Ezek a specifikációk a szabványt a felsőbb rétegek fejlesztésével egészítik ki, különösen a 6LoWPAN, ami az IPv6 internet protokollt alkalmazza az LR-WPAN hálózatokon keresztül. Ennek eredményeképpen az IEEE 802.15.4 nem csak a fizikai és adatkapcsolati réteg alapvető megoldásait nyújtja, hanem az alapját is képezi a kiterjedt hálózati alkalmazások és szolgáltatások széles körének [1][4][5].

2.1. IEEE 802.15.4 fizikai és adatkapcsolati réteg

A fizikai rétegre vonatkozóan meghatározza a használható frekvenciasávokat, az alkalmazható DSSS alapú modulációkat, amelyek a szabvány újabb verzióiban folyamatosan bővülnek. Az elterjedt megoldásokban leggyakrabban az első kiadásban is szereplő modulációkat alkalmazzák. Az IEEE 802.15.4 szabvány három különböző frekvenciasávban működik: 868/915/2450 MHz, melyeket a fizikai réteg kezel, beleértve a rádió adó-vevő modult (radio transceiver), csatornaválasztást, energia- és jelkezelési funkciókat. A MAC réteg a fizikai csatorna használatát, a hálózati jelzések kezelését, a keretek érvényesítését, garantált időszeltek biztosítását és csomóponti összekapcsolásokat szabályozza [17].

A szabvány támogatja a csillag-, pont-pont, és mesh topológiákat, valamint az AES 128 bites kulcshosszúságú titkosítást alkalmazza biztonsági célokra. Az első frekvenciasáv, az 868 MHz-es sáv, elsősorban Európában használatos, egyetlen kommunikációs csatornával. Kezdetben 20 kbit/s sebességet támogatott, ami későbbi revíziókban 100 kbit/s-ra nőtt. A második sáv, a 902–928 MHz-es tartomány, Észak-Amerikában van használatban, kezdetben tíz, majd később harminc csatornával. Itt a kezdeti adatátviteli sebesség 20 és 40 kbit/s volt, amit később 100 és 250 kbit/s sebességre emeltek. A harmadik sáv, a 2400–2483.5 MHz, világszerte használt, tizenhat csatornát támogatva. A 2003-as szabványverzió 250 kbit/s sebességű adatátvitelt biztosított ebben a sávban [17].

Modulációs technikákat illetően az IEEE 802.15.4 a 868/915 MHz-es sávokban a Direct-Sequence Spread Spectrum (DSSS) módszert alkalmazza, BPSK vagy O-QPSK modulációval. A későbbi revíziók további fizikai rétegeket vezettek be, amelyek szintén DSSS modulációt használnak. A 2450 MHz-es sávban az eredeti szabvány O-QPSK modulációt alkalmazott a tizenhat csatornán, amit a későbbi revíziók is megtartottak. Ezek a modulációs technikák segítik az adatátviteli sebesség, hatótávolság és energiafogyasztás optimalizálását az adott alkalmazás igényeihez igazodva [17].

2.2. WirelessHART

A WirelessHART protokoll az IEC 62591 szabvány által leírt önszervező mesh hálózat kialakítására alkalmas technológia, melyet elsősorban ipari alkalmazásokhoz fejlesztettek. A WirelessHART a HART (Highway Addressable Remote Transducer) ipari terepi kommunikációs protokoll vezeték nélküli kiterjesztett változata, mely a 2.4GHz-es frekvenciatartományban működik. A protokoll a beacon enabled megoldást használja, mely által a hálózat alkalmas lehet valós idejű feladatok elvégzésére is. A protokoll továbbá támogatja a csatornaugrásokat (channel hopping) a megbízhatóbb kommunikáció érdekében. A csatornaugrások optimalizálása érdekében fenntartanak egy feketelistát (Channel Blacklisting), amelyeket nem használ a hálózat, mert túl zajosnak ítélik. A WirelessHART hálózat fő elemei a szenzor node-ok (Field devices), hozzáférési pontok (Access Point) és az átjáró (Gateway), amely leggyakrabban tartalmazza a hálózat felügyeletét végző alkalmazást (Network and Security Manager). A hálózat az átjárón keresztül csatlakozhat a folyamatirányítási rendszerhez.

A hálózatban minden node képes teljes értékű eszközként működni, azaz képes továbbítani a csomagokat, melyhez két útvonal választási technikát alkalmaz. Elsődlegesen gráf alapú (Graph Routing), melyet a hálózat menedzsernek kell elkészítenie és letöltenie az eszközökbe. A gráf az eszközöket összekötő útvonalak halmaza, mely tartalmazhat alternatív útvonalakat is és egy azonosítóval van ellátva, mely csomagba van ágyazva. A gráf azonosító egy irányított gráfot reprezentál, melynek csúcsai az egyes eszközök, az élek az eszközök közötti kapcsolatok, melyek iránya a küldőtől a fogadó irányába mutat. Ennek előnye, hogy kiszámítható működést garantál. Hátránya viszont, hogy az útvonalgráfokat nagy odafigyeléssel kell elkészíteni, hogy a gráfok ne tartalmazzanak hurkokat, hogy elkerülhető legyen, hogy végtelen ciklusba kerüljön a csomagküldés [11][13][14].

2.3. ISA100.11a

Az ISA100.11a az IEC 62734 szabvány által leírt ipari IPv6 alapú vezeték nélküli protokoll, melyet az ISA (*International Society of Automation*) nonprofit szervezet fejlesztett ki [18]. Az ISA100 fizikai rétege az IEEE 802.15.4 szabványra épül és a 2.4GHz-es ISM frekvencia tartományt használja. A protokoll időosztásos és ütközést elkerülő közeghozzáférést (TDMA, CSMA/CA) alkalmaz, illetve ezek hibrid változatát. Az ISA100 hálózatban az IEEE 802.15.4 szabványnak megfelelően a node-ok vagy teljes, vagy redukált funkciójú eszközök lehetnek, melyek közül csak a teljes funkciót ellátani képesek a csomagok továbbítására. A protokoll támogatja az IEEE 802.15.4 szerinti 16 bites címzést, valamint, az ISA100 hálózati rétege 6LoWPAN kompatibilis, azaz támogatja az IPv6 alapú címzést is. Ennek köszönhetően a vezeték nélküli hálózatba tartozó eszközök transzparensen elérhetőek a háttér informatikai hálózatból. A szállítási rétegben az ISA100 támogatja az UDP csomagokat, ezzel tovább könnyítve a komplex hálózatokban történő alkalmazást [12][15].

Az IEEE 802.15.4 szabvány számos korlátozással rendelkezik, mint például az alacsony megbízhatóság, a korlátlan csomagkésleltetések és a védelem hiánya az interferencia ellen, amelyek megakadályozzák annak alkalmazását olyan területeken, ahol a megbízhatóság és a késleltetés szigorú követelményei vannak. Az IEEE kiadta az 802.15.4e módosítást, amely számos fejlesztést és módosítást vezet be az eredeti szabvány MAC rétegébe a korlátozások leküzdése érdekében. Az 802.15.4e szabvány jelentős újításai: a Time Slotted Channel Hopping (TSCH), a Deterministic and Synchronous Multi-channel Extension (DSME) és a Low Latency Deterministic Network (LLDN). Ezek jelentős részét a WirelessHART és ISA100 megoldások is átemelték [11].

Az útvonal választási technikája kétféle lehet, gráf vagy forrás alapú. A gráf alapú útvonal választási módszer esetén az abban résztvevő összes eszközben letárolt gráf azonosítóját felhasználva megy végbe. A hálózat kialakításakor az egyes eszközökben letárolásra kerül az egyes útvonalak gráfja melyhez egy azonosítót rendel. A csomagküldés folyamán a forráseszköz a megfelelő azonosítót a csomag fejlécében helyezi el, melyet a többi router értelmez és továbbítja a megfelelő eszköznek, vagy eszközöknek. A másik eljárás

a forrás alapú. Ekkor a forrás eszköz a teljes útvonal listát beírja a fejlécbe, azaz az útválasztásban résztvevő eszközöknek nem kell ismerniük az útvonalat, mivel az explicit módon szerepel a csomagban. Az ISA100 esetében is nagy hangsúlyt kapott a kommunikáció védelme, amely a protokoll AES-128 típusú titkosítást használ [12][15].

2.4. Zigbee

A ZigBee az IEEE 802.15.4 alapú hálózatokon működő, alacsony energiafogyasztású, alacsony adatátviteli sebességű eszközök számára kifejlesztett protokoll. Kiválóan alkalmas olyan alkalmazásokhoz, ahol hosszú élettartam, biztonságos működés és egyszerű hálózati topológia szükséges. Az alacsony energiafogyasztás miatt nagyobb működési idő érhető el a beépített elemekkel, ami különösen fontos a szenzorhálózatok szempontjából. Az egyik legelterjedtebb IEEE 802.15.4 alapú megoldás a ZigBee. A ZigBee fejlesztését összefogó szervezet a ZigBee Alliance, amely specifikálta a logikai hálózatot, a biztonsági és adatvédelmi eljárást és az alkalmazási profilokat. A ZigBee egyik nagy előnye, hogy az egyik legelterjedtebb LR-WPAN megoldás, a ZigBee Alliance tagjai között több mint 300 gyártó szerepel [18].

A ZigBee hálózatokban a koordinátor kulcsfontosságú szerepet játszik az interferencia minimalizálásában. Az elérhető csatornák átvizsgálása során a lehető legkevesebb interferenciával rendelkező csatornát választja, ami elengedhetetlen a hálózat hatékonyságának fenntartásához. A ZigBee mesh hálózati architektúrája útvonal diverzitást és dinamikus útválasztást kínál, javítva a koegzisztenciát a 2.4GHz-es frekvencia tartományban. Továbbá, a ZigBee eszközök az 802.15.4 szkennelési képességeit használják fel az interferencia érzékelésére és jelentésére a koordinátornak, amely ezután utasíthatja a hálózatot a csatornák váltására az optimális teljesítmény érdekében [18].

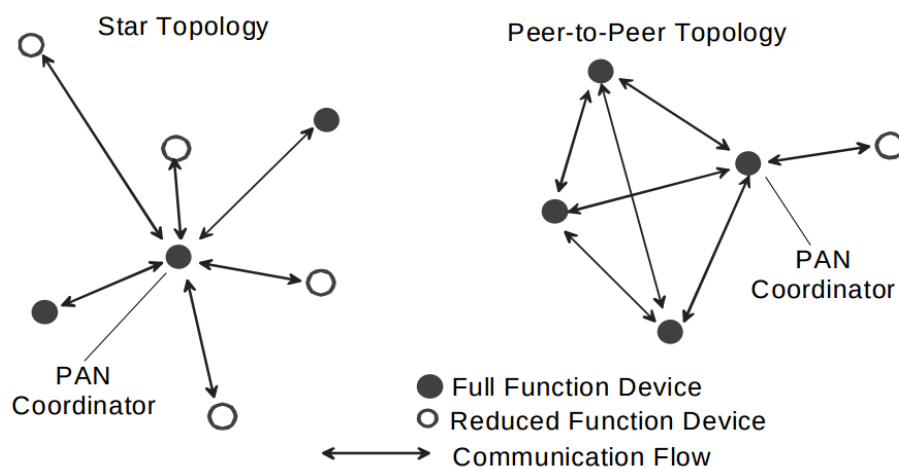
Az IEEE 802.15.4 egy szabvány, mely meghatározza egy alacsony sebességű vezeték nélküli személyi hálózat (LR-WPAN) fizikai és MAC rétegét. Elterjedt vezeték nélküli megoldások épülnek erre a szabványra, mint a ZigBee, a WirelessHART vagy az ISA100.11a.6. A szabvány képezi az alapját a 6LoWPAN-nek, mely lehetővé teszi az IPv6 címezést az IEEE 802.15.4 szabványú hálózatokban [17][18].

A hálózati réteg kulcsfontosságú szerepet tölt be a szenzorhálózatokban, mivel ez a réteg a felelős a végpontok közötti stabil és megbízható kapcsolatok létrehozásáért és karbantartásáért. Ez magában foglalja a bármely két hálózati csomópont közötti kommunikáció fenntartását, biztosítva ezzel a folyamatos és zökkenőmentes adatáramlást. Fontos eleme a hálózati réteg munkájának az útválasztás, amely során a legoptimálisabb útvonalakat határozzák meg az adatsomagok számára a hálózaton belül. Ez a folyamat létfontosságú a hatékony és gyors adatátvitelhez. A szenzorhálózatok hálózati rétegének tervezésekor két összefüggő, de különálló területet kell figyelembe venni. Az első a hálózat struktúrája, azaz a topológia, amely meghatározza, hogy a hálózati elemek hogyan kapcsolódnak egymáshoz. Ez a topológia lehet statikus vagy dinamikus, attól függően, hogy a hálózati eszközök hogyan és milyen gyakorisággal változtatják meg helyzetüket. A második terület az üzenetek továbbítására használt algoritmusok, vagyis a routing. Ez a rész kritikus a hálózat hatékonysága és megbízhatósága szempontjából, mivel a megfelelően megtervezett routing algoritmusok képesek optimalizálni az adatforgalmat, csökkenteni a késleltetést és növelni az átviteli sebességet [6].

A ZigBee hálózatok az IEEE 802.15.4 szabványnak megfelelően tartalmazzak egy PAN koordinátorként működő FFD-t, *router*-nek nevezett FFD-kat, illetve *end device*-nek nevezett RFD-kat. A hálózat topológiája lehet csillag, fa vagy mesh. Alapvetően az AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing) útválasztási technikát használja, melynek lényege, hogy egy adott útvonal csak akkor kerül meghatározásra mikor annak használatára szükség van. A meghatározott útvonal az alternatív útvonalak közül a legkisebb ugrásszámmal rendelkezik. Az eljárás előnye, hogy a meghatározott útvonal optimális lehet, továbbá nem használt útvonalakat nem szükséges tárolni. A másik alkalmazott eljárás a *tree routing*. Ennél az eljárásnál nem szükséges tárolni az útvonalakat, mivel az üzenet útja dinamikusan alakul a hálózat fa struktúrájában a szülő-gyermek viszonyok alapján. Hátránya, hogy az ugrások száma nem minden esetben lesz optimális és nem képes alternatív útvonalakat alkalmazni [18][19].

A hálózatban két különböző típusú eszközt különböztet meg: a teljes funkciójú (Full Function Device - FFD) vagy csökkentett funkciójú eszközöket (Reduced Function

Device- RFD). Az FFD három módban működhet, lehet PAN koordinátor, koordinátor vagy egyszerű eszköz. Az FFD kommunikálhat más FFD-vel vagy RFD-vel, de az RFD csak FFD-vel, azaz más RFD-vel csak egy FFD-n keresztül képes kapcsolatot teremteni. Az RFD-k kifejezetten egyszerű eszközök számára fenntartott típusok. Az IEEE 802.15.4 hálózatok a 11. ábra látható módon lehetnek csillag vagy peer-to-peer topológiájúak [11].



1. ábra IEEE 802.15.4 csillag és peer-to-peer topológia [17]

A címzés történhet MAC cím (64 bit) illetve hálózati cím (16 bit) alapján is. A PAN koordinátor 64 bites címe adja meg a hálózat azonosítóját, mely alapján képesek csatlakozni új eszközök. A hálózatban normál kommunikáció esetén a 16 bites rövid cím használható, így akár 65000 eszköz is alkothat egy hálózatot. Az IEEE 802.15.4 közeg hozzáférési eljárása alapvetően a CSMA/CA, de lehetőséget ad úgynevezett superframe-ek használatára, mellyel garantálható a valós idejű működés vagy energiatakarékos, alvó üzemmódok alkalmazhatóak [17].

A kommunikáció a koordinátor vagy FFD és RFD között történhet a non-beacon és beacon eljárásokkal. A beacon technika esetén a PAN koordinátor meghatároz egy úgynevezett superframe-et, mellyel az FFD-k egy meghatározott periódusonként küldik a beacon-t. Ezt a végpontok észlelik és küldhetnek adatot. Az eljárás előnye, hogy az eszközök energiatakarékos üzemmódba válhatnak és csak a beacon elküldését követően várakoznak egy rövid ideig adatok fogadására. A non-beacon technikával az FFD-k

folyamatos készenléti állapotban kell, hogy legyenek, a kommunikáció ekkor szintén CSMA/CA hozzáféréssel valósul meg. A két eljárás akár kombinálható is. Az alacsony késleltetést igénylő eszközökhöz a szabvány lehetőséget ad a beacon enabled hálózatokban garantált időrések használatára a „superframe” használatával, ezzel integrálva a TDMA nyújtotta előnyöket. A keret végén fenntartott időrésekben csak a megfelelő eszköz adhat, ez által garantálható a versengésmentes közeghozzáférés[17][18].

Az 1. táblázat az IQRF és az IEEE 802.15.4 szabvány alapú hálózatok főbb tulajdonságainak összehasonlítását mutatja be. A táblázat átfogó képet nyújt mindkét hálózattípus jellemzőiről a könnyebb összehasonlíthatóság érdekében.

Jellemző	IQRF	IEEE 802.15.4
Szabványosítás	Saját szabvány (IQMESH)	IEEE szabvány
Frekvenciasávok	868 MHz (EU), 916 MHz (US)	868 MHz (EU), 915 MHz (US), 2.4 GHz
Adatátviteli sebesség	Akár 19,2 kbps	20 kbps (868 MHz), 40 kbps (915 MHz), 250 kbps (2.4 GHz)
Hálózati topológia	Mesh, Csillag	Mesh, Csillag, Peer-to-Peer
Alkalmazott moduláció	GFSK	BPSK (868/915 MHz) O-QPSK (2.4 GHz)
MAC használat	TDMA - csatorna hozzáférés és hálózat szervezés kezelésére	CSMA/CA - csatorna hozzáférés, keret érvényesítés, visszaigazolás és hálózat szervezés kezelésére
Késleltetés	Alacsony (fix)	Változó (konfigurációtól függően)
Max. eszközszám hálózatonként	Akár 240 eszköz	Akár 65 536 eszköz (teoretikus)
Eszköztípusok	Koordinátor, Router, Végpont	Koordinátor, Router, Végpont
Biztonság	AES-128 titkosítás	AES-128/256 titkosítás
Útválasztási protokollok	Saját szabvány (flooding)	AODV, RPL, stb.

1. táblázat IQRF és az IEEE 802.15.4 szabvány alapú hálózatok rövid összehasonlítása

3. IQRF vezeték nélküli hálózatok

Az IQRF az IQRF Tech s.r.o. által fejlesztett vezeték nélküli megoldás szenzorhálózatokhoz, épületautomatizáláshoz és elosztott vezérlő rendszerekhez [45]. Az IQRF egy egyedi megoldás és nem az IEEE 802.15.4 szabványra épül. Az IQRF protokoll dokumentált, de nem nyíltan hozzáférhető, bár erre irányuló lépéseket tett a fejlesztő cég, amely az IQRF Open néven lesz elérhető [45]. Az IQRF hálózatok jelenleg csak rádiós modulok formájában érhetők el.

Az IQRF alkalmas pont-pont, pont-multipont, illetve mesh hálózat kialakítására. A IQRF mesh hálózatot IQMESH-nek nevezték el[46]. Az IQMESH hálózatokban két kitüntetett hálózati szerepkör van a koordinátor és csomópontok. A hálózat felügyeletét a koordinátor látja el. A hálózat alapvetően kérdés-válasz alapú, azaz minden kommunikációt a koordinátornak kell kezdeményeznie, de utóbbi verziókban már aszinkron üzenetküldés is elérhető. A hálózatban egy koordinátor és maximum 239 hálózati csomópont lehet. Az IQMESH protokoll időosztásos közeghozzáférése (Time Division Multiple Access - TDMA) alapuló irányított elárasztásos útválasztást használ a hálózati csomagok továbbítására. Az időosztásos technika alkalmazásának köszönhetően a hálózatot alkotó eszközök csak a nekik meghatározott időrésben (timeslot) kezdeményezhetnek kommunikációt. Ezzel elkerülhetőek a hálózatban a csomagütközések, valamint pontosan meghatározható a csomagok továbbítására szükséges idő. Az IQRF technológia az ISM sávban működik, az 868 MHz-es és 916 MHz-es frekvenciákon Gaussian Frequency-Shift Keying (GFSK) modulációval [39][45][46].

Az irodalom és a kutatások többsége az IQRF technológia szélesebb körű alkalmazásaira koncentrál, nem pedig a hálózatok sajátosságaira [22][27]. Kutatásom során átfogó vizsgálatot folytattam az IQRF hálózatokban alkalmazott különféle adatgyűjtési módszerekre, értékelve azokat az időbeli hatékonyság [12] szempontjából. Emellett elemeztük és értékeltük egy mélyalvás algoritmus hatékonyságát az IQRF hálózaton belül [13]. Továbbá, egy innovatív energiafogyasztási modellt vezettünk be, amely specifikusan az adatgyűjtési folyamatokhoz lett igazítva e hálózatokon [14]. Kutatásunk további betekintést nyújt az IQRF hálózatok hálózattervezési technikáiba is,

lehetővé téve az összes eszközközi kapcsolat detektálását [15]. A hálózat térképezése kritikus lépés a kapcsolódások elemzése szempontjából. Ez a tanulmány bemutatja, hogyan gyűjtenek hatékonyan információkat az adatgyűjtési módszerek az IQRF hálózatból, majd ezeket az adatokat felhasználva konstruálunk egy pontos szomszédsági mátrixot, amely reprezentálja a hálózat szerkezetét és összeköttetéseit.

Az IQRF technológia, melyet kiváló dokumentációja [46][44] jellemez és számos szabadalom [28][32] támasztja alá, amelyek egy sor alapvető témát fednek le, a hálózati eszközök funkcionális működésének leírásától a hálózati működés ismertetéséig. A dokumentációk és a szabadalmak részletes információt nyújtanak a hálózat architektúrájáról, függetlenül attól, hogy szövevényes, csillag vagy más elrendezést alkalmaz, minden konfiguráció különféle előnyökkel és kihívásokkal bír a hálózati stabilitás és az adatátviteli hatékonyság szempontjából. Az útválasztási mechanizmusokra fókuszálva, a szabadalmak [28][30][31] az IQRF hálózatokban történő irányított elárasztásos útválasztási algoritmust és módszertant ismertetnek az adatok átviteléhez a hálózaton keresztül. A hatékony adatgyűjtés területén a szabadalmak [30][30][32] újító módszereket és technológiákat vezetnek be az adatok gyors és hatékony gyűjtéséhez és továbbításához az IQRF hálózaton belül.

3.1. IQRF fizikai réteg és adatkapcsolati réteg

Az időosztásos közeghozzáférés (TDMA) a vezeték nélküli kommunikációban alkalmazott többszörös hozzáférési protokoll, mely lehetővé teszi, hogy több csomópont ugyanazt a frekvenciacsatornát felhasználva időben felváltva osztozzon rajta. Mindegyik csomópontnak egy meghatározott időablak van kijelölve, amelyben az adatait továbbíthatja. Ez a megközelítés hatékonyabban hasznosítja a rendelkezésre álló sáv szélességet, mivel a csomópontoknak nem kell folyamatosan figyelniük az átviteli lehetőséget, ami a Carrier Sense Multiple Access (CSMA) protokoll esetében szükséges lenne. A csatornáért való versengés szabályozása eltérő módon történik a két rendszerben.

A TDMA rendszerben a versengés a közeg időrészekre osztásával történik, míg a CSMA rendszerben a csomópontok a vivőérzékelést használják [6][7][8][9].

A sávzélesség-kihasználás szintén eltérő a két rendszerben. A TDMA rendszerben a sávzélesség osztódik ki fix időrészekre, amelyeket a csomópontoknak használniuk kell. A CSMA rendszerben a csomópontok akkor küldenek adatokat, amikor a csatorna üresjáratban van. Az energiahatékonyság a TDMA rendszer előnye, mivel a csomópontok csak az időrészek alatt továbbítanak, és az idő többi részében alvó állapotban lehetnek. A CSMA rendszerben a csomópontoknak folyamatosan figyelniük kell a csatornát mivel bármikor érkezhet üzenet, ami több energiát fogyaszt. A késeltetési idő szintén a TDMA rendszer előnye, mivel az időrészek rögzítettek, és a csomópontoknak nem kell várniuk az átvitelre. A CSMA rendszerben a csomópontoknak figyelniük kell, hogy az üresjáratban van-e a csatorna, mielőtt az adatokat küldenének, ami időt vesz igénybe. A TDMA rendszerek viszont a statikus telepítéseknél előnyösebbek, kisebb hálózatokhoz alkalmasak, míg a CSMA rendszer nagyobb, dinamikus hálózatokhoz használható. A két közeghozzáférés előnyinek ötvözésére is láthatunk példát az IEEE802.15.4 szabványban, ami CSMA közeghozzáféréseken alapul, de definiál egy szupercikluson alapuló adattovábbítást, ami az energiahatékonyság növelését teszi lehetővé [6][7][8][9].

A TDMA és a CSMA közeghozzáférés közötti választás a szenzorhálózat speciális követelményeitől függ, beleértve a hálózat méretét, a csomópontok sűrűségét és a szükséges kommunikációs sebességet. A TDMA és a CSMA mindkettőnek vannak természetesen előnyei és hátrányai, ezért a megfelelő protokoll kiválasztása alapos megfontolást igényel. Az időosztásos közeghozzáférésnek számos előnye van a CSMA-val szemben a vezeték nélküli érzékelőhálózatokban (WSN) [6][7][8][9]:

- Jobb sávzélesség-kihasználás: Ahogy korábban említésre került, a TDMA lehetővé teszi a rendelkezésre álló sávzélesség hatékonyabb felhasználását, mivel a csomópontoknak nem kell folyamatosan figyelniük az átvitel lehetőségét. Ez a rendelkezésre álló sávzélesség jobb kihasználását eredményezi a CSMA-hoz képest.

- Megjósolható késleltetés: A TDMA-ban minden csomópont rendelkezik egy rögzített időrésszel, amelyben átvitelre képes, ami kiszámítható késleltetést eredményez. Nem ez a helyzet a CSMA esetében, ahol a késleltetés a csatorna kiszámíthatatlan természete miatt változhat.
- Magasabb energiahatékonyság: A WSN-ekben az energiahatékonyság kritikus szempont. A TDMA lehetővé teszi, hogy a csomópontok aludjanak az inaktív időréseik alatt, ami jelentősen csökkentheti energiafogyasztásukat a CSMA-hoz képest, ahol a csomópontoknak folyamatosan figyelniük kell az átviteli lehetőséget.
- Továbbfejlesztett méretezhetőség: A TDMA jobban méretezhető, mint a CSMA, mivel több csomópontot képes támogatni anélkül, hogy jelentős teljesítménycsökkenést tapasztalna.
- Megnövelt megbízhatóság: A TDMA nagyobb megbízhatóságot biztosít a CSMA-hoz képest, mivel lehetővé teszi az adatok előre meghatározott időpontban történő továbbítását, ahelyett, hogy a csatorna elérhetőségére hagyatkozna.

Bár a TDMA-nak számos előnye van a CSMA-val szemben a vezeték nélküli érzékelőhálózatokban (WSN), van néhány hátránya is:

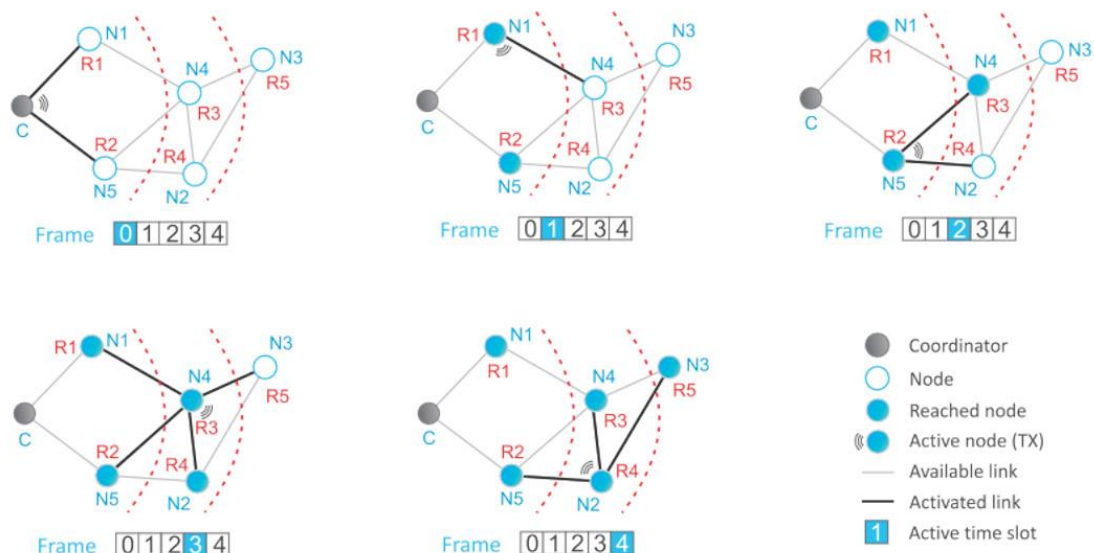
- Komplexitás: A TDMA központi vezérlőt igényel, amely koordinálja az időrések csomópontokhoz való hozzárendelését, ami bonyolultabbá teheti a rendszert.
- Rugalmasság hiánya: A TDMA-ban minden csomópont rendelkezik egy rögzített időrésszel, amelyben átvitelre képes, ami rugalmatlan lehet, ha a csomópont hirtelen nagyobb adatmennyiség átvitelére lenne szükség.
- Korlátozott méretezhetőség: Míg a TDMA jobban skálázható, mint a CSMA, más többszörös hozzáférésű protokollokhoz, például a CDMA-hoz (Code Division Multiple Access) képest korlátozott a méretezhetősége.
- Támadásokkal szembeni sebezhetőség: A TDMA központi vezérlője egyetlen hibapont, amely sebezhetővé teszi a rendszert a támadásokkal szemben. Ha a központi vezérlő sérül, az egész rendszer megszakadhat.

- Korlátozott támogatás Ad-Hoc és mobil eszközök esetén: A kiosztott időréseket gyakran lenne szükséges újra kiosztani.

A TDMA és a CSMA közeghozzáférés előnyeit gyakran ötvözik is vezeték nélküli szövevényes topológiájú szenzorhálózatoknál, első sorban ipari területeken, mint például a WirelessHART vagy az ISA-100 esetén [12][14][15].

3.2. IQRF hálózati réteg - IQMESH szövevényes hálózati topológia

A vezeték nélküli hálózatok topológiája meghatározza a hálózat csomópontjainak, azaz az eszközöknek a fizikai elrendezését és azok közötti kommunikáció módját.



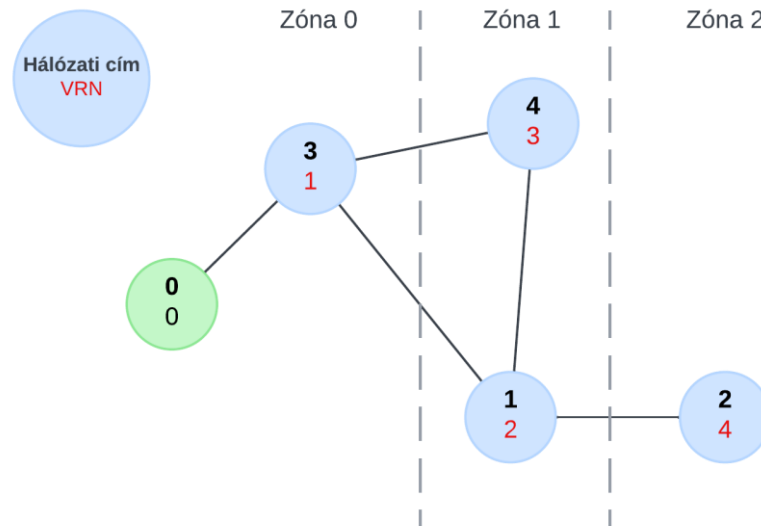
2.ábra IQRF elárasztásos útválasztás lépései a koordinátortól a N3 csomópontig [47]

Az IQMESH irányított elárasztásos útválasztás a TDMA közeghozzáférés tulajdonságaira épít. A kiosztott időréseknek megfelelően egy üzenet fogadása után a csomópontok a saját időrésekben elismételik az általuk kapott üzenetet, ezáltal képes a multi-hop hálózat üzenettovábbításra. Két eszköz közötti hálózati kommunikáció esetén az elárasztásos útvonalválasztás nem optimális megoldás, de a hálózatból gyűjtött adatok használata hatékony megoldás lehet, például az IQMESH hálózatban. Ha egy vezeték nélküli eszköz csak egy útválasztási kapcsolaton keresztül van csatlakoztatva a hálózathoz, a hálózati kommunikáció meghibásodhat, ha ez a kapcsolat megszűnik. Minél

több redundáns kapcsolat van a hálózatban, annál erősebb és stabilabbnak tekinthető. Az elárasztásos útválasztás, bár lassabb útválasztási mechanizmus, nagy sűrűségű útválasztási hálózatokban kiváló robusztusságot és megbízhatóságot nyújt. Az elárasztásos útvonalválasztásban, az optimális útvonal helyett az összes hálózati csomópont megismétli az üzenetet. Ennek eredményeként az elárasztásos útválasztás erős és redundáns útvonalválasztás eredményez, de több erőforrást használ fel az üzenet küldéséhez két pont között, mint amennyi minimálisan elegendő lenne. Az elárasztásos útválasztás használata a TDMA hálózatban erős és redundáns útválasztási protokollt eredményez [31][40][46].

Minden eszköznek a hálózatban egyedi logikai hálózati címet rendelnek hozzá a hálózathoz történő csatlakozás során, amelyet manuálisan vagy automatikusan is el lehet végezni. A TDMA hálózatban minden útválasztási csomópont megismétli a hálózati üzeneteket annak érdekében, hogy az üzeneteket a címzettnek a saját időszávjában továbbítsa. Abban az esetben, ha az eszközök nem megfelelő sorrendben vannak, a hálózati útválasztás nem működhet. Például a logikai hálózati címek használata a hálózati útválasztáshoz az 1. ábrán nem működhet:

- A koordinátor elküldi a kérés üzenetet
- Az 3-as logikai címmel rendelkező csomópont fogadja és megismétli az üzenetet
- Az 1-es és 4-es logikai címmel rendelkező csomópontok fogadják az üzenetet, és a 4-es című csomópont megismétli az üzenetet
- Az 1-es című csomópont nem ismételi meg az üzenetet, mert az N1 számára fenntartott időszávj nem áll rendelkezésre
- Az 2-es című csomópont soha nem kap üzenetet



3. ábra Hálózati példa logikai (felül) és VRN címekkel (alul)

Az IQRF hálózatokban a csomópontokat véletlenszerű sorrendben lehet elhelyezni és a logikai címet nem lehet használni a TDMA időablakok meghatározásához a megfelelő útválasztáshoz. Az IQRF hálózatokban a felfedezési folyamat biztosítja a hálózati útválasztást, amely során a hálózat csomópontjai kapnak egy Virtuális Útválasztási Számot (VRN). A VRN szám jelöli az útválasztási távolságot a hálózati koordinátortól, és meghatározza a csomópontok számára a dedikált időablakot az útválasztás során. A felfedezés során meghatározzák a zónákat is a hálózatban. A zóna száma megadja, hogy hány ugrással lehet elérni a csomópontot a meghatározott zónában. Minden zóna első csomópontja az alacsonyabb logikai címmel rendelkező első csomópont, amely megtalálja az eszközöket a következő zónából [31][31][46].

A virtuális útválasztási sorrend megoldja ezt a problémát. Az IQHMESH hálózatban a DFM (Discovered Full Mesh) útválasztási algoritmus egy virtuális útválasztási struktúrát (VRS) használ. A koordinátor a felfedezési folyamat során minden útválasztási eszközhöz egyedi VRN számokat (Virtual Routing Number) rendel [31][31][46].

A 3. ábra Hálózati példa logikai (felül) és VRN címekkel (alul) egy példát mutat egy statikus hálózatra, ahol a csomópontok logikai hálózati címekkel vannak

ellátva (N1 - N4), majd a discovery folyamat után VRN-k vannak hozzájuk rendelve. A zónák olyan csomópontokat tartalmaznak, amelyek egyforma számú ugrással érhetők el a koordinátortól. A logikai címek a csomópontok címzését szolgálja, míg a VRN számokat az IQMESH használja az útválasztáshoz, hogy biztosítsa a megfelelő időszávokat [31][31][46].

Az IQRF elnevezési rendszerében “discovery”-nek nevezett eljárás egy szélességi keresési algoritmuson alapul. A discovery során a koordinátor megkeresi a hálózathoz csatlakoztatott csomópontokat, hogy egyedi VRN számokat-kat rendeljen hozzájuk a koordinátortól mért útvonal távolság alapján. A koordinátor elkezd keresni a szomszédjait. Az összes kereső üzenetre válaszoló eszköz megkapja a VRN-jét. Az összes olyan csomópont, amely közvetlen kapcsolattal rendelkezik a koordinátorral, a 0. zónához tartozik, közvetlenül elérhetővé téve őket útválasztás nélkül. A koordinátor fokozatosan megkéri az összes 0. zónához tartozó csomópontot, hogy fedezzék fel az első ugrási szomszédjaikat, ezzel létrehozva a 1. zónát, amelyet egy útválasztási ugrás távolából lehet elérni a koordinátortól, amíg már nincsenek további csomópontok felfedezésre [31][39][46].

Az utolsó iteráció után minden felfedezett csomópontnak egyedi VRN-je van. Az 1. ábra mutatja a felfedezési folyamat eredményét. Mivel a legkisebb csomópontszám mindig elsőbbséget élvez a 1. zónában, az 1. csomópont VRN = 2, míg a 3. csomópont VRN = 3. A felfedezés képes megtalálni az összes hálózati eszközt, de mindig olyan gráfot hoz létre, ahol a következő zónában az első csomópont rendelkezik a kisebb logikai címmel. Más szóval a hálózati felfedezés végén nem ismerjük az összes hálózati kapcsolatot a hálózatkoordinátor számára. Például előfordulhat, hogy két eszköz ugyanabban a zónában van, de nem áll fenn közöttük kapcsolat.

Az IQMESH hálózatokban a DFM (Discovered Full Mesh - Felfedezett Teljes Mesh) egy olyan irányított áradási módszert használ, amely korlátozások nélküli és ahol a hop-ok, vagyis ugrások száma egyenlő az útválasztó csomópontok számával. Ez a megközelítés bár lassabb csomagterjedést eredményez, de rendkívül robusztus és megbízható. Különösen a mozgó csomópontokkal való kommunikáció esetében csak a DFM használata lehetséges [31][39][46].

Ezzel szemben a DOM (Discovered Optimized Mesh - Felfedezett Optimalizált Mesh) a DFM-hez hasonló, de az ugrások számát optimalizálja, csökkenti a megcímezett csomópont VRN száma alapján. Ez az optimalizálás lerövidíti a csomagterjedési időt, de ennek következményeként némi kompromisszumot jelent a robusztusság és megbízhatóság terén. A DOM az alapértelmezett üzemmód, amit a DPA (Direct Peripheral Access) protokoll használ [31][39][44][46].

Végül a DRM (Discovered Reduces Mesh - Felfedezett Redukált Mesh), amely a DFM-hez hasonlóan, tovább csökkenti az ugrások számát, de itt az adresszált csomópont zónájában lévő első csomópont VRN-jére koncentrál. A DOM-hoz képest a DRM gyorsabb továbbítást tesz lehetővé és még tovább csökkenti a redundanciát, így hatékonyabb megoldást nyújtva az adattovábbításban [31][39][46].

Az IQMESH hálózatban a felfedezési folyamat során a VRN címeket azért rendelik hozzá, hogy biztosítsák a megfelelő kommunikációt a megfelelő időszámban, de a koordinátornak nincs információja az összes hálózati kapcsolatról. A discovery információt nyújt a következőkről:

- Felfedezett csomópontok listája: csomópontok VRN száma
- A zóna, ahol a csomópont található
- Az első csomópont a zónában vagy a szülő csomópont (parent node)

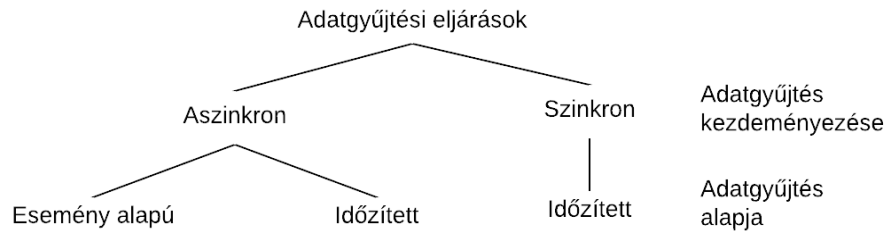
A zóna és a szülő csomópont a DRM módszerben használatos. Sok esetben az adatátvitel sebességének optimalizálása hasznos lehet az ugrásszám csökkentésével az útválasztás során, de ez természetesen csökkenti a hálózat redundanciáját, mert minden zónában csak egy csomópont továbbítja az üzeneteket, és az elárasztásos útválasztásban nincs olyan megoldás, amely biztosítaná az adatátvitelt két eszköz között, mint például a CSMA/CA módszer esetén. A DRM módszer optimalizálja az ugrásszámot azzal az információval, hogy melyik zónában található a címzett, és csak a zóna első csomópontjai, a szülő csomópontok vesznek részt az üzenetek továbbításában.

3.3. IQRF alkalmazási réteg - IQRF DPA

Az IQRF DPA (Direct Peripheral Access - Közvetlen Periféria Hozzáférés) alkalmazás réteg protokoll támogatást nyújt az IQRF hálózatok számára [44]. Bár opcionális, az IQMESH hálózatok esetében ez egy kész, használatra kész plug-in formájában érhető el, amelyet az alkalmazási program helyett a rádiós modulba tölthettek fel. A DPA keretrendszer egy további protokollt vezet be az IQMESH felett, amely elősegíti a hálózati kommunikációt és lehetővé teszi a hálózati eszközök szolgáltatásainak és perifériáinak irányítását. Általában a hálózati topológia szövevényes, bár ritkán csillag is lehet (ahol minden csomópont közvetlen rádiós hatótávolságon belül van a koordinátorral). A hálózat kezelése kérések küldésével és válaszok fogadásával történik, vagy egy standard vezetékes interfészen (UART vagy SPI) keresztül [46].

4. ADATGYŰJTÉS A SZENZORHÁLÓZATBÓL

A vezeték nélküli szenzorhálózatok fő célja, hogy a szenzorok által mért adatok begyűjtésre kerüljenek, majd ezeket továbbítsák feldolgozásra. A TDMA szenzorhálózatok esetében több megoldás létezik a szenzoradatok begyűjtésére, az adatok begyűjtése történhet szinkron és aszinkron kommunikációs módon a központi adatgyűjtő eszköz és a szenzorok között. A szinkron kommunikáció során a központi adatgyűjtő eszköz kezdeményezi a kapcsolatfelvételt a szenzorokkal, és a kommunikáció a kérés-válasz paradigmájában zajlik, ami meghatározott sorrendben és időzítéssel történik. Ez azt jelenti, hogy a központi eszköz felkéri a szenzorokat az adatok elküldésére, és a szenzorok időzített és pontos ütemezés szerint válaszolnak a kérésekre. Ez a módszer lehetővé teszi a kommunikáció hatékonyabb szervezését és a szenzoradatok megbízható és időbeni begyűjtését a hálózatban [6][7][8].



4. ábra Adatgyűjtési eljárások ideje a hálózati elemszám függvényében

Az aszinkron megoldásokban az érzékelők, események hatására kezdeményezik az adatküldést. Az aszinkronitás a hálózat többi részéhez viszonyítva jelenik meg. Mivel több szenzor is küldhet egyszerre adatot ez által csomagütközések léphetnek fel a hálózatban. A hálózatokban az időrések kiosztásával garantálható a csomagütközések elkerülése. Az időrések biztosítják, hogy a hálózati csomópontok ne küldjenek egyszerre üzeneteket, így minimalizálva a csomagütközéseket.

4.1. Szinkron adatgyűjtés

Ebben a megoldásban a kommunikáció központosított, és a vezeték nélküli hálózat koordinátora kezdeményezi mindig az adatgyűjtést. Az érzékelő csomópontoknak nincs szükségük további szinkronizálásra a kommunikáció kezdeményezéséhez, mivel mindig a koordinátor kezdeményezi a kommunikációt. Ez egyszerűbb megoldást jelenthet a szinkronizációs problémák elkerülése érdekében. A szinkron adatgyűjtés esetén nem szükséges szuperciklus, mivel minden kommunikációt egy eszköz kezdeményez, és ennek megfelelően kerül időzítésre az időrések alkalmazása. Mindkét megoldásnak megvannak az előnyei és a korlátjai. A szensorhálózat hatékony működéséhez az alkalmazás környezetétől és igényeitől függően választhatóak ki a legmegfelelőbb módszerek [6][7].

A szinkron adatgyűjtés kérés-válasz mintázatra épül, így minden csomagküldést egy szinkronizáló üzenet kezdeményez. Ez a megközelítés fogyasztásnövekedéssel járhat, ugyanakkor biztosítja a hálózati szinkronizációt. A központosított adatgyűjtés egyszerűbb megoldást kínálhat a szinkronizációs nehézségek elkerülése érdekében. Az elárasztásos útválasztás során a hálózati csomópontok újra és újra elküldik az üzenetet.

Az üzenet több ugráson keresztül jut el a címzettig. Az elárasztásos útválasztás lassú, de robosztus és megbízható útválasztási mechanizmust eredményez magas sűrűségű útválasztási hálózati eszközök esetén [6][7].

A központosított adatgyűjtési módszereket - lekérdezés, szinkronizált válaszküldés és az összevont adatgyűjtés - különböző szempontok alapján lehetséges összehasonlítani. A különböző adatgyűjtési módszereket az alábbi szempontok alapján hasonlítottam össze:

1. Adatgyűjtés időtartama: Mennyi időre van szükség a teljes adatgyűjtési folyamat befejezéséhez az adott módszer alkalmazásakor.
2. Átviteli adatmennyiség készülékenként: Milyen mértékű adatforgalmat generál az egyes csomópontok között az adatgyűjtés folyamata.
3. Egyidejű mintavételezés: Lehetőség van-e több csomópont által egyszerre történő mintavételezésre, vagy csak egyenként lehet begyűjteni az adatokat.

Ezek a szempontok segítenek a különböző módszerek hatékonyságának és alkalmazhatóságának megértésében, és az optimális módszer kiválasztása az adott szenzorhálózat specifikus igényeinek és környezetének figyelembevételével történhet.

4.1.1. Egyszerű lekérdezés

Az adatgyűjtés egyszerű lekérdezéssel (polling) való megoldása egy nyilvánvaló módszer a szenzorhálózatban mért adatok begyűjtésére. Ebben a módszerben a központi adatgyűjtő eszköz egyenként kérdezi le a hálózati csomópontokat az általuk mért adatokkal kapcsolatban. Ez a lekérdező üzenet unicast módon érkezik minden egyes csomóponthoz, azaz minden egyes lekérdezés esetén csak egy címzett van. A lekérdezés során a teljes üzenet mérete felhasználható. A lekérdezés pontosan megadja, hogy az adott csomópont milyen adatokkal rendelkezik, és ezeket az adatokat válaszként visszaküldi a koordinátornak. Ez a módszer megbízható és pontos adatgyűjtést tesz lehetővé, mivel minden csomópont egyenként válaszol, és a lekérdezés tartalmazza az adatokhoz szükséges információkat. Azonban a gyakori lekérdezések a szenzorok energia felhasználásának növekedésével járhat, különösen, ha a hálózat nagy elemszámú. A hatékonyság érdekében az üzenetek méretét, az időzítést és a lekérdezés gyakoriságát is

optimalizálni kell a szenzorhálózat adott környezetének és igényeinek megfelelően [32][S1].

4.1.2. Szinkronizált válaszüzenet

A lekérdezés alapú adatgyűjtés során a hálózati koordinátor ugyanazt a kérést tartalmazó üzenetet minden egyes csomópont elküldi egymást követően. Azonban egy optimalizációs lehetőség, hogy a csomópontok adatainak lekérése egy broadcast-üzenet segítségével történhet. Ennek a módszernek a lényege, hogy a koordinátor egyetlen broadcast-üzenetet küld, amelyet az összes csomópont megkap. Miután a legtávolabbi csomópont is megkapta a broadcast üzenetet, a csomópontok elkezdik elküldeni a választ a koordinátornak. Azonban a további csomópontoknak meg kell várniuk, amíg a magasabb című csomópontok befejezik a válaszüzenetek továbbítását a hálózatban. Ez azért szükséges, mert a válaszüzenetek mielőtt eljutnának a koordinátorhoz először az alsóbb szintű csomópontokon kell áthaladjanak. A csomópontok az időrés (time slot) hosszából és saját címükből képesek kiszámolni a szükséges várakozási időt. Ez a módszer lehetővé teszi az egyszerre történő mintavételezést a broadcast-üzenetből származó szinkronizáció segítségével, így hatékonyan tudják begyűjteni az adatokat a különböző csomópontoktól [32][S1].

4.1.3. Összefűzött adatgyűjtés

Az elárasztásos útválasztás megbízható sűrű hálózatok esetén robosztus adatküldést tesz lehetővé, de két csomópont közötti kommunikáció esetén nem hatékony útválasztási stratégia. Az összefűzött adatgyűjtési módszer kihasználja az elárasztásos útválasztás előnyeit a TDMA mesh hálózatokban. Az alapötlet az, hogy a mért szenzorértékek egyetlen válaszüzenetben érkezzenek meg a koordinátor részére. Ez a módszer akkor működik a legjobban, ha kis mennyiségű adatot kell gyűjteni minden egyes csomópontból. Az üzenet mérete a szenzoradatokat gyűjtő csomópontok számától függ [32].

Az összefűzött adatgyűjtés (Merged Data Collecting - MDC) koncepciója az, hogy a mért szenzorértékek elküldése egy válasz üzenetben történik, mint válasz a kérésre [32]. Ez a módszer viszont csak akkor alkalmazható, ha kis mennyiségű adatot kell

összegyűjteni. A lekérdezhető adatok mérete attól függ, hogy hány csomópont gyűjti az adatokat. Ez a módszer egy kérés broadcast-üzenettel kezdődik. Miután a broadcast-üzenet kérést az utolsó csomópont fogadja, az továbbítja a lekérdezett adatot a válasz üzenetet a saját időrészében. A további csomópontok folytatják a szenzoradat továbbítását a saját időrészükben, ahogyan az az elárasztásos útválasztásnál történik. A válaszüzenet továbbítása során a csomópontok nem csak egyszerűen továbbítják az üzeneteket, hanem azokat összefűzik a kapott üzenet tartalmával, és a saját adatait a válasz üzenetben a címének megfelelő helyre elhelyezik. Amikor a koordinátor megkapja az utolsó üzenetet és összefűzi, akkor a szenzorok mérési adatai megtalálhatók az üzenet tartalmában az megfelelő pozíciókban.

Az IQRF Fast Response Command (FRC) az IQRF OS-ben implementált módszer az MDC összefűzött adatgyűjtés algoritmushoz képest tartalmaz egy további üzenetküldést. Mielőtt a válasz üzenet továbbításra kerülne a hálózatban, minden csomópont elküldi a saját adatait egy egyszerű üzenetszórásos, nem hálózati üzenettel a szomszédos eszközök számára. Ezzel az adatküldéssel minden szomszéd megkapja a csomópont adatait. Ez a további, nem hálózati csomag a nem adattovábbító eszközök támogatására szolgál, amelyeknek nincs VRN száma. Ez a csomag a logikai címek alapján meghatározott időrészekben kerül elküldésre, mivel ebben részt vehetnek olyan eszközök is, amelyek nem rendelkeznek VRN számmal. Egy teljesen feltérképezett hálózatban ez a válaszok továbbításának ismétlődését eredményezi, és adatainak megbízhatóságát képes javítani [32][44][S1].

Az FRC adatgyűjtési módszer az alábbi három lépésből áll:

- Kérés broadcast-üzenet küldése
- Individual phase – Szomszédos adatmegosztás
- Adatgyűjtés - Válasz üzenet

Az összevont adatgyűjtés lehetővé teszi az egyszerre történő mintavételezést, hasonlóan a szinkronizált közvetített válasz módszerhez. A mintavételezett szenzoradatok ugyanabban az üzenetterhelésben érkeznek, ami egyszerűsítheti a további feldolgozást.

4.2. Az adatgyűjtési módszerek összehasonlítása időtartam szerint

4.2.1. Egyszerű lekérdezés

Az egyszerű lekérdezés a korábban ismertettek szerint, a hálózati elemek egyenként történő megszólításával gyűjti be az adatokat. Az eljárás teljes ideje meghatározható az alábbiak alapján:

$$t_d = N[N(t_{\text{req}} + t_{\text{resp}}) + t_{\text{proc}}] \quad (1)$$

ahol t_{req} a kérés üzenethez tartozó időrés időtartama, t_{resp} a válasz időrés értéke, t_{proc} pedig a szenzorcsomópont feldolgozási ideje, N pedig a hálózati csomópontok száma a hálózatban. A lekérdezéses módszer az elárasztásos útválasztás miatt $O(N^2)$ típusú, ami azt jelenti, hogy az adatgyűjtés ideje négyzetesen nő a hálózati csomópontok számával (N) arányosan. Mivel minden csomópontot külön-külön kell lekérdezni, a lekérdezéses módszer hatékonysága csökken, ahogy nő a csomópontok száma. Nagyobb szenzorhálózatok esetén ez a módszer időigényessé válhat [32][46][S1].

4.2.2. Szinkronizált válaszüzenet

Szinkronizált válasz üzenet módszer esetén a kérés broadcast-üzenetet egyszer kapja meg minden eszköz, amire válaszként küldik el az eszközök egymást követően, a sorrendben megelőző eszközök adattovábbítását megvárva. Az adatgyűjtés teljes időtartama az alábbiak szerint határozható meg:

$$t_d = N(t_{\text{req}}) + (t_{\text{resp}})[(N + 1)N / 2] + t_{\text{proc}} \quad (2)$$

A szinkronizált válaszüzenet módszer $O(N^2)$ típusú, hasonlóan a lekérdezéses módszerhez. Ez azt jelenti, hogy a teljes lekérdezési idő nagysága függ a csomópontok számától (N), és mindkét módszer esetében az idő szükséglet négyzetesen növekszik a csomópontok számával. Azonban a csökkentett kérés mennyisége az adatgyűjtés időtartamát csökkenti a szinkronizált válaszüzenet módszer esetében. Ez azért lehetséges, mert a broadcast-üzenet segítségével egyetlen üzenettel érhető el, hogy az összes csomópont egyidejűleg kérje le az adatokat. Ez a módszer csökkenti az adatgyűjtés időtartamát, mivel a kommunikációs overhead (többletköltség) csökken, és nem kell a

kéréseknek egymás után történő elküldésére várni. A szinkronizált válaszüzenet módszer a lekérdezéses módszerrel azonos aszimptotikus futási időtípusú ($O(N^2)$), de azáltal, hogy kevesebb kérést használ, hatékonyabban tudja begyűjteni az adatokat a különböző csomópontoktól, így csökkenti az adatgyűjtés teljes időtartamát [32][46][S1].

4.2.3. Összefűzött adatgyűjtés

Az összefűzött adatgyűjtés (MDC) időtartama a kérés broadcast-üzenet továbbításából és a szenoradatokkal összefűzött válaszból adódik. Az összevont adatgyűjtés időtartama a következő (3) képlet szerint számítható:

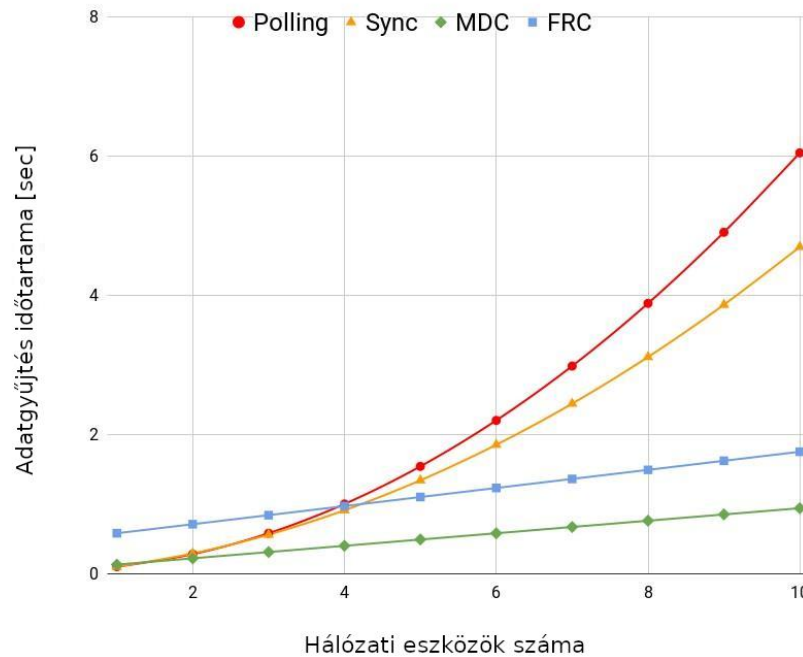
$$t_d = N(t_{\text{req}} + t_{\text{MDCresp}}) + t_{\text{proc}} \quad (3)$$

ahol t_{MDCresp} a válaszcsoomag továbbításához szükséges időrés hossza. Az összevont adatgyűjtés módszere $O(N)$ típusú. Az FRC-vel, azaz az egy további szomszédos adatküldéssel történő adatgyűjtés hosszabb időtartammal rendelkezik az összevont adatgyűjtésnél. Az FRC adatgyűjtés időtartama egy teljesen felfedezett hálózatban [8] a következő képlet szerint:

$$t_d = N \cdot t_{\text{req}} + t_{\text{FRCresp}}(N+2) + t_{\text{proc}} + t_{\text{Cproc}} \quad (4)$$

ahol t_{Cproc} az összegyűjtött adatok utófeldolgozási ideje a koordinátorban, és t_{FRCresp} a válasz üzenet továbbításakor alkalmazott időrés [32][46][S1].

A 5. ábra mutatja az adatgyűjtés időtartamát egy bájt esetén a különböző módszerekkel 10 elemű hálózati méretig. Az ábrán jól látható, hogy az MDC rendelkezik a legrövidebb időtartammal minden hálózatban. Az FRC gyorsabb a lekérdezéses vagy a szinkronizált közvetített válasz módszernél olyan hálózatokban, amelyekben négynél több csomópont van. Az időzítések meghatározásához az IQRF specifikációt vettem alapul.



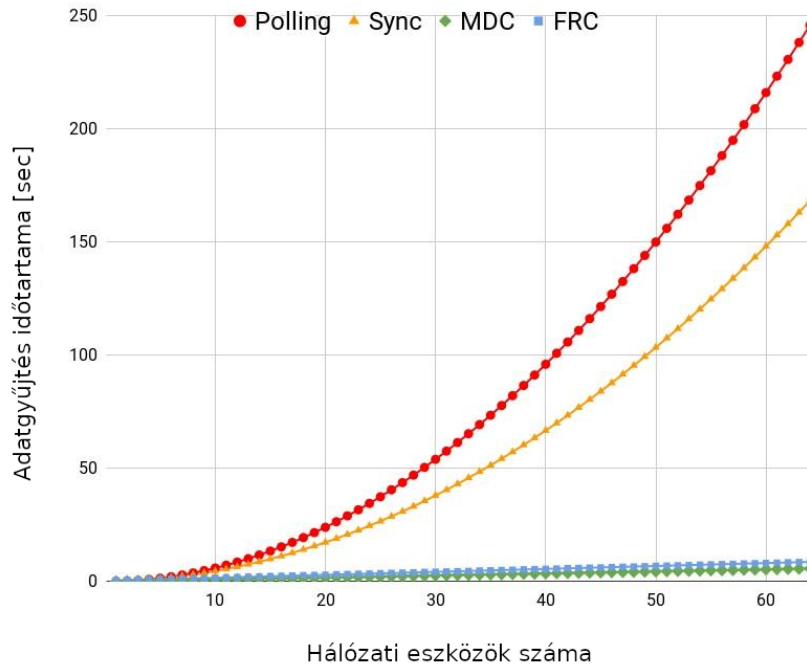
5. ábra Egy bájt adatgyűjtési időtartama különböző módszerekkel 10 csomópontig [S1]

A 6. ábra a különböző adatgyűjtési módszerek időtartamát hasonlítja össze egy bájt esetén, különböző csomópontszámok mellett 64 elemű hálózati méretig. Az eredmények azt mutatják, hogy az adatgyűjtés időtartama jelentősen eltér a különböző módszerek között:

- Lekérdezéses módszer: A lekérdezéses módszerrel 64 szenzorcsomópontot tartalmazó hálózatban az adatgyűjtés időtartama 245,81 másodperc.
- Szinkronizált közvetített válasz módszer: Ezzel a módszerrel az adatgyűjtés időtartama 168,32 másodperc.
- Összevont adatgyűjtés (MDC): Az MDC-vel történő adatgyűjtés rendkívül gyors, mindössze 5,81 másodperc alatt lezajlik.
- IQRF Fast Response Command (FRC): Az FRC módszer még a MDC-nél is gyorsabb, mindössze 8,78 másodperc szükséges az adatgyűjtéshez.

Az eredmények azt mutatják, hogy az összefűzött adatgyűjtés a legrövidebb időtartamot eredményezi, de megbízhatósága alacsonyabb az FRC-nél. Az FRC esetében

az adatgyűjtési idő még mindig alacsony, és egy 64 csomópontos hálózatban csak körülbelül 3 másodperc a különbség az összevont adatgyűjtéshez képest.



6. ábra Egy bájt adatgyűjtési időtartama különböző módszerekkel 64 csomópontig [S1]

4.3. Az adatgyűjtési módszerek összehasonlítása csomagküldések eloszlása szerint

Az adatgyűjtési módszerek hatással vannak a vezeték nélküli hálózatban lévő útválasztó eszközök közötti csomagátvitel eloszlására. Az adatátvitel különösen magas energiafogyasztást jelent a vezeték nélküli eszközök számára [8]. Ha azt feltételezzük, hogy a szenzorcsomópontok azonos típusúak, akkor a csomagátvitel számának eloszlása csomópontonként az energiafogyasztás eloszlásaként értelmezhető a szenzorhálózatban. Az egyenlőtlen csomagátviteli eloszlás alacsonyabb elem-élettartamhoz is vezethet. Azok a szenzorcsomópontok, amelyek több csomagátvitelt végeznek, hamarabb lemerülhetnek, és használhatatlanná válhatnak. Emellett a hálózat többi része is negatív hatást tapasztalhat a hiányzó útválasztó eszközök miatt, mivel azok nélkül a hálózat egyes területei kieshetnek, vagy nehezen elérhetővé válhatnak. Az adatgyűjtési módszerek esetén fontos a megfelelő csomagküldések számának eloszlása az egész

szenzorhálózatban, ezáltal hosszabb elem élettartam érhető el, és javulhat a hálózati stabilitása [32][46][S1].

4.3.1. Egyszerű lekérdezés

A lekérdezéses módszer egy olyan adatgyűjtési módszer, amelyben a csomópontok kéréseket küldenek a koordinátornak, és a koordinátor válaszokat küld a csomópontoknak. A csomópontok közötti csomagátvitel száma magasabb azoknál a csomópontoknál, amelyek alacsonyabb VRN számmal rendelkeznek, és amelyek közelebb vannak a koordinátorhoz. Egy adott csomópontnak a hálózatban saját válaszcsoportot és útválasztott csomagokat kell továbbítania. Az útválasztás során az adott csomópontnak két esetben kell továbbítania:

- Amikor egy olyan csomóponttól érkezik lekérdezés, amely magasabb VRN-el rendelkezik.
- Amikor a saját válaszcsoportjukat továbbítják, válaszul a kérésre.

Az egyes csomópontok által végzett továbbítások száma az útválasztás során a lekérdezéses módszerben a hálózatban a következő képlettel adható meg:

$$k_n = 2(N - n) + 1 \quad (5)$$

ahol N a csomópontok száma, n pedig a csomópont távolsága a koordinátortól. Ez azt jelenti, hogy a koordinátorhoz legközelebbi csomópontnak 1 továbbítást kell végrehajtania, a második legközelebbi csomópontnak 2 továbbítást kell végrehajtania, és így tovább. Ezen módszerben az eloszlás egyenlőtlen, az alacsonyabb VRN számmal rendelkező eszközöknek többször kell továbbítaniuk, mint a magasabb számmal rendelkezőknek. Ez azért van, mert az alacsonyabb VRN számmal rendelkező eszközök közelebb vannak a koordinátorhoz, és ezért több lekérdezést kell továbbítaniuk [32][46][S1].

4.3.2. Szinkronizált válaszüzenet

A szinkronizált válaszüzenet módszerben az adott csomópontnak a hálózatban továbbítania kell az útválasztás során a közvetített és a magasabb virtuális hálózati

címmel (VRN) rendelkező csomópontok válaszcsoomagjait is. Az útválasztó eszközök által végzett továbbítások számát az alábbiak alapján határozható meg:

$$k_n = (N - n) + 2 \quad (6)$$

ahol N a csomópontok száma, n pedig a csomópont távolsága a koordinátortól. Ez az üzenetismétlési eloszlás jobb, mint amit a lekérdezéses módszer esetében tapasztalunk, de az eloszlás jellegében hasonló marad [32][46][S1].

4.3.3. Összefűzött adatgyűjtés

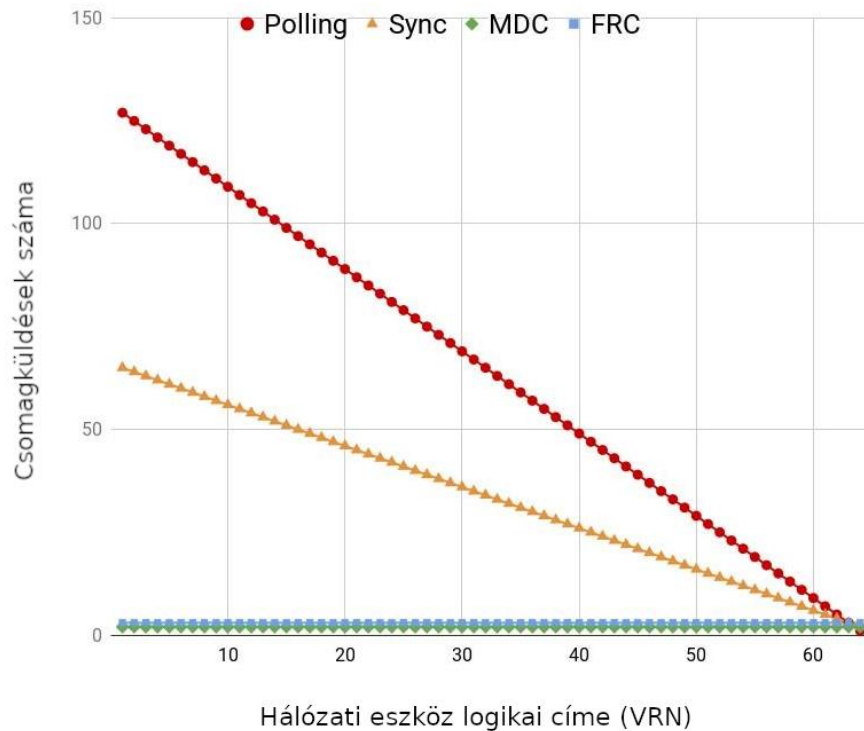
Az összefűzött adatgyűjtés módszerében a csomópontok akkor továbbítanak csomagokat, amikor a magasabb VRN számmal rendelkező eszközökhöz irányítanak és amikor saját szenzoradatukat küldik. Minden csomópont a hálózatban csak kétszer továbbít, a következő szerint:

$$k_n = 2 \quad (7)$$

Az IQRF FRC-vel, azaz az további nem útválasztott csomagküldéssel három továbbítás történik csomópontonként az adatgyűjtés során:

$$k_n = 3 \quad (8)$$

Az 7. ábra mutatja a csomópontonkénti továbbítások számát különböző adatgyűjtési módszerek esetén egy 64 csomópontos hálózatban. Az MDC és az FRC jobb eredményeket mutatnak a továbbítások száma terén, mint a többi módszer. A lekérdezéses és a szinkronizált válasz üzenet módszer esetében hasonló a továbbítások számának eloszlása a hálózatban. Azok a csomópontok, amelyek közelebb vannak a koordinátorhoz, többször továbbítanak, mint a távolabbiak. Ennek eredményeként a koordinátorhoz közelebbi csomópontok nagyobb energiafogyasztással rendelkeznek, mivel nagyobb terhelést kell elviselniük az adatátvitel során [32][46][S1].



7. ábra Az átvitelek számának eloszlása különböző adatgyűjtési módok szerint egy 64 csomópontos hálózatba [S1]

Az egyenlőtlen eloszlás a lekérdezéses és a szinkronizált közvetített válasz módszerben különösen kritikus lehet, mert a legrosszabb esetben az adott csomópontok közelebbi részei használhatatlanná válhatnak. Ennek eredményeként a használhatatlan csomópontok nem képesek továbbítani a hálózat többi részének csomagjait, ami komoly problémákat okozhat a hálózat működésében és stabilitásában.

Azonban az MDC és az FRC módszerek esetén kiegyenlített továbbítási eloszlás van a hálózatban. Ez azt jelenti, hogy az adatátvitel terhelése egyenletesen oszlik el a csomópontok között. Ennek eredményeként az MDC és az FRC módszereknél az energiafogyasztás azonos típusú eszközök esetén azonos lehet, és a csomópontok élettartama jobban megőrizhető.

A hálózati eszközök hatékonyabb és kiegyensúlyozottabb működésének elérése érdekében fontos a megfelelő adatgyűjtési módszer kiválasztása, amely minimalizálja az

energiafogyasztást és optimálisan osztja el az adatátvitelt a hálózaton. Az egyenlő továbbítási eloszlás jelentős előnyökkel jár a hálózat stabilitása, megbízhatósága és energiahatékonysága szempontjából [S1].

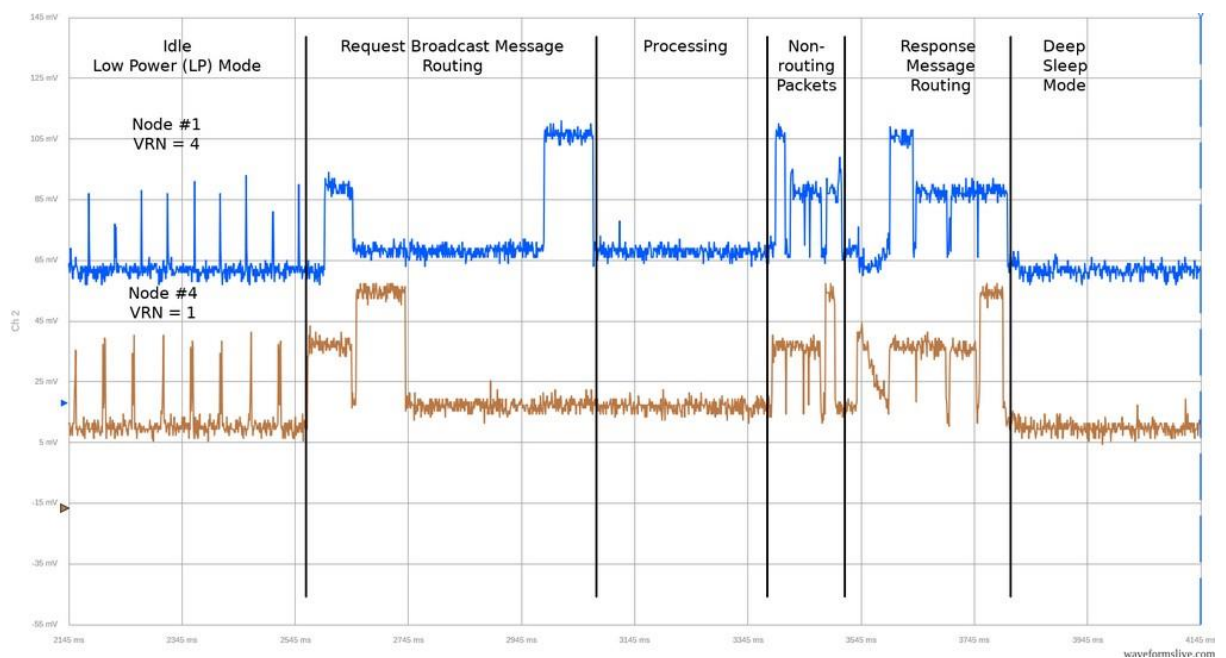
5. Elemélettartam meghatározása az összefűzött adatgyűjtési eljárásoknál

Az elem élettartamának meghatározása a vezeték nélküli hálózatokban alapvető fontosságú. Az elemek lemerülése esetén nem csak az adott szenzorok válnak működésképtelenné, hanem a multi-hop szövevényes hálózatból adódóan akár nagyobb hálózatrészek is. A pontos elemélettartam becslése kulcsfontosságú a terepen történő alkalmazásokban a tervezett karbantartási időszakok meghatározásához, azért, hogy az elemek lemerüléséből adódó hálózati hibák elkerülhetőek legyenek. A vezeték nélküli szenzorok energiafelhasználásának meghatározásával lehetséges az elem élettartamának becslése. Több tanulmányban is tárgyalták az energiafogyasztást becslést hasonló hálózatok esetén [84]-[88][89], de az IQRF hálózatokhoz még nem készült hasonló. A korábbiakban bemutatott összefűzött adatgyűjtés más módszerekhez képest jelentős mértékben adott gyorsabb megoldást az adatok begyűjtésére, ezért továbbiakban e módszer vizsgálatával foglalkozok. Az elem élettartam becslése az energiafelhasználás mérésén alapszik a szenzor csomópontok különböző működési fázisaiban. A vizsgált eszközökben lítium-thionil-klorid (Li/SOCl₂) elemek kerülnek alkalmazásra, mivel széles körben terjedtek el a vezeték nélküli alkalmazásokban. Az elem élettartam becslésének alapja a szenzor energiafelhasználása és egy valós elem modellje. Az egyes kommunikációs eszközök energiafelhasználásnak meghatározása a különböző működési fázisokban teljesítményméréseken alapult.

5.1. Szenzorok energiafogyasztása vezeték nélküli szensorhálózatokban összefűzött adatgyűjtési módszerrel

A szenzorok elem élettartamának becslésének érdekében először meg kellett határozni az energiaköltségeket az összefűzött adatbegyűjtés egyes fázisaiban. Ennek céljából az FRC módszert veszem alapul, mivel az MDC energiaköltsége az FRC alapján meghatározható a szomszédos adatmegosztás fázis eltávolításával. Az

energiaköltségbecslés egyszerűsítése érdekében a vezeték nélküli szenzorok alacsony szintű fizikai modelljét valós teljesítménymerésen alapuló energiaköltségekkel helyettesítettük. A vezeték nélküli szensorhálózatokban a hálózati kommunikációhoz hasonló magas szintű működést befolyásoló tényezők jelentős hatással vannak az energiaköltségre. A szenzorcsomópontok kommunikációs ciklusát a 8. ábra látható szenzorok teljesítménye felvételi diagramján látható, jól meghatározott fázisokra lehet felosztani.



8. ábra Szensorokon mért áramfelvétele az 1. és 4. csomópontok fázisaira [14] osztva az FRC adatgyűjtési módszer során

A fázisok a következők, amelyek részletesen kifejtésre kerülnek:

- Vételi üzemmód (Idle)
- Kérés broadcast-üzenet továbbítása (Request Broadcast Message Routing)
- Feldolgozás: szenzorértékek olvasása (Processing: reading sensor values)
- Szomszédos adatmegosztási üzenet küldése (Sending non-routing packets)
- Válaszüzenet továbbítás (Response message routing)
- Mélyalvás (Deep sleep)

Az üzenet fogadása a készenléti *Idle* állapotból indul. Az *Idle* állapotban az rádió modul ellenőrzi a rádiójel jelenlétét. A 8. ábra látható *Idle* állapot az IQRF technológiában implementált csökkentett energiafelhasználású Low Power (LP-RX) üzemmód. A rádiós eszközök energiafelhasználásnak csökkentése érdekében nem folyamatosan tartózkodnak vételi üzemmódban, hanem meghatározott periódussal próbálkozik csak üzenetet fogadni és a köztes időben a rádiós modul kikapcsolásra kerül. Erre oly módon van lehetőség, hogy üzenetküldés LP módban egy hosszabb preambulummal indul, amelynek hossza hosszabb, mint a vételi periódus. Ha az eszköz észlelhető adást érzékel, akkor megpróbál egy érvényes üzenetet fogadni. Érvényes üzenet fogadásakor az üzenet fejlécében található időrések számának megfelelő ideig várakoznak, garantálva a hálózati csomagküldés idejét megvárva. Ezt követően történhet meg a szenzor adatok feldolgozása és előkészítése küldésre a *Processing* fázisban.

Az FRC következő fázisában a csomópontok az adatokat küldik a megfelelő időablakban. Ebben a fázisban minden csomópontnak vételi módban kell maradnia, amíg az összes csomópont elküldi az adatait a szomszédos eszközöknek. Ez fontos annak érdekében, hogy minden szomszédos szenzor adatát fogadni tudják. A csomópontok fogadják és összevonják a kapott üzenetek tartalmát, majd saját adatait helyezik el az üzenet megfelelő helyére a hálózati címük alapján. Miután minden csomópont elküldte a szomszédos csomagot, az utolsó csomópont felől elkezdik küldeni az összevont üzeneteket. A hálózati csomópontok az üzenetet az adatközpont felé irányítják. Minden csomópont összevonja az üzeneteket az üzenet továbbküldése előtt. Ennek eredményeként, amikor a koordinátor megkapja az utolsó csomagot és összevonja, minden szenzor mérési adata megtalálható lesz az üzenetben hálózati eszközök megfelelő helyén. Az FRC közbenső adatküldés a nem útválasztó eszközök támogatására szolgál, amelyeknek nincs VRN számuk. Ez a nem útválasztott csomag logikai címek szerinti időablakban kerül elküldésre a csomópontok részéről. Egy teljesen felfedezett hálózatban ez az üzenetek továbbításának depilációjához vezet, és adataink gyűjtésének megbízhatóságának javítására is szolgálhat.

E_{total}	Hálózati eszköz teljes energiafelhasználása
E_{FRC}	FRC adatgyűjtési ciklus energiafelhasználása
E_{idle}	Vételi mód energiafelhasználása
$E_{request}$	Kérés broadcast-üzenet továbbítás energiafelhasználása
E_{proc}	Adatfeldolgozási folyamat energiafelhasználása
E_{beacon}	Non-routing üzenetküldés energiafelhasználása
$E_{response}$	Válaszüzenet küldésének energiafelhasználása
E_{dsleep}	Mélyalvó üzemmód energiafelhasználása
U	Rendszerfeszültség
I_{Rx}	Vételi üzemmód áramfelvétele
I_{Tx}	Üzenetküldés áramfelvétele (maximális kimeneti teljesítményen)
I_{LP}	Vételi üzemmód áramfelvétele
N	Hálózati elemek száma
n_r	Adatgyűjtési ciklusok száma periódusonként
t_{req}	Kérés üzenet küldésekor használt időrés időtartama
t_{resp}	Válaszüzenet küldésekor használt időrés időtartama
t_p	Szinkronizációs preambulum időtartama
t_{proc}	Adatfeldolgozás időtartama
t_{dsleep}	Mélyalvó mód időtartama
t_{qsleep}	Alvási időtartam kvantum (2.097s az IQRF esetén)
t_{period}	Adatgyűjtési periódusidő
t_{FRC}	FRC adatgyűjtés időtartama
t_{idle}	FRC adatgyűjtés előtti vételi mód időtartama
t_{bc}	Non-routing üzenet időtartama
t_{bcw}	Non-routing üzenetküldést követő adásszünet időtartama

2. táblázat Az energiafogyasztási modellben használt jelölések

Ahogy az a 8. ábra is látható minden kommunikációs mód más energiateljesítményfelhasználással jár. Az üzenettovábbítások száma függ az adatgyűjtési módszertől és a hálózati elemek számától. Az ábrán az FRC adatgyűjtés folyamata követhető végig az IQRF DCTR-7x sorozat áramfelvételén. A modulok 3,6V tápellátásról működve az alábbi áramfelvételi értékekkel rendelkeznek:

- Aktív vételi mód: 11,8mA
- Adás: 21,5mA
- LP Idle átlag: 236nA

Mélyalvó állapot: 56nA

A vételi üzemmódban lévő csomópontok képesek fogadni beérkező üzeneteket. A kérésüzenet fogadása után a csomópontok a saját időzésükben elismétlik az általuk kapott üzenetet. Az egyes csomópontok időzései az eszközök VRN címeivel egyeznek meg. Ezzel a módszerrel alakul ki az elárasztásos útválasztás, amely biztosítja, hogy minden csomópont megkapja az üzenetet a hálózatban.

A mélyalvás módot használó összefűzött adatgyűjtés alkalmazása esetén egy szenzor teljes energiateljesítményfelhasználása meghatározható az alábbiak szerint:

$$E_{total} = n_r E_{FRC} + E_{dsleep} \quad (9)$$

A FRC módszerrel történő összefűzött adatgyűjtés össz-energiateljesítményfelhasználása kiszámítható, mint az egyes fázisokban mért energiateljesítményfelhasználás összegeként:

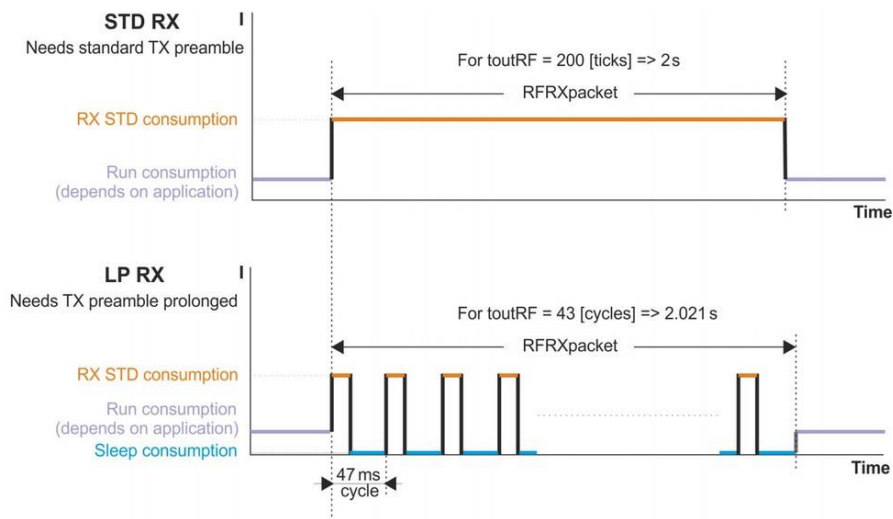
$$E_{FRC} = E_{idle} + E_{request} + E_{proc} + E_{beacon} + E_{response} \quad (10)$$

A szenzor tápegység áramköre közösen használható a szenzor egyes komponensei között és a rendszer feszültségintje a lítium-thionil-klorid elemek kisülési jellemzőitől és a szenzor csomópontban alkalmazott feszültség szabályozótól függ [46][51][54][55].

5.1.1. Vételi üzemmód

Vételi (idle) üzemmódban a szenzorcsomópontok arra várnak, hogy bármilyen hálózati csomagot fogadjanak. A normál vételi üzemmóddhoz képest az IQRF technológia LP-RX (Low Power Receive - Alacsony Fogyasztású Vétel) üzemmódban a teljesítményfelhasználás zajmentes RF környezetben mindössze körülbelül két százaléka

a folyamatos vételi üzemmódhoz képest. Ami jelentős energiamegtakarítást eredményezhet az elemmel működő eszközök esetében. Az LP RX mód csökkentheti az energiafelhasználást a vételi mód rendszeres kikapcsolásával és az adó-vevő modul kikapcsolásával. A periódusidő 47 ms, ahogy azt a 9. ábra mutatja. Minden periódusban a rádiómodul megpróbálja érzékelni a bejövő üzenetet. A csökkentett energiafelhasználású üzenetküldést egy meghosszabbított, 50 ms hosszú preambulum előzi meg. A preambulum lényegében egy rádiózaj, amelyre a vevőcsomópontnak szüksége van az adás észlelésének céljából. Ha vevőcsomópontok érzékelik ezt a preambulumot ébredésük után, akkor vételi módban maradnak a hálózati csomag többi részének fogadásához [28][29][46].



9. ábra IQRF normál (STD RX) és csökkentett energiafelhasználású (LP RX) vételi üzemmód [46]

LP-RX mód esetén az RF áramkör energiát használ fel. A központi adatgyűjtés esetén azonban két adatgyűjtési ciklus között garantálható, hogy nem történik hálózati kommunikáció. Ezért a szinkronizált mélyalvási mód használata tovább csökkentheti a szenzorcsomópontok energiaveszteségét, különösen akkor, ha a kérés időszakok hosszabbak. Ezzel szemben a normál RF vételi üzemmód folyamatosan bekapcsolva tartja az rádiós áramkört, ami magasabb energiafogyasztást és rövidebb elem-élettartamot eredményezhet. Az LP RX mód hasznos funkció, amely kismértékű kommunikációs sebességcsökkenés mellett lehetővé teszi a vételi üzemmód energiafelhasználásának csökkentését [46].

Az FRC adatgyűjtés egy kérés broadcast-üzenettel kezdődik. A 8. ábra látható, hogy mindkét hálózati csomópont közvetlenül fogadja a broadcast üzenetet a koordinátortól. Az áramfelvétel közötti különbség az LP mód periódusidejéből adódik, amely a két eszközben eltérő fázisban van. A mélyalvási üzemmód hossza alapján a vételi üzemmód időtartama változhat a meghatározott tartalék időtől függően:

$$t_{idle} = t_{period} - t_{FRC} - \lfloor t_{dsleep} / t_{qsleep} \rfloor \cdot t_{qsleep} \quad (11)$$

ahol t_{dsleep} a szenzorcsomópontok mély alvási ideje az oszcillátor pontatlanságait is figyelembe véve. Az LP-RX módban mért átlagos áramfelvétel alapján a vételi üzemmód energiafelhasználását, amelyben az áramfelvételt az I_{LP} jelöli, az alábbiak szerint határozhatjuk meg:

$$E_{idle} = UI_{LP}t_{idle} \quad (12)$$

5.1.2. Kérés broadcast-üzenet

A kérés broadcast-üzenet küldésével kezdődik meg az FRC adatgyűjtés, amelyben az összes csomópont megkapja a kérés broadcast-üzenetet a hálózatban. Minden csomópont ezután a saját kijelölt időrészében megismétli a csomagküldést, majd letiltja a rádiomodult, mivel több csomagot nem kell fogadnia az útválasztás folyamat végéig.

A folyamatot a koordinátor, amely szomszédságába tartozó eszközök fogadják, az üzenetet majd továbbítják a saját VRN számuknak megfelelő időrészükben, az elárasztásos útválasztásnak megfelelően. Az üzenet ismételt elküldésével így a hálózatban minden csomópont képes fogadni a kérés üzenetet, biztosítva, hogy minden kívánt címzetthez eljusson. A 8. ábra látható a *Request Broadcast Message Routing* fázisban, hogy miután az eszközök fogadták az üzenetet várakoznak a saját időrészükre és küldik tovább az üzenetet. Jól látható az alacsonyabb áram felvételű üzenet fogadás és a magas áramfelvétellel járó üzenetküldés is. A kérés üzenet továbbítási fázis energiaszüksége a következő:

$$E_{request} = U(I_{Rx}(t_p + t_{req}) + I_{Tx}(t_p + t_{req}) + (N - 2)I_{idle}(t_p + t_{req})) \quad (13)$$

A kérés üzenet ismétlése a hálózati elemszámmal megegyező számú időrésben történik, amelyből az egyik időrésben fogad üzenetet és egy másik időrésben küldi. A további időrésben vételi üzemmódban van.

5.1.3. Feldolgozás

Miután minden hálózati csomópont fogadta a kérés üzenetet elkezdődik az üzenet feldolgozása. Ebben a fázisban történik meg az érzékelő aláramkör adatainak feldolgozása és az azok felkészítése az adatgyűjtéshez. Az érzékelő aláramkörök jellemzően kisebb energiaigényűek a rádiós áramkörnél, melynek energiaigénye E_{sensor} . Az érzékelő energiaigénye függ a mért jellemzőtől és az alkalmazott technológiától. A vezeték nélküli szensor eszközökben jellemző, hogy az érzékelő aláramkör feladatát egy integrált áramkör vagy érzékelő modul látja el [46][49][51]. A feldolgozási fázis energiaigénye az alábbiak alapján határozható meg:

$$E_{\text{proc}} = U(I_{\text{idle}}t_{\text{proc}}) + E_{\text{sensor}} \quad (14)$$

5.1.4. Szomszédos adatmegosztás

A következő fázisban, az FRC keretén belül, minden csomópont a kijelölt időrésében továbbítja szenzoradatát a szomszédos csomópontoknak. Ahhoz, hogy adatot kapjon a többi szomszédától, minden csomópontnak aktív vételi üzemmódban kell maradnia addig, amíg az összes többi csomópont elküldi a saját üzenetét. Miután az üzeneteket fogadták, a csomópontok összefűzik a csomag tartalmát a hálózati címük alapján, és hozzáadják saját mért adataikat. A szomszédos adatmegosztás fázis energiafogyasztása:

$$E_{\text{beacon}} = U(I_{\text{Rx}}(N-1)t_{bc} + I_{\text{Tx}}t_{bc} + I_{\text{idle}}t_{bcw}) \quad (15)$$

A megfelelő kommunikáció érdekében minden csomópontnak $N-1$ ideig aktív vételi üzemmódban kell maradnia, hogy képes legyen fogadni üzeneteket, majd a saját időszámban küld üzenetet a szomszédjainak. Az LP-RX mód helyett itt aktív vételi üzemmód kerül alkalmazásra. Az FRC folyamat pontos időzítésekkel dolgozik, így itt az aktív vételi üzemmód nem okoz többletfogyasztást. Ez gyorsabb üzenetváltást tesz

lehetővé. A szomszédos adatmegosztási fázist egy rövid t_{bcw} idejű adásszünet követ [30][31][46].

5.1.5. Válaszüzenetek - Response message routing

A válaszüzenetek továbbításának fázisa azzal kezdődik, hogy a legnagyobb VRN-számú csomópont továbbítja az adatait a szomszédos adatküldés fázisban fogadott adatokkal összefűzve. A hálózati csomópontok ezután a válaszüzenetet továbbítják a VRN-számok szerint csökkenő sorrendben ismételve. Minden csomópont ekkor összefűzi a kapott üzeneteket, majd továbbítja azt. Ennek eredményeként, amikor a koordinátor az utolsó csomagot fogadja és összefűzi az üzeneteket az összes csomópont mérési adata megtalálható lesz az adott helyen a válaszüzenet adattartalmában. A válaszüzenet továbbításának energiafelhasználása:

$$E_{response} = U(I_{Rx}t_{resp}(N-1) + I_{Tx}t_{resp}) \quad (16)$$

Ahhoz, hogy bejövő üzeneteket fogadhassanak, a csomópontoknak $N-1$ időreig aktív vételi üzemmódban kell maradniuk, ahogy a szomszédos adatmegosztás fázis ideje alatt is. Az üzenetek fogadása után a csomópontoknak egyetlen időszámban kell továbbítaniuk saját üzenetüket.

5.1.6. Mélyalvó üzemmód

Az alacsony energiafogyasztású vételi módjelentős előrelépés az energiafogyasztás terén, de a centralizált adatgyűjtés során az energiafogyasztást még tovább csökkenthetjük. A szinkronizált adatgyűjtés módszereiben a koordinátor ismeri az adatgyűjtési ciklusok periódusidejét. Az energiafelhasználás további csökkentése érdekében a szenzorcsomópontok mélyalvó üzemmódba kapcsolhatók két adatgyűjtési ciklus között, ami alacsony energiafogyasztást eredményez. Ezt a módszert szinkronizált mélyalvó módnak (synchronized deep sleep mode) nevezzük. Ebben az üzemmódban a szenzorcsomópontokat alvó üzemmódba helyezhetjük a rádiókommunikáció letiltásával, azaz a rádió modul kikapcsolásával, egészen a következő adatgyűjtési időszakig, ezáltal energiát megtakarítva.

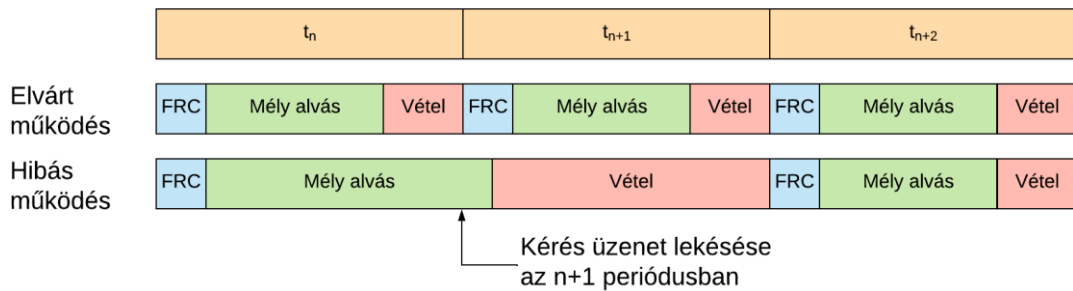
A szinkronizált mélyalvó mód abban az esetben alkalmazható multi-hop TDMA vezeték nélküli hálózatokban, amennyiben az alvási időt meghatározó érték az adatkérés

üzenetben továbbítható az eszközök számára. A szenzor csomópontokat mélyalvó üzemmódba küldhetjük a rádiós modul letiltásával és mélyalvó üzemmódra váltással a következő adatgyűjtési időszakig alszik. A szinkronizált mélyalvó mód legfontosabb feltétele, hogy a szenzorcsomópontok, mielőtt az újabb adatgyűjtési időszak kérést megkapnák, felébredjenek és nyugalmi üzemmódba kerüljenek. Ha a szenzorcsomópont nem ébred fel és kihagyja a kérést, akkor nem tudja, hogy mikor lesz a következő kérés, és nem tud mélyalvó üzemmódba kerülni, ami magasabb energiafogyasztást eredményez. Az alvási időnek rövidebbnek kell lennie, mint az időzés.

Ahogy 8. ábra látható volt, a mély alvó üzemmód az FRC adatgyűjtés befejezése után az összes csomópontban egyidejűleg aktiválódik. A mély alvás időtartama az adatgyűjtési periódusidő követelményeitől függ. A mély alvás ideje a következőképpen számítható ki:

$$t_{d\text{sleep}} = t_{p\text{riod}} - t_{FRC} \quad (17)$$

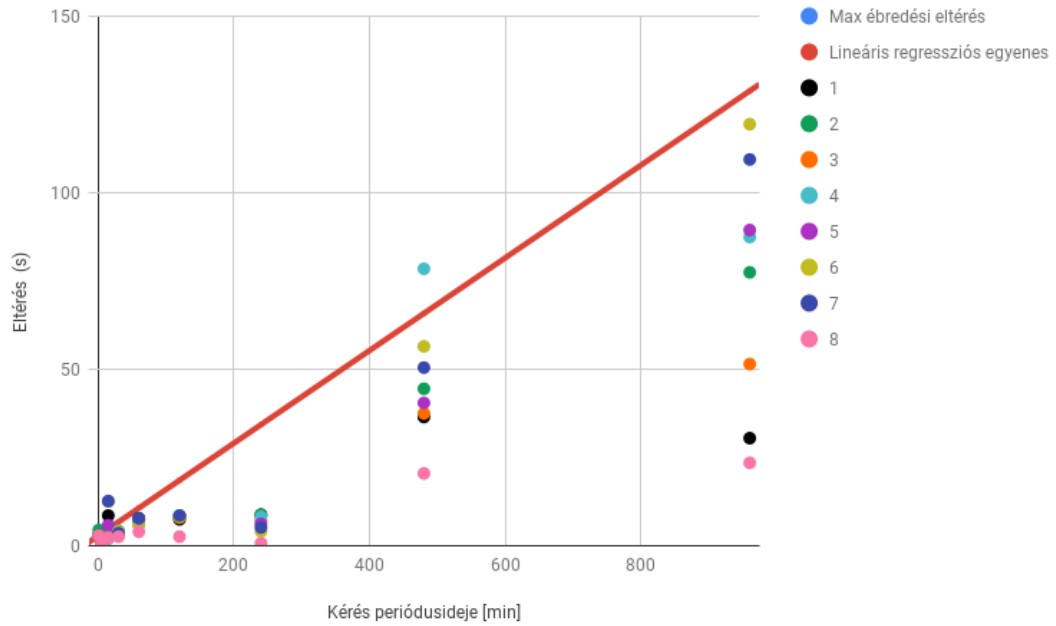
Annak érdekében, hogy biztosítani lehessen a stabil kommunikációt, a szenzor csomópontoknak át kell kapcsolódnuk a mélyalvó üzemmódról vételi üzemmódra a következő adatgyűjtési ciklusban történő kérések fogadása előtt. Ha egy szenzor nem képes fogadni egy kérés üzenetet, akkor vételi üzemmódban marad egészen a következő kérésig, ami megnövekedett energiafogyasztáshoz vezet. Emellett fontos biztosítani, hogy az alvási idő rövidebb legyen, mint a periódus időtartama. A 10. ábra szemlélteti a szinkronizált mély alvó algoritmus helyes és helytelen működését. Amennyiben egy csomópont kihagyja a kérést, nem tudja továbbítani a csomagot, ami hálózati kommunikációs hibákhoz vezethet. Ezért rendkívül fontos minimalizálni a kihagyott kérések előfordulását és optimalizálni az alvási időt a hatékony és megbízható kommunikáció biztosítása érdekében.



10. ábra Az elvárt és késői ébredésből adódó hibás működés mélyalvó üzemmódban

Annak érdekében, hogy biztosítani lehessen, hogy az összes szenzor csomópont vételi állapotban legyen mielőtt a következő kérés érkezik a hálózati koordinátortól, szükséges egy pontos mélyalvási időt kiszámítani, ami rövidebb a periódus időnél. Ez azért fontos, mert az összes csomópontnak vételi állapotban kell lennie, mielőtt a kérés üzenet kiküldésre kerülne a hálózatban. Ellenkező esetben a későn ébredő szenzorok nem kapnák meg az üzenetet, ezáltal továbbítani sem lennének képesek. Így a hálózat egy nagyobb része is kieshet az adatgyűjtési ciklusból.

A mélyalvási idő kiszámítása a szenzorcsomópontok legrosszabb esetben előforduló ébredési idején alapul. Az alvási idő szórását első sorban a szenzorok belső időzítőjéhez használt oszcillátor pontatlansága határozza meg. Az alacsony fogyasztás érdekében erre a feladatra leggyakrabban a mikrovezérlőbe integrált RC oszcillátor szolgál [6][46][49]. Ez alacsony fogyasztást biztosít, viszont nagyobb a pontatlansága, általában $\pm 3\%$ és $\pm 10\%$ közötti. A mély alvási idő pontos meghatározásához lemértem az alvási és ébredési időt, valamint az egyes szenzorok ébredési idejének maximális különbségeit. Ezek a maximális értékek lineáris regresszióval kerültek illesztésre, ahogy az 11. ábra látható. Leolvasható, hogy a belső időzítő pontatlansága miatt, az ébredési időnek nagy a szórása. Mivel a megfelelő időpont előtti ébredést kell garantálni, ezért a maximális eltérést kell alapul venni. Ez magasabb fogyasztással jár, de ez által garantálható a megfelelő ébredés időzítése a hálózatban.



11. ábra 8db DCTR-7x IQRF moduloknál mért ébredési idők maximális különbsége másodpercben a különböző alvási periódusokban

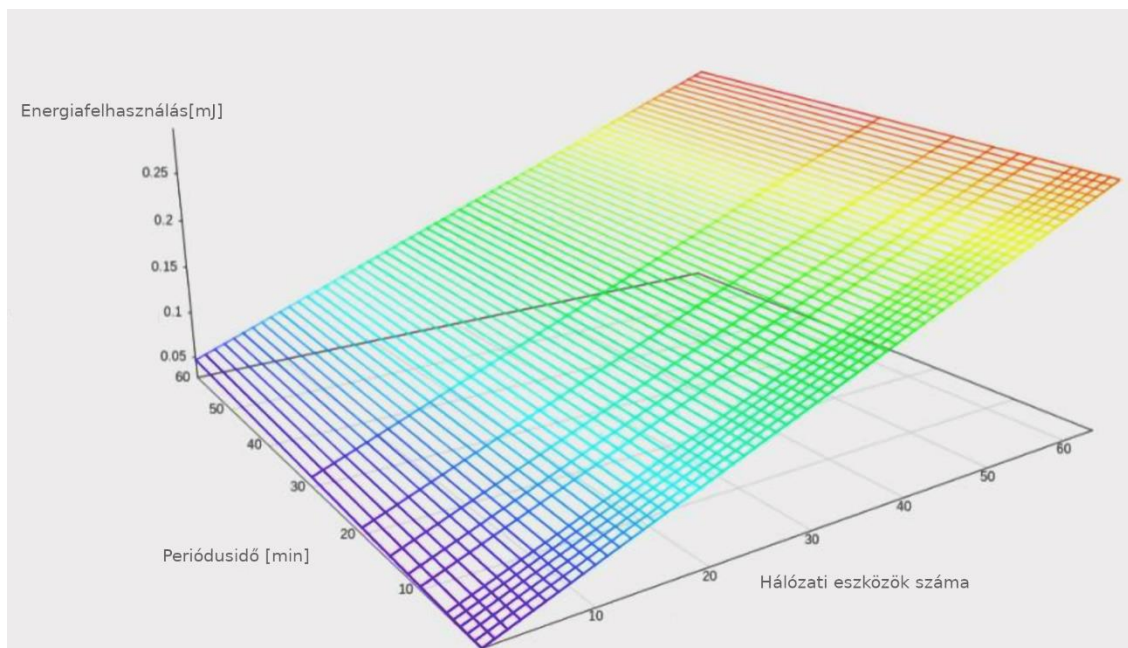
A szenzorcsomópontok mélyalvási ideje az ébredési idők mérése alapján meghatározott regressziós összefüggés szerint az alábbi módon adható meg:

$$t_{d\text{sleep}} = (t_{\text{period}} - t_{\text{FRC}}) - 0.00219(t_{\text{period}} - t_{\text{FRC}}) + 2.7 \quad (18)$$

A megfelelő ébredési szinkronizáció biztosítása érdekében a mély alvási módszer használatához fontos kiszámítani a rádiómodulok belső órájának pontatlanságát. A tesztsomópontokban a mély alvási mód időzítésének vezérlésére az IQRF modulok egy watchdog időzítőt használnak kombinálva egy alacsony energiafogyasztású RC oszcillátorral. Ez az időzítő széles körben lefedi az alvási időintervallumokat, lehetővé téve az IQRF számára, hogy a mély alvási kvantumot $t_{\text{qsleep}}=2.097\text{s}$ határozza meg, ami a felhasznált mikrovezérlő tulajdonságaiból adódik [28][46]. A készenléti idő ennek segítségével határozható meg:

$$t_{\text{idle}} = t_{\text{period}} - t_{\text{FRC}} - \left\lfloor \frac{t_{\text{dsleep}}}{t_{\text{qsleep}}} \right\rfloor t_{\text{qsleep}} \quad (19)$$

ahol t_{period} az idő a következő adatgyűjtési periódusig, és t_{FRC} az adatgyűjtési kommunikáció időtartama. A pontatlanság meghatározásához az itt ismertetett mérési módszer mindenképpen javasolt, hogy biztosítani lehessen a maximális mély alvási időt amellett, hogy a következő adatgyűjtési ciklus előtt minden szenzor vételi módba kapcsolhasson.



12. ábra Egy csomópont teljes energiafogyasztása (E_{total}) periódusonként egy adatkérésre

A fentiek alapján, a 12. ábra ábrázolja egy szenzor energiafelhasználását (E_{total}) az adatgyűjtési periódusidő és a hálózat méretének függvényében egy adatgyűjtési ciklus esetén, a DCTR-76D modul paramétereinek alapján [46]. Az ábrán látható, hogy a hálózati csomópont energiafelhasználása a hálózati elemszám és a lekérdezési periódusidő növekedésével lineárisan változik.

5.2. Energiafelhasználás elosztása a hálózatban

A vezeték nélküli hálózat energiafelhasználásának az eloszlása a hálózati architektúrától és adatgyűjtési módszerektől függ [6][49][51][53]. Feltételezve egy homogén hálózatot azonos érzékelőkkel és elemekkel, az energiafelhasználás változásai kizárólag az adatgyűjtési módszer kommunikációs költségeire vezethetők vissza. Ezért kulcsfontosságú megérteni az energiafelhasználás eloszlását, mivel közvetlen hatással

van a hálózat élettartamára. Bármelyik csomópont, amelynek kommunikációs energia költsége magasabb lenne, mint a többié, előbb válhatna működésképtelenné, ami potenciálisan kommunikációs problémákat okozhat. Ez azért van, mert a hálózat élettartama az első működésképtelenné váló csomópontához igazodik.

Az előző fejezetben bemutatott energiafelhasználási modell alapján megállapítható, hogy az energiafelhasználás eloszlása egyenletes a hálózatban, az egyes hálózati eszközök energia felhasználása nem különbözik. Az egyes fázisokban meghatározott energiafelhasználás csak a hálózati elemszámtól és az adatgyűjtési periódusidőtől függ, de nem függ a hálózati elem címétől, azaz, hogy hol helyezkedik el a hálózatban.

A szenzorok teljes energiafogyasztása első sorban az alábbi tényezőktől függ:

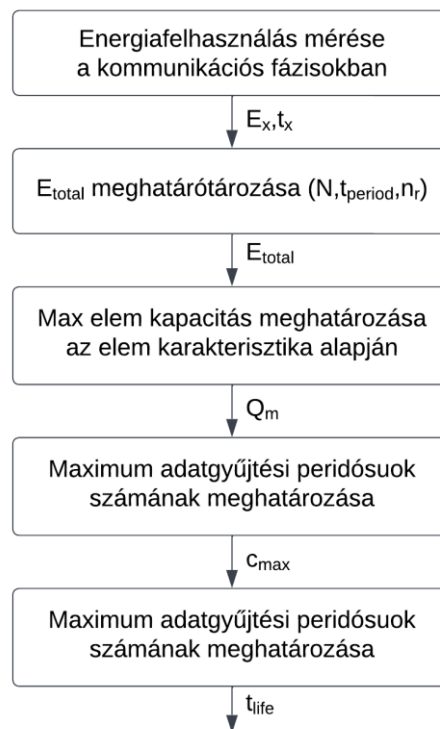
- a hálózatban lévő csomópontok száma,
- az adatgyűjtési periódus és a
- ciklusonkénti adatgyűjtési kérések száma.

5.3. A vezeték nélküli szenzorok elem élettartamának becslése

A szenzorhálózat élettartamát az első olyan csomópont határozza meg, amely először válik képtelenné a kommunikációra [51][52][53][54]. A szenzor élettartamának definíciója annak az időpontnak a meghatározásával történik, amikor az első érzékelő az elem merülése miatt használhatatlanná válik. Az érzékelő csomópontok energiafogyasztási modellje alapján a becsült elem élettartamot a következőképpen határozhatjuk meg (13. ábra):

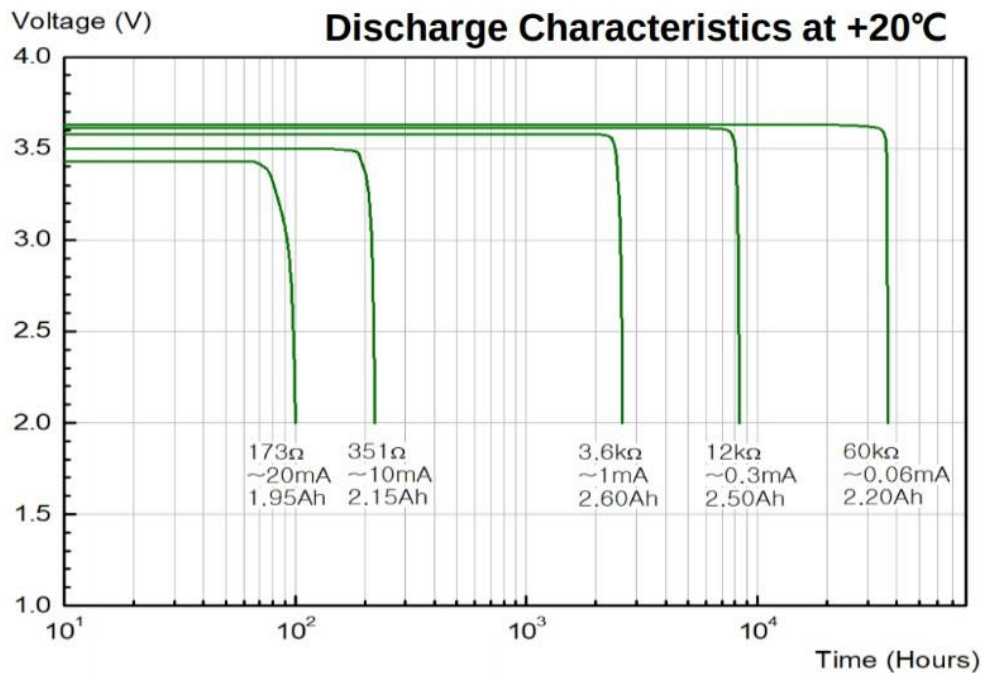
- A korábban ismertetett energiafelhasználási modell segítségével kiszámítjuk a csomópont teljes energiafogyasztását a mért értékek alapján (E_{total}), majd meghatározzuk a maximális és átlagos áramfelvételt, hogy meghatározhassuk az elem megfelelő kisülési görbét.

- A megfelelő elem lemerülési jellemzőinek felhasználásával meghatározzuk az elem kapacitásából (Q_m) kiszolgálható maximális adatgyűjtési ciklusok számát (c_{max}).
- A maximális adatgyűjtési ciklusok és a kérés időszak alapján kiszámítjuk a becsült elem élettartamát (t_{life}).



13. ábra Az elem élettartam meghatározásához szükséges információk és lépések

Az elem élettartamának becsléséhez meg kell határoznunk az elem kapacitásán alapuló maximális adatgyűjtési ciklusok számát. Az alkalmazott lítium-thionil-klorid (Li/SOCl₂) elemek nagy kapacitással, nagy energiasűrűséggel és alacsony önkisüléssel rendelkeznek, a kimeneti áramfelvétele korlátozott. Emellett az elem kapacitása jelentősen változik a terhelés függvényében. Ennek ellenére a Li/SOCl₂ elemek ideális választásnak számítanak elemes tápellátású eszközök hosszú időtartamú alkalmazásokhoz [54][55].



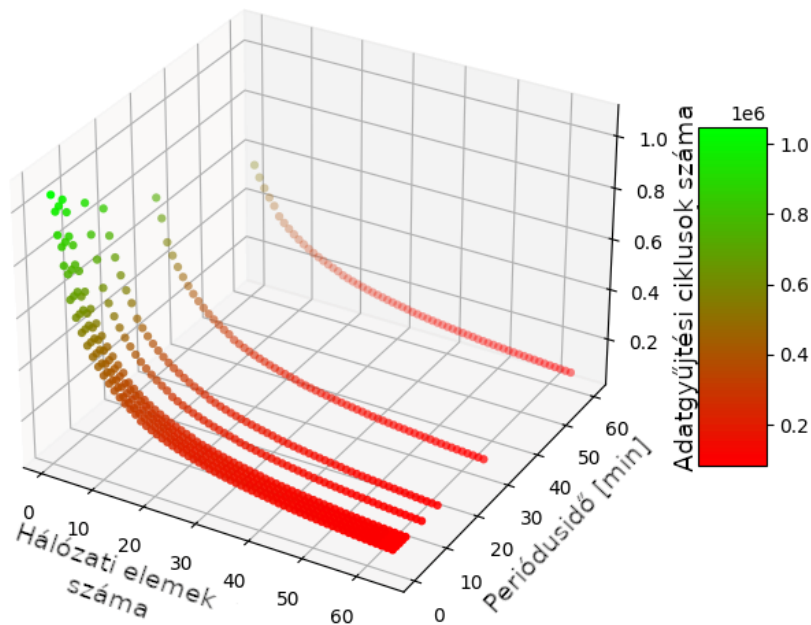
14. ábra Li/SOCl₂ elem terheléstől függő kisülési görbéi [55]

Az elem felhasználható kapacitása függ az átlagos terheléstől és a maximális impulzusáram értékétől. Az elem kisülési görbéje ezen értékek alapján határozhatóak meg. A 14. ábra mutatja egy Li/SOCl₂ elem kisülési görbéit különböző terheléseknél. Emellett az elem önkisülési jellemzőit befolyásolja a terhelés, és hatással lehet az elvárt élettartamára. A Li/SOCl₂ elem önkisülése rendkívül alacsony, kevesebb, mint 1% évente 20 °C-on, ami lehetővé teszi hosszú tárolási időket és típusától függően 10-20 éves élettartamot. Li/SOCl₂ elem 10 év után is megtartja a névleges kapacitásának 90%-t [54][55]. Ezen elemtípus egyik legnagyobb problémája, hogy amikor SOCl₂-vel érintkezik, a lítium gyorsan reagál és passzivációs réteget képez, amely lelassíthatja a további korróziós reakciókat. Ez befolyásolja az akkumulátor élettartamát, és függ a tárolási időtől és környezeti feltételektől a gyártás befejezése és az érzékelőkben történő használat kezdete között. Nehéz pontos matematikai élettartam-becsülő modellt felállítani hozzá, mert a Li/SOCl₂ akkumulátor önkisülési arányára ható tényezők túl bonyolultak [54]. A problémái ellenére a vezeték nélküli szenzorhálózati eszközökben azonban sok esetben ideális választás a hosszú elemélettartama miatt.

A szenzorok a hálózati adatgyűjtési paramétereknek megfelelő energiateljesítménynek megfelelő kiválasztott görbe alapján az elem élettartama alatt kiszámolható adatgyűjtési ciklusok maximális száma:

$$c_{\max} = \left\lfloor \frac{Q_m U}{E_{\text{total}}} \right\rfloor \quad (20)$$

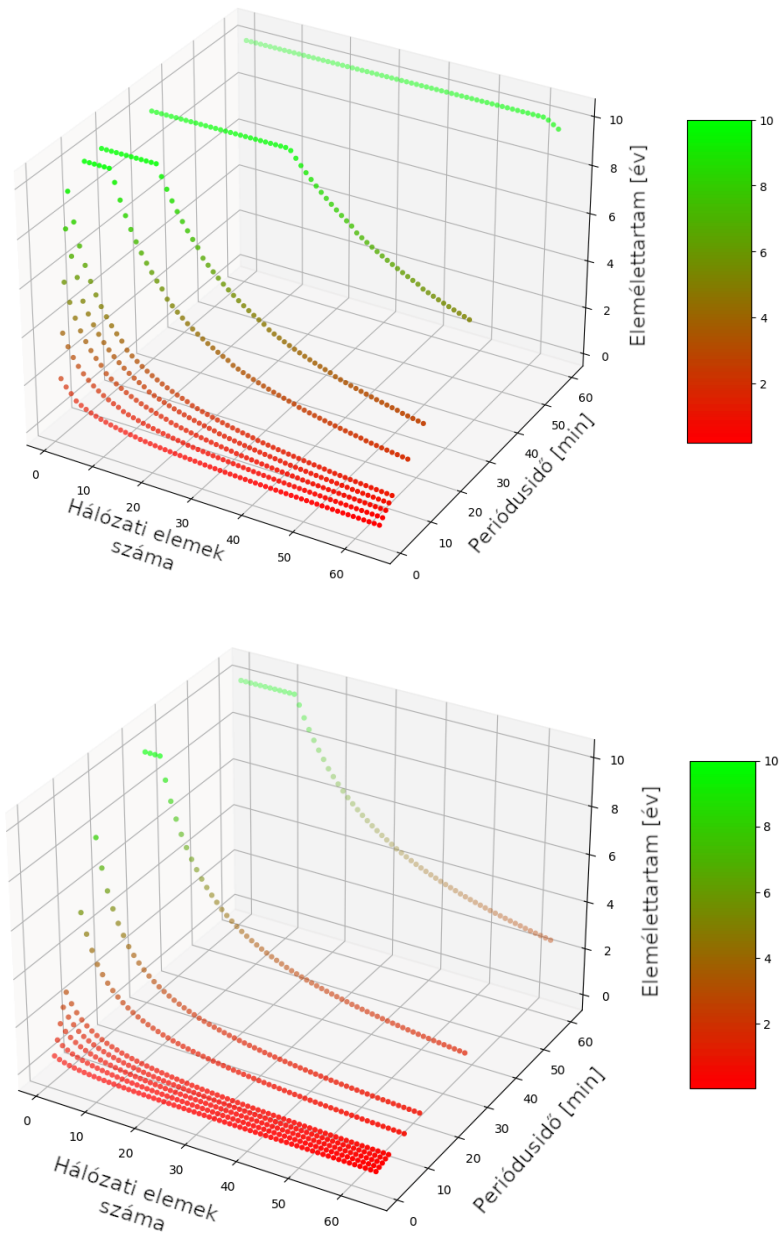
ahol Q_m az elem kapacitását jelöli, amelyet az elem élettartamának végén mért kisülési jellemzők alapján határoznak meg.



15. ábra Az elem kapacitásából kiszámolható adatgyűjtési ciklusok maximális száma 1-64 elemű hálózatok esetén 1-60 perces adatgyűjtési ciklusokkal

A 15. ábra mutatja a névleges elem kapacitása alapján kiszámolható maximális adatgyűjtési ciklusok számát az adatgyűjtési periódus és a hálózat méretének függvényében. A maximális adatgyűjtési ciklusok számának kiszámításával határozhatjuk meg az elem élettartamát:

$$t_{\text{life}} = c_{\max} t_{\text{period}} \quad (21)$$



16. ábra Az elem becsült élettartama ciklusonként 1 (fent) és 4 (lent) kérésre ciklusonként

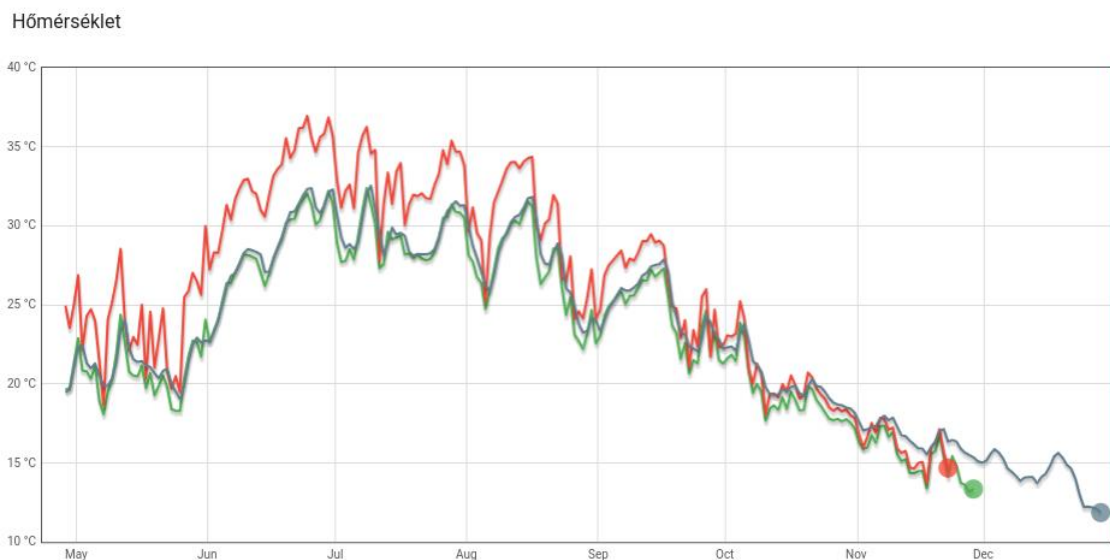
A DCTR-76D modul paramétereinek alapján a 16. ábra bemutatja az elem becsült élettartamát akár négy adatgyűjtési ciklusra is maximális 10 éves maximális élettartammal. A diagramok azt mutatják, hogy a hálózatban lévő csomópontok számának növelése vagy az adatgyűjtés gyakoriságának növelése jelentősen csökkentheti az elem élettartamát. Azonban a hálózatban lévő csomópontok számának növelése kompenzálható az adatgyűjtési időköz csökkentésével.

5.3.1. Elemélettartam modell tesztelése

A modell validálásához egy teszt hálózaton rövid távú tesztelést végeztem. Emellett elindítottam egy hosszú távú tesztet hat érzékelő eszközzel, amely öt éven át tart. Azonban a hosszú távú teszt eltérő eredményeket hozhat Li/SOC12 elem tulajdonságai miatt. A rövid távú teszteléshez a modell validálásához használt teszt szensorhálózatban a következőket alkalmaztam:

- 3db DCTR-76D alapú vezeték nélküli hőmérséklet szenzor (IQ Home SI-T-02 [56])
- Egy gyártási tételből származó XL-060F elemek [55]
- 1 perces adatgyűjtési időszak 2 kéréssel egy időszakonként (hőmérséklet + állapot)
- A modell által becsült elem élettartama: 207 nap

A definíció szerint a hálózat élettartama a legelső működésképtelen érzékelő csomópontként határozható meg. Azonban a teszhálózatokban az összes érzékelő csomópont elemélettartamát szeretnénk volna megfigyelni, nemcsak az először meghibásodó csomópontot.



17. ábra A rövidtávú teszhálózat hőmérséklet adatok a pontokkal jelölt szenzorok elemélettartamának végéig

Ehhez úgy állítottam be a teszt hálózatot, hogy minden érzékelő csomópontnak közvetlen kapcsolata legyen a koordinátorral. Ez a kialakítás biztosítja, hogy a hálózati kommunikáció ne szakadjon meg, ha bármelyik csomópont meghibásodik. Az összes érzékelő csomópont elemélettartamának megfigyelésével átfogóbb képet kaphatunk a hálózat teljesítményéről és tartósságáról.

A 17. ábra mutatja a rövid távú tesztelés során gyűjtött hőmérsékleti értékeket a hálózatban. A teszt 245 napig tartott, amíg az utolsó érzékelő csomópont eleme is lemerült. A 3. táblázat mutatja az elem élettartam tesztelés eredményeit. A tesztelés fő célja az volt, hogy megállapítható legyen, hogy az egyes érzékelő csomópontok becsült elem élettartama legalább a becsült időpontig képes legyen működni. Az első szenzor 208 nap után merült le, ami meghaladja a becsült élettartamot, a további eszközök még hosszabb ideig maradtak működőképesek.

Csomópont	Becsült elem élettartam (nap)	Valós élettartam (nap)	Eltérés
1(zöld)	207	216	+4.35%
2(piros)	207	208	+0.48%
3(szürke)	207	245	+18.36%

3. táblázat A rövidtávú elemélettartam teszt eredményei

A különböző csomópontokban fellépő jelentős különbség azonban a Li/SOCI2 elemek szórásával magyarázható, még akkor is, ha ugyanabból a gyártási tételből és rendelésből származnak, és hasonló körülmények között kerültek tárolásra. A tesztelés során beigazolódott, hogy az energiafelhasználási modell és a megfelelő kisülési görbe kiválasztásával jó közelítéssel meghatározható az elemek becsült élettartama. A tesztelés eredménye azt is igazolja, hogy a leírt elemélettartam becslési módszer alkalmas a karbantartási elemcsere periódusok meghatározásához.

5.4. Dinamikus alvási ciklusok

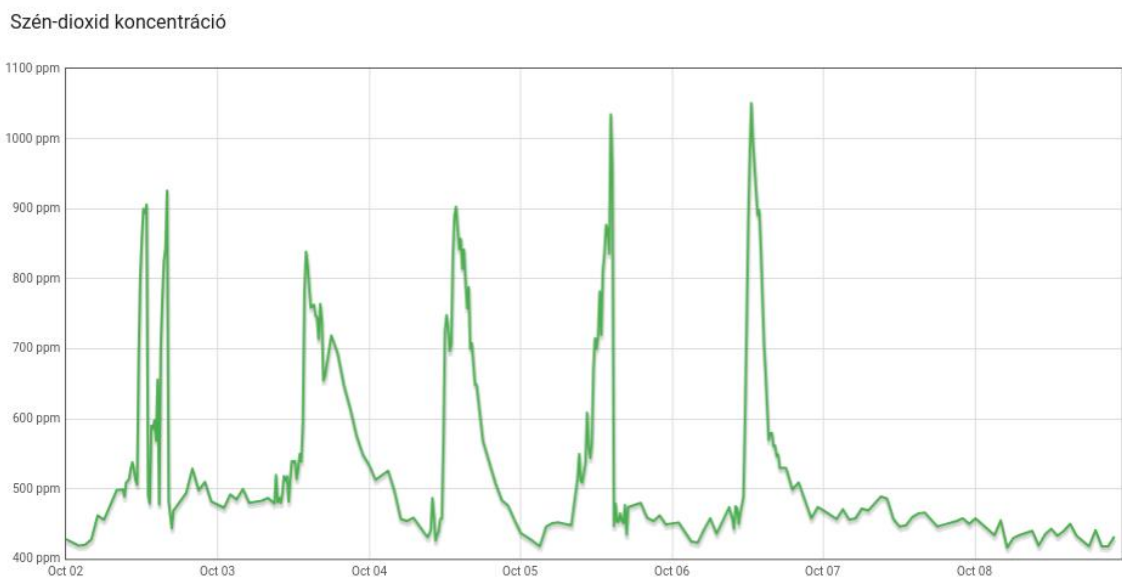
A mélyalvási ciklusok periódusa is könnyedén változtathatóak a központi adatgyűjtésnek köszönhetően. Az elképzelés szerint a telepített szenzorhálózatok alkalmazásonként eltérő adatgyűjtési ciklus igényekkel rendelkezhetnek. Az adatgyűjtési ciklusok közötti idő leggyakrabban a szenzorok által mért változások követhetőségén

alapul. Abban az esetben, ha az értékek változásának az ideje is periodikusan változik akkor a lekérdezések periódusideje is változtatható, ezáltal tovább csökkenthető az energiafelhasználás. A központilag felügyelt mélyalvó üzemmód segítségével megvalósítható a dinamikusan változtatható mélyalvási ciklus. A dinamikus alvási ciklusokra egy alkalmazási példa lehet egyetemi laborok szén-dioxid monitorozása. Az egyetemi laborban jellemzően megkülönböztethető aktív és inaktív időszak, az alapján, hogy hallgatók és oktatók tartózkodnak-e az épületben vagy nem. Az inaktív időszakban jellemzően elegendő alacsonyabb mintavételezési periódust tartani. Ezáltal például az egyetemi labor esetén éjszaka és hétvégén kisebb adatgyűjtési periódusokkal jelentős mértékben csökkenthető az energiafelhasználás. A képen látható egy egyetemi labor korábbi szén-dioxid értékének mérése. Az ábrán látható, hogy az éjszakai időszakban nem történik változás az értékekben, illetve nem releváns ezért ezekben az időszakokban csökkenthető a mintavételezési idő. Egy példát tekintve ez azt jelenti, hogy egy 40 elemű hálózatban 15 perces adatgyűjtési periódussal számolva 5.01 év lenne. Amennyiben naponta 17-8 óra közötti esti inaktív időszakban a mintavételezés 60 perces időintervallumra csökken, úgy az elemélettartam a modell alapján 5.01 évről 9.63 évre növelhető. Az elem élettartam növelésére ezt a módszert javaslom ott, ahol az adatgyűjtés szempontjából aktív és inaktív időszakok különböztethetőek meg.

Számos kutatás [89]-[93] irányult a dinamikus alvási ütemezésre a vezeték nélküli érzékelőhálózatokban, mint stratégia az energiafelhasználás csökkentésére és így a hálózat élettartamának növelésére. Ezek a tanulmányok együttesen kiemelik az innovatív alvási ütemezési stratégiák létfontosságú szerepét az energiahatékonyság és a fenntarthatóság előmozdításában a WSN-ekben. A dinamikus adatgyűjtési és mély alvási ütemezési módszer, amely kifejezetten az IQRF hálózatok számára, kihasználva a központosított FRC összevont adatgyűjtési módszerre.

Különböző alkalmazásokban, ahol az adatgyűjtés szezonális vagy periodikus trendeket mutat, egy dinamikus ütemezési megközelítés nagyon előnyös lehet. Ez a stratégia magában foglalja az adatgyűjtési gyakoriság alkalmazkodását az idősor-adatokban megfigyelt mintázatokhoz vagy a konkrét alkalmazás követelményeinek ismeretéhez. Példaként vegyük figyelembe a 18. ábra, amely egy irodai környezetben a

szén-dioxid szintjének változásait ábrázolja egy hét alatt. Ebben a példában az idősor-
adatok egyértelműen mutatnak szezonális ingadozásokat, az irodai kihasználtsági
mintákhoz megfelelő különös csúcsokkal és mélypontokkal. Tevékenység csökkenésével
járó időszakokban, mint az éjszakák és hétvégék, nyilvánvalóvá válik, hogy a magas
gyakoriságú adatgyűjtés szükségessége csökken. A magas gyakoriságú adatgyűjtés
ezekben az alacsony aktivitású időszakokban általában nem eredményez további értékes
betekintéseket. Ez a megfigyelés lehetőséget nyit jelentős energia-megtakarításokra az
adatgyűjtési intervallumok ritkábbá tételével ezekben az időszakokban.



18. ábra Egy egyetemi számítógép laborban mért szén-dioxid mért értékek változása egy nap alatt

Az korábban leírt elem élettartam becslési modell alapján, vizsgáljunk meg egy
hipotetikus vezeték nélküli érzékelőhálózatot, amely 40 csomópontból áll, mindegyiket
kezdetben 15 perces adatgyűjtési intervallumra állítva. Ebben a konfigurációban minden
egy csomópont hálózatban becsült akkumulátor élettartama körülbelül 3,87 év lenne.
Azonban, ha stratégiaileg módosítjuk az adatgyűjtési ütemtervet az alacsonyabb
aktivitású időszakokkal összhangban, jelentősen meghosszabbíthatjuk az akkumulátor
élettartamát. Például, ha az adatgyűjtési intervallumot 60 percre növeljük a kevésbé aktív
esti órákban (17:00-tól 08:00-ig) és a hétvégéken keresztül, a hálózat hatékonyabban
működhet kevesebb adatátvitellel.

Az adatgyűjtési gyakoriság ilyen módosításai jelentős hatással lehetnek az akkumulátor élettartamára a korábban ismertetett elemélettartam becslés szerint. Az inaktív időszakokban az intervallum növelésével a csomópontok akkumulátor élettartama a kezdeti 3,87 éves becslésről körülbelül 5,57 évre bővíthet. Továbbá, ha ugyanezt a 60 perces intervallumot alkalmazzuk a hétvégek során is, az akkumulátor élettartama még tovább növelhető, potenciálisan akár 8,33 évig is elérhető. Ez jelentős javulás, és bemutatja a tevékenységi szinteken alapuló dinamikus ütemezés hatékonyságát. Az IQRF hálózatokban szinkronizált adatgyűjtési módszerek esetében a koordinátor határozza meg az adatgyűjtési ciklusok időzítését. Az energia megtakarítása érdekében az érzékelőcsomópontok mély alvó módba lépnek a gyűjtések között, jelentősen csökkentve az energiafelhasználást. Ezt a stratégiát, amelyet szinkronizált mély alvó módnak neveznek, magában foglalja a csomópontok rádiómoduljainak kikapcsolását a következő adatgyűjtési időszak kezdetéig.

5.5. Elmélet gyakorlati alkalmazása

A valós környezeti igényekre reagálva kifejlesztettem egy API-t és egy online kalkulátort, amelyeket kifejezetten az IQRF vezeték nélküli szenzorokkal működő rendszerekhez szántam. A célja, hogy segítsen a hálózattervezőknek és a karbantartóknak meghatározni a vezeték nélküli hálózatok elem élettartamát. Ennek elérése érdekében létrehoztam egy NodeJS [79] alapú API-t, amely az IQRF hálózatok akkumulátorainak élettartamát becsüli meg. Ez az API többek között figyelembe veszi a hálózat méretét, az adatgyűjtési ciklusokat, valamint az aktív és inaktív időszakokat, hogy pontosan meghatározza az elemek élettartamát. A RESTful POST kérésekre építő API könnyen integrálható és használható, ami hasznos lehet kutatók és ipari szakemberek számára a hálózatkezelés területén [78].

Az általam kifejlesztett online kalkulátor [76][77], amely szintén a NodeJS API-ra épül, lehetővé teszi a felhasználók számára, hogy testreszabottan tervezzék meg hálózataikat. A 19. ábra látható online kalkulátor segítségével a felhasználók be tudják állítani specifikus igényeiket, így pontos terveket kaphatnak az akkumulátorok cseréjének időzítésére és a hálózat teljesítményére vonatkozóan. Ezáltal a tervezők képesek lesznek

egyszerűbben és hatékonyabban kialakítani az energiatakarékos és karbantartási szempontból optimális hálózatokat.

Estimated Battery Lifetime Calculator

Measured values Temperature Relative Humidity CO2

Number of sensors 40

Active days Mon Tue Wed Thu Fri Sat Sun

Active hours 9:00 - 16:59

Measurement period in active hours 15 min

Measurement period in inactive hours 15min

Estimated Battery Lifetime 5.01 years

19. ábra Elemélettartam becsléséhez használható online kalkulátor felhasználói felülete [77]

Az API egy másik kiemelkedő funkciója, hogy segíti a hálózatok adaptálhatóságát azáltal, hogy korábban ismertett dinamikus alvási ütemezés finomhangolását teszi lehetővé az adatgyűjtési igények változásaihoz igazodva. Ezáltal javul a hálózat energiahatékonysága és meghosszabbodik az élettartama.

Az általam fejlesztett API és online kalkulátor segítséget nyújt az IQRF technológiát használó vezeték nélküli szensorhálózatok tervezéséhez, implementálásához és kezeléséhez. Ezek az eszközök segíthet a szakembereknek abban, hogy energiatakarékos, hosszú élettartamú hálózatokat hozzanak létre, amelyek pontosan megfelelnek a felhasználói igényeknek.

ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

1. Tézis

A szövevényes időosztásos vezeték nélküli szensorhálózatokban elárasztásos útválasztáson alapuló összefűzött adatgyűjtési eljárás alkalmazása esetén az egyes hálózati eszközök kommunikációra fordított energiafelhasználása nem függ a hálózatban betöltött helyétől.

1.1 Altézis

Megvizsgáltam az összefűzött adatgyűjtési eljárás energiafelhasználását, a kapott eredmény alapján létrehoztam egy elemélettartam becslési modellt. A modell eredményeit méréséssel validáltam.

1.2. Altézis

Az elem élettartam meghatározásához olyan applikációs felületet készítettem, amely a tervezési és karbantartási periódusok meghatározásához nyújt segítséget.

1.3. Altézis

Megoldást javasoltam az elemélettartam növeléshez az összefűzött adatgyűjtési eljárást alkalmazó hálózatok esetén a dinamikusán változó ütemező módszer bevezetésével.

A témában megjelent publikációk: [S1][S2][S3][S4][S11][S12]

6. HÁLÓZAT STABILITÁSA

A vezeték nélküli szensorhálózatokban gyakori probléma a rádiókapcsolat stabilitásának meghatározása. Abban az esetben, ha a hálózati eszközök működnek, de környezeti hatások miatt a vezeték nélküli kapcsolat két vagy több hálózati eszköz között megszakad, a hálózat a redundáns útvonalak hiánya miatt kommunikációképtelenné válhat. Az időosztásos közeghozzáférésű (TDMA) hálózatokban az elárasztásos útválasztás révén több alternatív útvonalon keresztül is elérhetőek az eszközök. Rádiókommunikáció szempontjából az alternatív és redundáns útvonalak határozzák meg a hálózat stabilitását. A hálózatban az elárasztásos útválasztási folyamat lehetővé teszi több alternatív út kialakítását a hálózati eszközök között. A redundáns kapcsolatok kihasználásával a TDMA hálózatok képesek áthidalni egyetlen kommunikációs kapcsolat környezeti zavarok miatti elvesztését, biztosítva a hálózati kommunikáció folytonosságát.

Telepítési tapasztalatok alapján a megfelelő hálózati kommunikáció garantálásához elengedhetetlen, hogy a hálózat rendelkezzen többszörös redundanciával. A hálózati redundancia metrikái kulcsfontosságú szerepet játszanak a TDMA hálózatok stabilitásának értékelésében. Ezek a metrikák magukban foglalják a hálózati eszközök közötti a redundáns kapcsolatok számát adatátviteli irányban. A hálózaton belüli redundancia szintjének mérésével lehetőség nyílik az elárasztásos útválasztáson alapuló hálózat stabilitásának és ellenálló képességének meghatározására, amelyet a kommunikációs hibák okozhatnak. A hálózatok stabilitásának értékeléséhez szükséges megfelelő metrikák és módszertan kidolgozása.

6.1. Hálózati topológia modellezése gráffal

A korábban bemutatott összefűzött adatgyűjtési módszer egy broadcast-üzenettel kezdődik. Amikor az utolsó csomópont megkapja ezt az üzenetet, az a rá kijelölt időszámban választ küld és további csomópontok folytatják az adatok továbbítását a nekik kijelölt időszámban. A csomópontok az adataikat az IQRF FRC megoldásában a visszaküldés előtti fázisban egy további non-routing csomagátvitellel a szomszédos csomópontoknak is elküldik. Ez a továbbítás lehetővé teszi a szomszédos csomópontok számára, hogy megkapják egymás szenzoradatait [30][31][46].

A vezeték nélküli szövevényes TDMA hálózat topológiája leírható egy irányított gráffal $G(V, E)$ formájában, ahol:

- A szenzor eszközök a csúcsok halmazával, $V(G)$ reprezentálhatók,
- A szenzor eszközök közötti kommunikációs kapcsolatok az élek halmazával, $E(G)$ jönnek létre.

Egy él $e=(u,v)$, $u,v \in E$ csak akkor létezik, ha u a v adó távolságában van, és fordítva, mivel a vizsgált hálózatoknál tulajdonságként tekintjük, hogy az adás és vétel szimmetrikusan történik a homogén szenzorhálózatokban. A vételi adásteljesítmény és a vételi érzékenység a hálózati csomópontok között nem tér el. Az adott csomópont v szomszédjainak halmaza a $N1(v) = \{u: (v,u) \in E\}$ módon reprezentálható. A hálózatból felírt gráfot címkézzük a graceful címkézés szerint, azaz a csúcsok címeit jelöljük 0 és $|V|$ közötti természetes számok. Ez a címkézés megfelel a vezeték nélküli hálózatban használt VRN címeknek. A hálózatból felírható gráfban a csúcsokat jelölje v_i ahol $i=VRN$ [59][60][72].

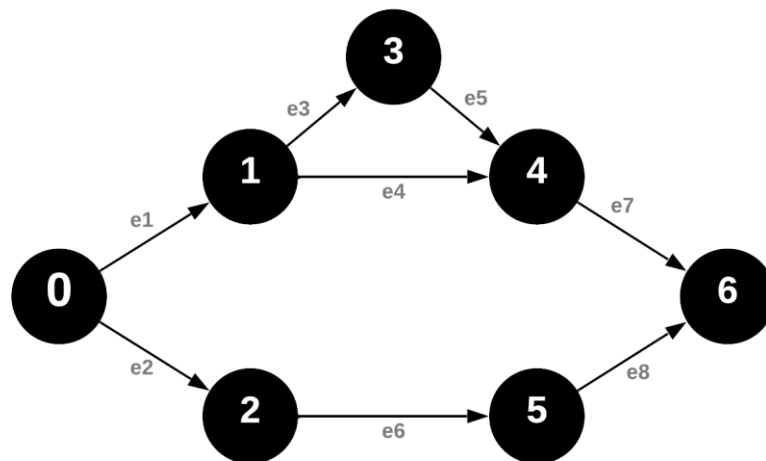
A címkézés miatt a vezeték nélküli szövevényes hálózat két irányított gráf formájában írható le. Az elárasztásos útválasztási módszer alkalmazása miatt a lekérdezés és a válasz üzenetek továbbítása esetében különböző gráfok rajzolódnak ki. A jeladó fázis garantálja, hogy a szomszédos eszközök megkapják egymás üzeneteit is, ezért a teljes adatgyűjtési eljárás esetén a gráf irányítatlannak tekinthető. Ha a hálózatot gráffá absztraháljuk, a teljes hálózat térképét leírhatjuk a gráf szomszédsági mátrixával, amely a vezeték nélküli szenzorhálózatot reprezentálja [58][60][72].

A hálózat topológiájának gráf reprezentációja változhat a üzenetátviteli megközelítéstől függően. Az üzenetáramlás iránya miatt az MDC és az FRC folyamatok több lépést tartalmaznak, amelyek különböző gráf reprezentációkhoz vezetnek. Ahhoz, hogy leírjuk a gráf reprezentációt, először meg kellett vizsgálnunk következő a lépéseket:

- Kérés broadcast-üzenet
- Beacon-fázis
- Válaszüzenet

6.1.1. Kérés broadcast-üzenet

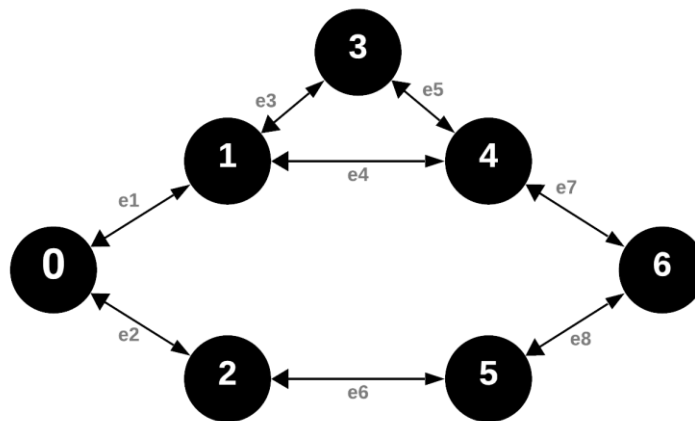
Az üzenet hálózati csomópontokon keresztüli terjesztése az MDC folyamatban egy kérés broadcast-üzenettel indul. A TDMA hálózatokban az elárasztásos útválasztás folyamata a hálózatban felfedezett csomópontok VRN számainak növekvő sorrendjén alapul. Ez a növekvő sorrend alapvető fontosságú az elárasztásos útválasztási mechanizmus helyes működéséhez. Ennek eredményeként a hálózat topológiájának gráf reprezentációjában minden élnek egy kisebb VRN számú csúcsból kell indulnia és egy nagyobb VRN számmal rendelkező csúcsra kell mutatnia. Az így kapott gráf egy irányított körmentes gyengén összefüggő gráf, amely egyetlen irányított kört sem tartalmaz, melyet az angol neve után (directed acyclic graph) DAG-nak is neveznek. Irányított, mivel az üzenetek áramlásának iránya van és körmentes, mivel az üzenetek áramlása csak a kisebb VRN számú csomópontok irányából történhet a magasabb VRN számúak irányában. A koordinátortól távolodva növekvő VRN számokat a hálózat kezdeti feltérképezésekor végbemenő discovery folyamat szélességi keresés során történő kiosztása garantálja [30][46][58][60][72][74].



20. ábra A hálózatban küldött kérés üzenet irányított körmentes gráf reprezentációja

6.1.2. Szomszédos üzenetküldés

A szomszédos üzenetküldés vagy beacon-fázis során a csomópontok vételi üzemmódba kerülnek, és minden csomópont üzenetet küld a neki kijelölt időszávban. Fontos megjegyezni, hogy ez a fázis, amelyet az IQRF FRC implementál nem szükséges az MDC folyamat során. A hálózatot reprezentáló gráfmodell szempontjából a beacon-fázis potenciálisan bevezethet hálózati redundanciát azzal, hogy további üzenetet küld egy olyan hálózatban, ahol az összes csomópont útválasztóként működik.



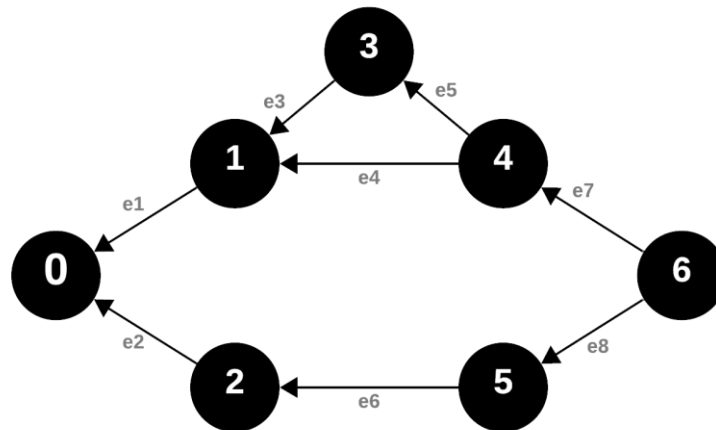
21. ábra A hálózatban szomszédsági üzenetküldés irányított gráf reprezentációja

Azt feltételezem, hogy a vezeték nélküli szensorhálózatban lévő szenzorok homogének, azaz megegyező jellemzőkkel és funkcionalitással rendelkeznek. Emellett azt is figyelembe veszem, hogy a szenzorok rádiólefedettsége szimmetrikus, vagyis, ha egy szenzor képes üzenetet fogadni egy másik szenzortól, akkor ez fordítva is igaz. Ez a feltételezés biztosítja a szenzorok közötti kiegyensúlyozott és kölcsönös kommunikációs képességet a hálózaton belül.

6.1.3. Válaszüzenet

Az MDC folyamatban a válaszüzenet hasonló struktúrával rendelkezik, mint a közvetített kérésüzenet. Azonban ebben az esetben a válaszüzenetet a hálózat legtávolabbi csomópontja kezdeményezi, ami általában egy olyan csomópontnak felel

meg, amelynek magasabb VRN száma van. Ahogy a válaszüzenet terjed a hálózaton keresztül, minden következő csomópont a beacon fázisban begyűjtött adatokat összefűzi a beérkező üzenetek begyűjtött adataival, és a saját kijelölt időszávjában továbbítja azt.



22. ábra A hálózatban küldött válasz üzenet irányított körmentes gráf reprezentációja

Az üzenetküldés mechanizmusát illetően a válaszüzenet hasonlóságokat mutat a közvetített kérésüzenettel. A válaszüzenet azonban a VRN számok csökkenő sorrendjében működik, ellentétben a közvetített kérésüzenetben tapasztalt növekvő sorrenddel. A csúcs bemeneti foka a válaszüzenet küldésének folyamata során azt jelzi, hogy a csomópont hányszor kaphatja meg az üzenetet a szomszédaitól, amelyeknek magasabb VRN száma van.

6.2. Az IQRF hálózat modellje

Az IQRF hálózat elemzéséhez szükségem volt a modelljének matematikai modelljének felírására, mivel az kapcsolódó irodalomban még nem került meghatározásra. A matematikai modell kontextusban való leírása a komponensek és műveletek matematikai fogalmakkal és jelölésekkel való formalizálását foglalja magában. A hálózatot irányított gráfként, $G=(V,E)$ formában lehet modellezni, ahol V a hálózat csúcsainak (vagy csomópontjainak) halmazát, $E \subseteq V \times V$ pedig a csomópontok közötti irányított élek (vagy kapcsolatok) halmazát képviseli. A v_0 csomópont a hálózat

koordinátora, és $v_i \in V$ lehet útválasztó csomópont vagy végpont útválasztási képességek nélkül. Egy él $(v_i, v_j) \in E$ létezése közvetlen kommunikációs útvonalat jelent a v_i és v_j csomópontok között [30][46][58][60][72][74].

6.2.1. Hálózathoz történő csatlakozás

Legyen $B: V \rightarrow \{0,1\}$ egy csatlakozási függvény, ahol $B(v_i)=1$, ha a v_i csomópont kötődik a hálózathoz, és $B(v_i)=0$ egyébként. A kötődési folyamat magában foglalja a $B(v_i)$ 0-ról 1-re való megváltoztatását az egyik hálózati csatlakozási módszer használatával. A kötődés után minden v_i csomópontnak egyedi logikai címet, $L(v_i)$ -t rendelnek hozzá. A hálózat ezeket a logikai címeket használja az útválasztáshoz [30][46][58][60][72][74].

6.2.2. Felfedezési folyamat - Discovery

A felfedezési folyamatot egy szélességi első keresési (Breadth First Search - BFS) algoritmussal modellezhető. Ez minden csomóponthoz egy VRN számot rendel. Legyen $VRN: V \rightarrow N$ az ezeket a számokat hozzárendelő függvény. A szélességi első keresés biztosítja, hogy $VRN(v_i) < VRN(v_j)$ minden olyan v_i esetében, amelyik közelebb van a koordinátorhoz, mint v_j . A discovery folyamatot egy gráfbejáró algoritmusnak is lehet modellezni [30][46][58].

A discovery folyamat kezdeti lépéssel kezdődik, ahol a v_0 koordinátor csomópontot választják ki kiindulópontnak. Ez a csomópont kulcsfontosságú a hálózat szerkezetében, és $VRN(v_0)=0$ -ként van hozzárendelve. Amint a kezdeti lépés befejeződik, a BFS algoritmus veszi át a helyet. Ez az algoritmus rendszeresen és rétegekben haladva vizsgálja meg minden csomópontot és annak közvetlen szomszédjait, kezdve a koordinátortól kifelé haladva.

Minden olyan v_i csomópont esetében, amelyet az algoritmus meglátogat, megvizsgálja annak még nem látogatott szomszédos csomópontjait, amelyeket v_j -ként jelölünk. Ezek a szomszédok azok a csomópontok, amelyek közvetlenül kapcsolódnak v_i -hez, de még nem kerültek felfedezésre a folyamat során. Amint egy még nem látogatott szomszédos csomópontot, v_j kerül felfedezésre, a soron következő egyel nagyobb még nem kiosztott VRN-t kerül hozzárendelésre, amely így garantáltan magasabb, mint az a

VRN, amelyből felfedezték. Ezt úgy fejezzük ki, hogy $VRN(v_j) = VRN(v_i) + 1$. Ez a sorozatos hozzárendelés a felfedezési folyamat fontos része, mivel jelzi a csomópont távolságát ugrásokban a koordinátortól, ami nem feltétlenül a minimális ugrások számával egyezik meg [30][46][58][60][72][74].

A discovery folyamat során az IQRF modulok alacsonyabb adásteljesítménnyel működnek a normál hálózati kommunikációhoz képest. Például, ha a normál kommunikáció 7-es szinten történik, a discovery alacsonyabb szintet, 6 vagy 5 használhat. Ez a megközelítés biztosítja, hogy a felfedezett kapcsolatok erősek legyenek, mivel előnyben részesíti a közelebbi és ezáltal erősebb jelű csomópontokkal való kapcsolatokat. Az alacsonyabb adásteljesítmény szint használata azt jelenti, hogy minden lépésben csak a koordinátor vagy egy másik csomópont közvetlen hatósugarán belüli csomópontok kerülnek felfedezésre. Ez a módszer segít egy erősebb és megbízhatóbb kapcsolatokkal rendelkező hálózat kiépítésében. A discovery folyamat során specifikus zónák jönnek létre. Egy zóna, Z_k definíciója olyan csúcspontok halmazaként, ahol minden $v_i \in Z_k$ kielégíti a $d(v_0, v_i) = k$ feltételt, ahol k a koordinátortól számított ugrások száma [30][46][58][60][72][74].

6.2.3. Elárasztásos útválasztási

Az elárasztásos útválasztási mechanizmust úgy lehet elképzelni, mint egy adatátviteli hullámot, amely a forrás csomóponttól (koordinátortól) indul és fokozatosan eléri a hálózat többi csomópontját. A gráfban minden irányított él (v_i, v_j) az adatátvitelre használatos, de lényeges, hogy csak a v_i csomópontnak kiosztott időszávok alatt.

Legyen $T: V \rightarrow N$ egy olyan függvény, amely minden csomóponthoz időszávokat rendel hozzá. Egy üzenetet a v_i csomópontból a v_j csomópontra lehet továbbítani, ha $T(v_i) < T(v_j)$. Minden v_i csomópontnak meghatározott időszávokban kell adatot továbbítani, a VRN értékének megfelelően. Ez alapvető a hálózaton belüli adatátvitel szervezéséhez és az adatütközések elkerüléséhez. Amikor egy v_i csomópont üzenetet kap az általa kijelölt időszávban, az üzenetet továbbítja az összes szomszédjának a következő, neki kijelölt időszávokban. Ez azt jelenti, hogy minden (v_i, v_j) él esetében a v_i csomópont csak a saját kijelölt időszávjában továbbítja az üzenetet a v_j csomópontnak. Az üzenet terjedése a hálózatban szekvenciális mintát követ. Kezdetben az üzenetet a koordinátor

csomópont, v_0 sugározza ki, elérve azokat a csomópontokat, amelyek közvetlenül kapcsolódnak hozzá (egy ugrásnyira). A következő időszávokban az üzenet eléri a két ugrásnyira lévő csomópontokat, és a folyamat folytatódik, biztosítva, hogy az üzenet végül elérje a hálózat összes csomópontját. Az IQRF hálózat alapvetően a kérés-válasz mintát használja. Ez azt jelenti, hogy minden kérés üzenetet egy válaszüzenet követ. A v_j csomópontnál lévő válaszüzenet a v_i csomópontra továbbítható, ha $T(v_j) < T(v_i)$. A válaszüzenet esetében az üzenetáramlás iránya, valamint az időszávok megváltoznak.

A kérési üzenet útvonalazása irányított körmentes gráfként (Directed Acyclic Graph - DAG) ábrázolható, amely a G gráf részhalmaza, ahol $(v_i, v_j) \in E$ csak akkor, ha $VRN(v_i) < VRN(v_j)$. A válasz egy olyan G részhalmaza, ahol $(v_i, v_j) \in E$ csak akkor, ha $VRN(v_i) > VRN(v_j)$. A kérési üzenetek esetében az élek irányítása $VRN(v_i) \rightarrow VRN(v_j)$ ahol $VRN(v_i) < VRN(v_j)$. Egy irányított gráfban egy csúcs v befoka az ebbe a csúcsba beérkező élek számát jelenti [30][46][58][60][72][74].

Az üzenetek útvonalazásának irányától függően a hálózatban lévő csomópontok befoka és kifoka változhat. Ezeknek a fokszámoknak az értelmezését és elemzését egyszerűbbé teszi, ha a kérési üzenetek útvonalazását ábrázoló irányított gráfot használjuk az alapként a befok és a kifok meghatározásához. Az üzenetek útvonalazásának módja miatt a válaszüzenetek valójában egy olyan útvonalat követnek, amely a kérési üzenetek irányított gráfjának transzponáltja (vagy fordítottja). Ez azt jelenti, hogy a válaszüzenetek irányított gráfjában az élek iránya ellentétes a kérési üzenetekével, tükrözve az információáramlás fordított irányát.

Egy v_i csomópont befoka a DAG-ban, mint $deg^-(v_i)$ jelölve, az ebbe a csomópontba beérkező élek számát mutatja. Ez a szám azt mutatja, hogy hány csomópont küldhet közvetlenül információt v_i -nek. Egy VRN-ek szerint szervezett irányított gráfban egy adott VRN-ű v_i csomópont általában alacsonyabb VRN-ekkel rendelkező csomópontoktól kap éleket. Ez azt jelenti, hogy térbelileg közelebb vannak a fő irányítóponthoz a hálózati ugrások tekintetében. Így v_i befoka függ az alacsonyabb VRN-ekkel rendelkező közeli csomópontok számától.

Egy v_i csomópont kifoka, mint $deg^+(v_i)$ jelölve, azt mutatja, hány él indul ki v_i -ből és kapcsolódik más csomópontokhoz. Ez azt mutatja, hogy hány csomópontnak

küldhet közvetlenül információt v_i . Az irányított gráfban v_i kifoka attól függ, hogy hány magasabb VRN-nel rendelkező csomópontot ér el. Ez jelzi a csomópont szerepét az információ továbbításában a hálózaton belül.

Az FRC adatgyűjtés által biztosított szomszédsági mátrix hatékony összeállítása az adatbegyűjtés segítségével a hálózattól különösen hasznos a gráf csúcsainak befokának és kifokának leírásához. A hálózatot egy szomszédsági mátrix, A által reprezentálva, egy adott csúcs, mondjuk v_i , befoka és kifoka a mátrixban található specifikus értékek összeadásával határozható meg. A v_i befoka, ami azt jelzi, hogy hány él érkezik ebbe a csúcsba, a mátrix i -edik oszlopában található bejegyzések összeadásával számítható ki. Hasonlóképpen, a v_i kifoka, ami azt számolja, hány él hagyja el a csúcsot, a szomszédsági mátrix i -edik sorában található bejegyzések összeadásával található meg. Ezek az összegek a szomszédsági mátrix által egyértelmű és strukturált módon biztosítják a irányított gráf minden csúcsának kapcsolódási lehetőségeinek elemzését [46][58][60][72][74].

6.2.4. A Hálózatban található redundáns útvonalak

Egy egyszerű irányított útvonal a G gráfban a v_0 csúcstól egy másik v_i csúcsig úgy definiálható, mint egy olyan csúcsok sorozata, amely v_0 -nál kezdődik és v_i -nél ér véget. Ezt a sorozatot két kulcsfontosságú jellemzője határozza meg: először is, minden egymást követő csúcspár kapcsolódik irányított élekkel az élek halmazából, E -ből; másodsor, egyetlen csúcs sem kerül újbóli látogatásra ugyanazon az útvonalon belül, azaz az utak függetlenek. Egy útvonalat redundánsnak tekintünk, ha létezik több mint egy különböző egyszerű irányított útvonal, amely a v_0 csúcstól a v_i csúcsig vezet. Jelölje $R(v_i)$ a v_0 -tól v_i -ig vezető redundáns egyszerű irányított útvonalak halmazát. Legyen $P(v_i)$ az összes ilyen egyszerű irányított útvonal halmaza v_0 -tól v_i -ig. Ha ennek a halmaznak a kardinálisa, $|P(v_i)|$, egynél nagyobb, az redundáns útvonalak jelenlétét jelzi v_i csúcs esetében, amelyek a koordinátor csúcsból, v_0 -ból származnak. Egy egyszerű irányított útvonal a G gráfban a 0 csúcstól egy másik v csúcsig egy olyan csúcsok sorozata, amely 0 -nál kezdődik és v -nél ér véget úgy, hogy az egymást követő csúcsok irányított élekkel kapcsolódnak az E -ben, és egyetlen csúcs sem ismétlődik [30][46][58][60][72][74].

6.3. A hálózati kommunikáció stabilitása

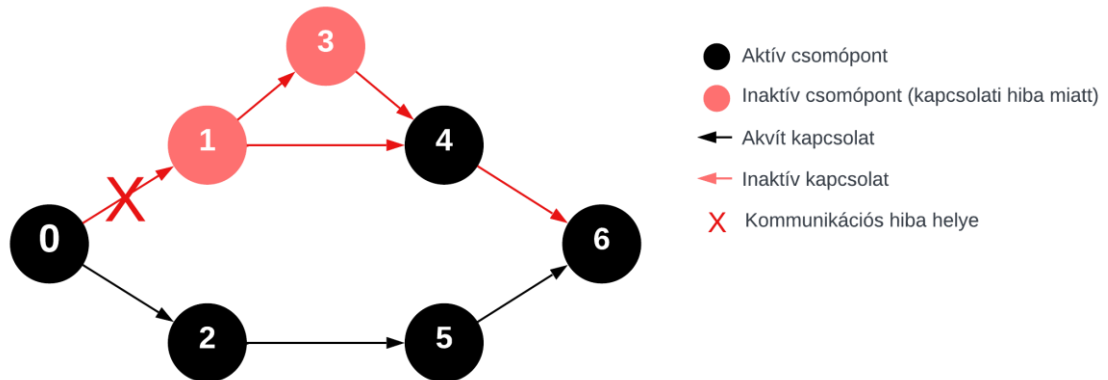
A redundáns kapcsolatok javíthatják a vezeték nélküli szensorhálózat megbízhatóságát. A redundáns kapcsolatokat matematikailag úgy fejezhetjük ki, hogy egy gráf bármely csomópontjának fokszáma nagyobb kell, hogy legyen, mint egy. A TDMA hálózatban azonban két csomópont között nincsen lehetőség csomagismétlésre, ezért az adatátviteli hibák kiküszöbölésére csak a redundáns útvonalak adhatnak megoldást, amelyeken keresztül az üzeneteket képesek fogadni [63][70].

A hálózati redundancia mértéke a vezeték nélküli hálózatok esetén a hálózattól felírt gráf K -konnektivitásával jellemezhető. A gráf összefüggősége $\kappa(G)$ vagy konnektivitása megegyezik a minimum csúcsok számával, amelyek törlésével a hálózat szétesne, azaz azt határozza meg, hogy hány csomópontnak kell működésképtelenné válnia egy hálózatban, ahhoz, hogy a hálózat szétesen. A K -konnektivitás megfelelő metrika lehetne a stabilitás meghatározásához, ha a gráf irányítatlannak lenne tekinthető. Az időosztásos közeghozzáférés alapú elárasztásos útválasztás alkalmával viszont a kérés és válasz üzenet esetén a hálózatban az üzenetnek meghatározott iránya van, így a hálózat irányított gráffal modellezhető. Az elárasztásos útválasztás a VRN számok sorrendjében történő üzenetismétléssel valósul meg. Ennek megfelelően az üzenetek továbbítási sorrendje csak növekvő sorrendben történhet, ezért a gráf minden esetben körmentes irányított gráf [57][58][60][73].

A hálózati kommunikáció stabilitására azonban nincs olyan mérőszám, ami kifejezné, hogy a telepített hálózat mennyire lesz megbízható a működése során. Figyelembe véve a szövevényes hálózatnak köszönhető redundanciák számát. Az MDC és FRC adatgyűjtési eljárás alkalmazására ezért egy olyan mérőszám bevezetésére tesztek javaslatot, amely segítségével a kommunikáció stabilitása mérhetővé válik. Ezen metrika segítségével értékelhetővé válik a hálózat képessége a kapcsolati hibák elviselésére és a stabil kommunikáció fenntartására.

A 23. ábra látható egy hálózat, ami egy hibát demonstrál a koordinátor és az v_1 csomópont között. Az ábrából is jól látható, hogy a konnektivitás a stabilitás jellemzésére nem lesz alkalmas, mivel a v_3 csomópont nem fogja megkapni az üzenet. Ugyan csak egy csomópont kerül a gráfból törlésre, azonban a gráf szétesik. A v_4 csomópont azért kapja

meg, mert a v_6 csomóponttól képes fogadni, viszont ismételni már nem tudja mivel a számára dedikált időrés már elmúlt.



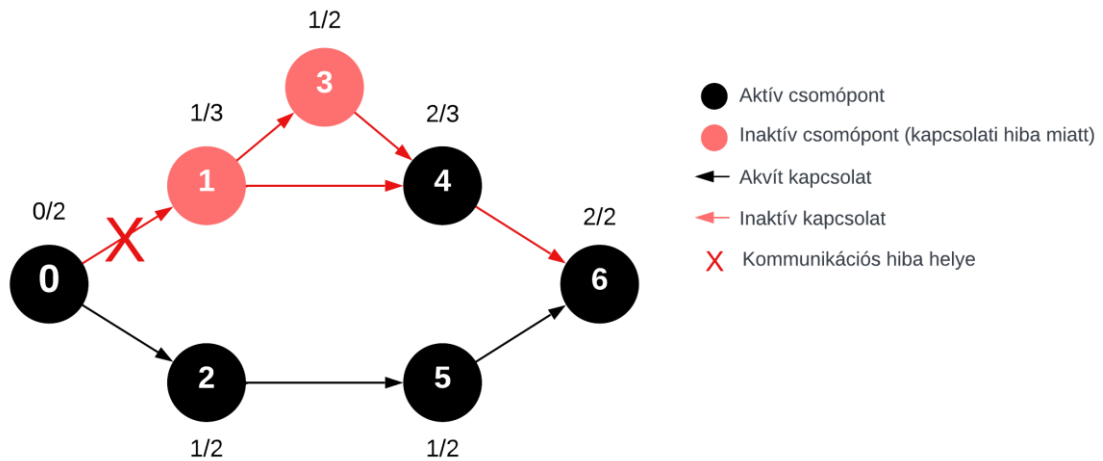
23. ábra Vezeték nélküli hálózat egyetlen hálózati hibával az útválasztási kérés üzenet küldése közben

A hálózati stabilitás mértékének egy olyan mérőszámot kívántam meghatározni, ami kifejezi, hogy a hálózat egyszeri adatátviteli hiba esetén mennyire marad stabil. A stabilitási mérőszám így egyben azt is ki tudja fejezni, hogy a hálózat hány adatátviteli hiba esetén maradhat még működőképes.

6.3.1. Csomópont stabilitása

Mivel a hálózat egy gyengén összefüggő irányított gráffal reprezentálható, ezért feltételeztem, hogy a csomópontokra meghatározott stabilitás alapján megadható a teljes hálózatra jellemző stabilitás mértéke. Az üzenet küldése a VRN számok növekvő sorrendjében történik. Ezért egy adott csomópont annyi más csomóponttól képes az üzenetet megkapni és továbbítani, amennyi nála alacsonyabb VRN számú csomóponttal áll kapcsolatban. A hálózat gráf modelljében ez a csúcs befokának felel meg, amelyet $\text{deg}^-(v)$ jelölünk. A csúcs fokszáma pedig azt határozza meg, hogy hány helyről képes fogadni az üzenetet attól függetlenül, hogy képes vagy sem az üzenet továbbítására. Az alábbi ábrán minden csúcs felett jelöltem az adott csúcs befokát és fokszámát: $\text{deg}^-(v)/\text{deg}^+(v)$ formátumban. Mivel definíció szerint $\text{deg}(v) = \text{deg}^-(v) + \text{deg}^+(v)$, ezért ha egy

csomópontnak meghatározható a fokszáma és befoka, akkor ezen információkból az adott csúcs kifoka is.



24. ábra A hálózati csomópontok felett a csúcsok befoka/foka

A 24. ábra az látható, hogy $\deg^-(v) < 2$ bármely csomópont számára azt jelenti, hogy nem rendelkezik redundáns kapcsolattal az üzenet fogadásához. Az időosztásos üzenettovábbítás tulajdonságai miatt megállapítható, hogy a kérés broadcast-üzenet továbbítása során a hálózatban minden csúcsra igaz, hogy a befoka nem lehet nagyobb a VRN számánál:

$$\deg^-(v) \leq \text{VRN}(v) \quad (22)$$

Az ábrán jelölt adatátviteli hiba v_0 és v_1 között azt eredményezi, hogy az üzenetküldés során, a u_1 és u_3 nem fogják megkapni az üzenetet mivel befokuk egy és nincs alternatív kapcsolat, ahonnan az üzenetet megkaphatják.

$$S_i = \deg^-(v_i) \quad (23)$$

A csomópontra megállapítható, hogy a stabilitása, amit jelöljön S_i stabilitási tényező, megfeleltethető a csúcs befokával. A csúcs befoka azt határozza meg mekkora redundanciával rendelkezik az adott csomópont, az üzenetet hány eszköztől képes fogadni miután még képes továbbítani a hálózat további részének.

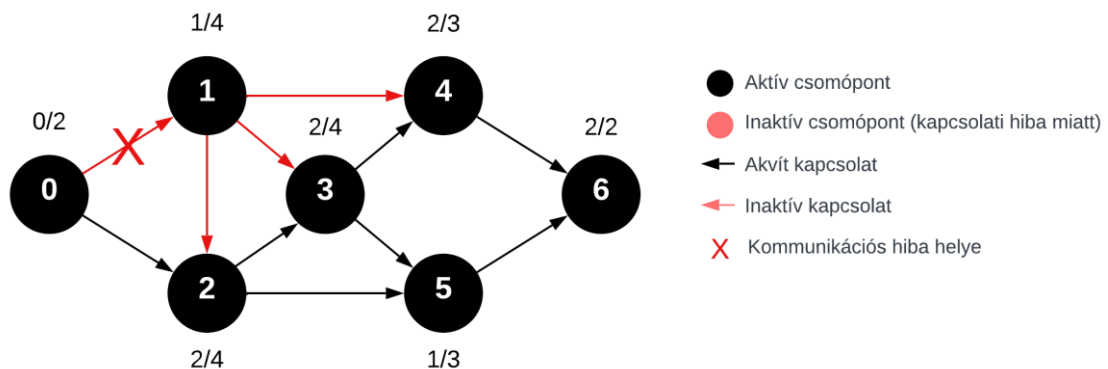
6.3.2. Hálózat stabilitása

A hálózati stabilitás azt fejezi ki:

- hogy a hálózat egyszeri adatátviteli hiba esetén mennyire marad stabil, illetve,
- hogy a hálózat hány adatátviteli hiba esetén maradhat még működőképes.

A teljes hálózatra vonatkoztatott stabilitás meghatározásához meg kell vizsgálni azt, hogy a csomópontokra vonatkoztatott stabilitás miként befolyásolja a hálózatokra vonatkoztatott stabilitást. A csomópont stabilisából következik, hogy koordinátornak befoka nulla, a v_1 legnagyobb befoka nem lehet nagyobb egynél, v_2 kettőnél és így tovább. Mivel a hálózat elején található csomópontok befoka nem lehet nagyobb, mint a VRN ezért ezek redundanciája nem növelhető a VRN fölé. A csomópontokra vonatkoztatott stabilitást úgy határoztam meg, hogy azon kapcsolatok száma adja meg, hogy hány helyről képes úgy fogadni üzenetet úgy, hogy még képes legyen továbbítani is.

A 25. ábra a korábban bemutatott hálózat annyiban került módosításra, hogy a v_3 csúcs áthelyezésre került. Az újonnan kialakult hálózatban a csúcsok befoka a minimum kettőre változott a v_1 csomópont kivételével. Az előző hálózatban látható volt, hogy a koordinátor és a v_1 csomópont közötti adatátviteli hibája esetén kettő csomópont is kiesett a hálózatból. A módosított hálózatban viszont ugyanazon hiba ellenére a hálózat minden eleméhez el tud jutni az üzenet.



25. ábra A módosított vezeték nélküli hálózat egyetlen hibával az útválasztási kérés üzenete közben

A sikeres üzenetküldés a módosítást követően annak ellenére sikeres volt, hogy a hiba ugyanott keletkezett a hálózatban. Ennek oka, hogy az üzenet más útvonalon képes volt eljutni minden csomóponthoz. Érdeemes észrevenni, hogy a csomópont stabilitási kritériumnál megfogalmazott többszörös redundancia a v_1 esetén nem tud teljesülni ellenben a hálózatban az üzenetet képes fogadni. A jelen példában a v_2 utána a v_3 adatküldésekor képes fogadni az üzenetet. Az üzenetet tehát egy magasabb VRN számú csomóponttól képes fogadni és a hálózat többi eleme a hiba ellenére is képes továbbítani az üzenetet így a teljes hálózatra vonatkozó stabilitás teljesül, a hálózat rendelkezik redundanciával. Az egyszeres hibát a hálózat bármely pontján szimulálva hasonló eredményre jutunk. Ez azt jelenti, hogy amennyiben bármely él megszűnik az üzenet abban az esetben is el tud jutni mindegyik csomóponthoz.

Ezek alapján megfogalmazható, hogy a teljes hálózatra vonatkozó stabilitás úgy határozható meg, hogy az megegyezik a hálózati csomópontok befokának minimumával azzal a kitéttel, hogy a stabilitás mértékénél nem nagyobb VRN számú csomópontok stabilitása meg kell egyezzen, ellenkező esetben a stabilitás ezek minimuma lesz. A fenti példában ez az érték $S_n=2$ mivel a $\min\{\deg^-(v)\}=2$ és az ennél kisebb VRN számú csomópont, v_1 és v_2 esetén $\deg^-(v)=VRN$. Ha a v_1 és v_2 csomópont között nem lenne él akkor $\deg^-(v_2)=1$ és a hálózatra vonatkozó stabilitás úgy $S_n=1$ lenne. A koordinátor a forrás csúcs, ezért nem rendelkezhet befokkal és az adattovábbítás szempontjából nem releváns.

$$\text{Legyen } D^- = \{\deg^-(v_0), \deg^-(v_1), \dots, \deg^-(v_N)\}$$

a hálózatból felírt gráf csúcsainak befokai a csúcsok VRN számainak sorrendjében. A hálózatra felírható stabilitási tényező:

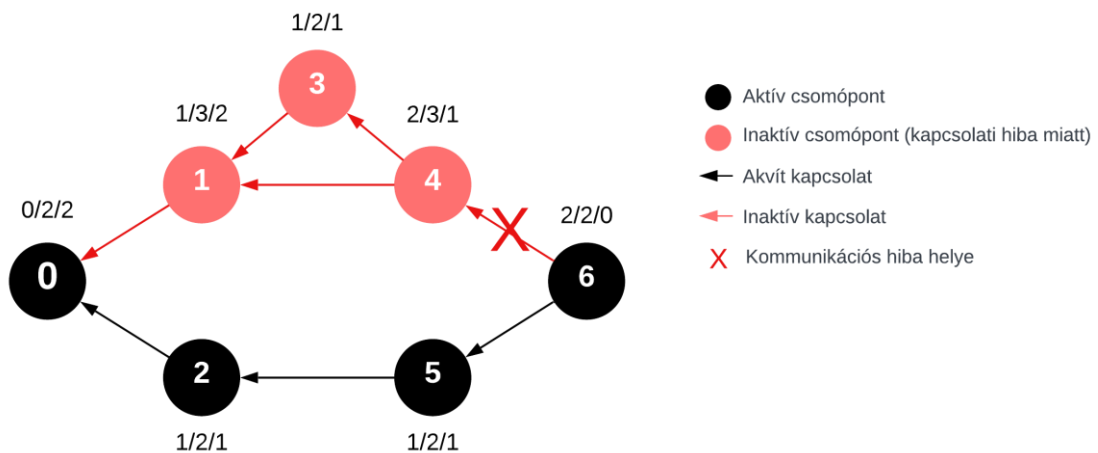
$$S_n = \min \{d_i \mid d_i \in D^-, d_i < i, 0 \leq i < N\} \text{ ha } d_i \text{ létezik ilyen } d_i$$

$$S_n = \max \{d_i \mid d_i \in D^-, 0 \leq i < N\} \text{ egyébként}$$

Ez azt mondja ki, hogy S_n az d_i halmazának minimuma, ahol d_i egy eleme D^- -ben, és kisebb, mint az i indexe, és $i \in \mathbb{N}$ (természetes szám), értéke 0 és N között van és i a VRN számot jelöli. Ha nem létezik ilyen d_i , akkor S_n a d_i halmazának maximuma. Ez azt jelenti, hogy a stabilitási tényezőt azon csúcsok legkisebb befoka határozza meg,

amelyeknek a befoka kisebb, mint a saját VRN számuk. Azokban az esetekben, amikor a csúcsok befoka kisebb, mint a VRN-jük, a hálózat stabilitása az első olyan csúcs befokától függ, amely kielégíti ezt a feltételt, ezzel kvantitatív mértéket biztosítva a hálózat stabilitására. Ez meghatározza a hálózat stabilitását, amely magában foglalja a befokok és a VRN közötti kapcsolatot, alapot biztosít a hálózati kommunikációs utak robusztusságának és megbízhatóságának értékelésére és esetleges javítására.

A válaszüzenet esetén az üzenet áramlása ellentétes irányú lesz a kérés üzenethez viszonyítva. A csomópontok fokszáma ilyenkor úgy változik, hogy a korábbi csúcs befoka meg fog egyezni a csúcs kifokával. A 26. ábra látható a módosítás előtti hálózatban a válaszüzenet küldésekor kialakuló gráf egyetlen kapcsolat meghibásodásával a 4-es csomópontnál a válaszüzenet továbbítása során, amely több csomópontot is érint. A válaszüzenet haladásának megfelelő fokszámok $\text{deg}^+(v)/\text{deg}(v)/\text{deg}^-(v)$ formátumban kerültek jelölésre a csúcsok felett.

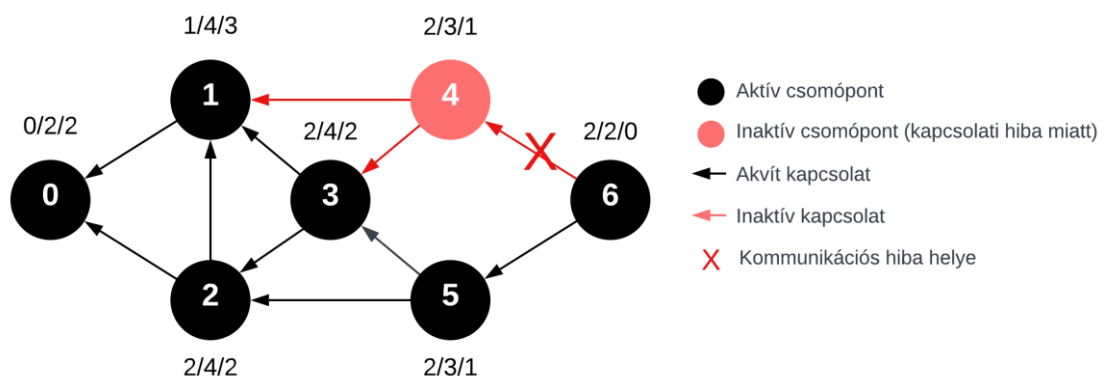


26. ábra Vezeték nélküli hálózat egyetlen kapcsolat meghibásodásával a 4-es csomópontnál a válaszüzenet továbbítása során több csomópontot is érint

Implementációtól függően a válaszüzenet továbbításakor egy csomópont képes lehet a korábbi válaszüzenet fogadása nélkül is elküldenie az üzenetét [30]. Erre azért van lehetőség, mivel a TDMA közeghozzáférésnek köszönhetően minden csomópont tudja, hogy a csomag mérete alapján mikor kerül sorra az időrése. Az üzenetek a válasz

továbbítása során összefűzésre kerülnek, tehát egy eszköz kiesése esetén a további eszközök képesek lehetnek küldeni a választ attól függetlenül is, hogy fogadták-e a válaszüzenetet korábban vagy sem. A másik implementáció, hogy a válaszüzenetet mindenképpen fogadni kell egy csomópontnak mielőtt összefűzné és továbbítaná azokat. A hálózati stabilitás szempontjából ez kedvezőtlenebb ezért ezt a változatot fogjuk vizsgálni.

Az 26. ábra látható, hogy a válaszüzenet küldésekor kialakuló egyszeres hiba esetén a hálózat egy jelentős része kieshet az üzenettovábbításból, melynek oka a redundáns útvonalak hiánya. Ha megvizsgáljuk, hogy a módosított hálózat miként viselkedik, azt láthatjuk ahogy a 27. ábra látható, hogy ugyanazon hiba ellenére hálózatban csak az érintett csomópont esik ki az üzenettovábbításból és a hálózat további elemei nem estek ki a küldési folyamatból. A küldési folyamatra felírt stabilitási kritérium a válasz üzenet továbbításakor is teljesíti az elvárt követelményeket. A kérés esetén ugyanazon kritérium az üzenet fogadására értelmezhető, a válasz esetén pedig a küldésre, azaz a hibát ugyanazon él megszűnése váltja ki. A hálózat szempontjából az a különbség, hogy az adott eszköz nem fog tudni részt venni az adattovábbításban, de a hálózat többi elemét nem érinti a hiba. A válaszüzenet végig tud haladni a hálózaton a hiba jelenlétének ellenére is.



27. ábra A módosított hálózat egyetlen kapcsolat meghibásodásával a 4-es csomópontnál a válaszüzenet küldése során, amely csak egyetlen csomópontot érint

Egyszeres hiba alkalmával a kérés üzenet továbbítása esetén képes visszahallani egy másik csomóponttól csak nem ismételi meg, ha kisebb a VRN száma, azaz az útválasztásban nem vesz részt, de ha a kérést egy másik csomóponttól megkapja az adatgyűjtésben továbbra is részt tud venni. A válasz üzenet továbbítása esetén viszont az MDC használatával előfordulhat, hogy a hálózat bizonyos részeiből egyszeri hibával nem jut el az adat a koordinátorhoz. Az FRC-ben alkalmazott szomszédsági adatküldésnek köszönhetően viszont eljuttathatóak az adatok a koordinátorhoz.

6.4. A stabilitási tényező

Az S_n stabilitási tényező meghatározása a leggyengébb kapcsolaton alapul a befok és a VRN viszonylatában. Más szóval, az IQRF hálózat stabilitása nagymértékben függ az S_n stabilitási tényezőjétől, amely összefügg az elárasztásos útvonalakkal. Az redundáns útvonal a hálózatban egy alternatív útvonalat jelent egy ponttól, v_0 -tól, egy másikhoz, v_i -ig, amely nem ismételi meg a csúcsokat az útvonal mentén. Minél több ilyen alternatív útvonal létezik, annál több lehetősége van a hálózatnak az adatok küldésére, növelve annak megbízhatóságát.

A stabilitási tényező bizonyításának a lényege az, hogy egy csomópont bejövő kapcsolatainak (befok) száma mindig kevesebb vagy egyenlő a különböző módon az adatok elérhetik. Egy G hálózati gráfban egy elárasztásos útvonalat egy különálló, egyszerű irányított útvonalként definiálunk a kiindulási csúcstól, v_0 -tól egy másik csúcsig, v_i -ig. Ezt az útvonalat két kulcsfontosságú jellemző jellemzi: először is, az útvonalon lévő összekapcsolt csúcspárok irányított élekkel vannak összekötve, biztosítva egyértelmű irányt v_0 -tól v_i -ig; másodsor, egyetlen csúcs sem kerül újbóli látogatásra ugyanazon az útvonalon belül. Egy útvonalat függetlennek tekintünk, ha több mint egy különböző útvonal létezik v_0 -tól v_i -ig, alkotva egy $R(v_i)$ ilyen útvonalak halmazát [60][72][74].

Minden él, amely hozzájárul a $\deg^-(v_i)$ értékéhez, egy kapcsolatot jelent valamilyen megelőző csúcstól az irányított gráfban v_i -ig. Ezek az élek azoknak az útvonalaknak a végpontjai, amelyek v_0 -ból indulnak és köztes csúcsokon keresztül érkeznek v_i -hez. Ha a $\deg^-(v_i) > 1$, az azt jelzi, hogy több él érkezik v_i -hez, mindegyik potenciálisan egy különálló útvonal végét jelenti v_0 -tól. Mivel ezek az útvonalak v_0 -ból

indulnak és v_i -nél találkoznak, a több ilyen útvonal jelenléte redundancia lehetőségét sugallja. A v_i -nek lehetséges maximális elárasztásos útvonalainak száma, $|R(v_i)|$, egyenlő a $\deg^-(v_i)$ -vel. Az IQRF hálózatokban, ahol $\deg^-(v_i) \geq i$, a csomópont maximális befoka i , ahol i az adott csomópont VRN száma [30][46]. Ez a bizonyítás azt mutatja, hogy minden IQRF hálózatban, ahol minden csomópont routerként működik, az S_n stabilitási tényező jelzi egy minimális elérhető redundancia szintet a hálózati kapcsolatokban bármely csomóponthoz a koordinátortól.

Annak bizonyításához, hogy az S_n stabilitási tényező univerzálisan alkalmazható minden IQRF hálózaton, fontos megvizsgálni annak meghatározásának és következményeinek részleteit. Az S_n stabilitási tényezőt úgy határozzuk meg, mint a legkisebb befok a befokuknál kisebb VRN-nel rendelkező csúcsok között. Lényegében ez azt jelenti, hogy minden, az üzenetek útvonalazásában részt vevő hálózati csomópontnak legalább S_n redundáns útvonala kell, hogy legyen a koordinátor, v_0 és egy adott csomópont, v_i között.

Az irányított gráfban a befok fogalma egyértelmű: az adott v csúcsba bejövő élek számát jelöli. Egy 0 csúcstól v csúcsig vezető elárasztásos útvonal egy egyszerű irányított útvonal, amely legalább két különböző egyszerű irányított útvonal egyike 0 -tól v -ig. Vegyük figyelembe a G irányított gráf bármely v csúcsát. Jelöljük a v csúcs befokát $\deg^-(v)$ -vel, és a 0 csúcstól v csúcsig vezető elárasztásos egyszerű irányított útvonalak halmazát $R(v)$ -vel. Célunk, hogy megállapítsuk, hogy $\deg^-(v) \leq |R(v)|$ halmazát [60][62][72][74].

A v csúcsba v vezető élek elemzésével megfigyelhető:

- Ha a 0 -tól v -ig vezető útvonal kizárólag egy adott bejövő élre támaszkodik a v csúcsba, akkor ez az útvonal nem redundáns, mivel nincs alternatív útvonala, amely ezt az élt magában foglalná.
- Ezzel szemben, ha egy bejövő él a v csúcsba több 0 -tól v -ig vezető útvonalat is magában foglal, mindegyik ilyen útvonal redundánsnak minősül, tekintettel arra, hogy másik útvonal is használja ugyanezt az élt halmazát [62][72].

- Tehát minden bejövő él a v csúcsba hozzájárul legalább egy útvonalhoz az $R(v)$ halmazban. Bár néhány él része lehet ugyanannak az útvonalnak az $R(v)$ -ben, egyik sem járulhat hozzá egy olyan útvonalhoz, amely kívül esik az $R(v)$ -n, anélkül, hogy ezt az útvonalat redundánssá tenné.
- Következésképpen a v csúcsba bejövő élek teljes száma (azaz $\deg^-(v)$) nem haladhatja meg az $R(v)$ halmazban lévő redundáns útvonalak számát, mivel minden él hozzájárul az $|R(v)|$ teljes számához [62][72].

Ez alátámasztja, hogy $\deg^-(v) \leq |R(v)|$, megerősítve, hogy a gráf bármely v csúcsának befoka mindig kevesebb vagy egyenlő a 0-tól v -ig vezető redundáns egyszerű irányított útvonalak számával. Ez a következtetés azon a feltételezésen alapul, hogy a redundáns útvonalak legalább két különböző útvonalat birtokolnak, amelyek közül legalább egy közös élt használnak.

A hálózat stabilitására vonatkozóan mind az élek, mind a csomópontok hibái hatással vannak. Azonban a csomópontok hibái kritikusabbak, mivel ezek zavarják a csomópontot és az összes kapcsolódó élt, potenciálisan nagyobb hatást gyakorolva, mint egyetlen él hibája. A hálózatban több különböző útvonal léte biztosítja, hogy a forgalom átirányítható legyen, ha egy útvonal használhatatlanná válik egy él vagy csomópont hibája miatt. Egy irányított gráfban egy csomópont hibáját az adott csomópont összes bejövő és kimenő éleinek hibájaként lehet ábrázolni [60][61][62]. Az IQRF hálózatokban, ahol a csomópontok rendezettek, egy v_i csomópontban bekövetkező hiba hatással van a következő v_j csomópontokra (ahol $j > i$), ami alacsonyabb befokot eredményez ezekben a csomópontokban. Ahogy már megállapítottuk, a gráf bármely v csúcsának befoka korlátozva van a 0-tól v -ig vezető redundáns irányított útvonalak számával. Ha egy csomópont hibája érinti az $R(v)$ halmazban lévő bármely útvonalat a 0 és v csúcsok között, az csak egy útvonalat érint, csökkentve az $|R(v)|$ számot [62][72]. Azonban, ha $|R(v)| > 0$ a hiba után, a hálózat működőképes marad. A hálózat stabilitási tényezője, S_n jelzi annak képességét, hogy elviseljen akár $S_n - 1$ kapcsolati hibát, feltételezve, hogy legalább S_n redundáns útvonal van a koordinátor v_0 és egy adott v_i csomópont között.

A hálózati topológiában jól megalapozott elv, hogy egy adott csúcs befoka nem haladja meg az adott csúcs számára rendelkezésre álló független útvonalak számát. Ez az

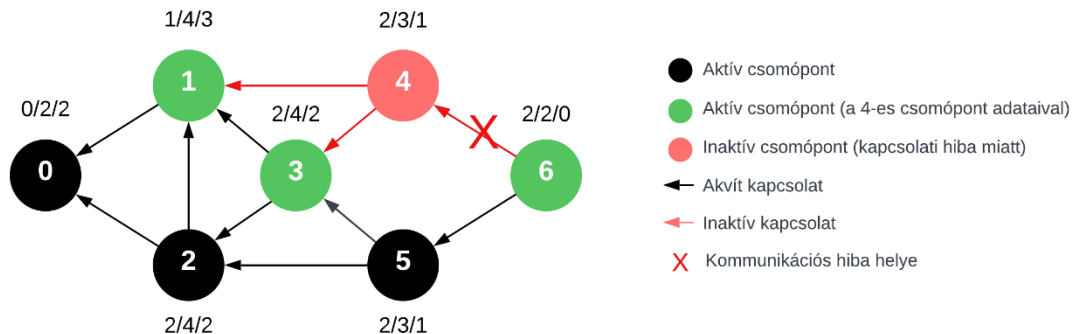
elv azt állítja, hogy egy hálózati csomópont bejövő kapcsolatainak (befok) teljes száma mindig egyenlő vagy kevesebb, mint a különböző útvonalak összege, amelyeken keresztül az adatokat erre a csomópontra adat továbbítható [60][72][74].

6.5. Adatgyűjtés stabilitása

A hálózati stabilitási tényező tehát meghatározza, hogy a hálózati kommunikáció hányszoros hálózati hiba esetén maradhat még működőképes viszont az összefűzött adatgyűjtési eljárás tulajdonságából adódóan a cél az, hogy minden hálózati eszköz adata eljusson a hálózati koordinátorhoz és nem a hálózat összes eleme közötti adatkapcsolat garantálása. A hálózatból történő adatgyűjtést azonban mindkét hiba befolyásolja, mivel a hiba esetén lesz olyan csomópont, amelynek adatai nem jutnak el a hálózati koordinátorhoz. Ennek figyelembevételével az adatok begyűjtésére is meghatározható egy stabilitási tényező. Az MDC adatgyűjtési folyamat esetén ez azt jelenti, hogy a stabilitási tényezőnek a hálózat hibatűrésénél egyel nagyobb értékűnek kell lennie, mivel a kétszeres redundancia egyszeri hiba esetén csak a hálózat további működését garantálja azonban adatvesztéssel járhat. Az MDC eljárás esetén tehát a hálózatra felírható adatgyűjtési stabilitási tényező:

$$S_{\text{MDC}} = S_n - 1 \quad (24)$$

Az FRC-nél alkalmazott közbenső szomszédos adatmegosztás fázisban a csomópontok minden szomszédos csomópontnak elküldik az adataikat. Ez azt jelenti, hogy az adatot $\text{deg}(u_n)$ szomszédos csomópont kaphatja meg. Amennyiben a hálózatra teljesül az $S_n > 1$ akkor ezen fázisban minden csúcsra igaz, hogy $\text{deg}(u_n) > 1$ azaz minden csomópont legalább 2 eszközzel képes megosztani az adatát. Az adatgyűjtés stabilitása szempontjából ez azt jelenti, hogy egy hálózati hiba esetén lesz egy másik olyan csomópont, amely rendelkezik a hiányzó adattal. A 28. ábra szemléltetve mutatja, ha a korábbi hibát feltételezzük és $S_n = 2$ teljesül, akkora FRC folyamatban a zölddel jelölt pontok rendelkeznek kiesett csomópont adatával, ezáltal adatvesztés nem fordul elő.



28. ábra A módosított hálózat egyetlen link meghibásodásával a 4-es csomópontnál a válaszüzenet küldése során FRC adatgyűjtéssel. Az 1., 3. és 6. csomópont (zölddel kiemelve) sikeresen rögzítette a 4-es csomópont adatait a beacon-fázis során küldött adatokat.

Szemben az MDC-vel amennyiben a hálózat a hálózati stabilitási kritériumnak eleget tesz, akkor az adatgyűjtésre már az adott stabilitás mellett elérhető a kívánt szint. Ennek megfelelően az FRC adatgyűjtési eljárásra felírható adatgyűjtési stabilitási tényező:

$$S_{dFRC} = S_n \quad (25)$$

A stabilitási tényező meghatározásával a hálózat tervezői és üzemeltetői értékelhetik a hálózat megbízható és folyamatos kommunikációs képességét. Minél magasabb a stabilitási faktor, annál több redundáns kapcsolat áll rendelkezésre a hálózaton belül, ezáltal növelve a hálózat képességét a kapcsolati hibák elviselésére és helyreállítására. A kommunikációs kapcsolatok stabilitása az érzékelőhálózatokban kulcsfontosságú a megbízható adatátvitel és a hálózati kapcsolódás szempontjából. A hálózat redundancia-mutatói, például a redundáns kapcsolatok száma és a redundáns kapcsolatok, kapcsolódva az adattovábbítási irányhoz, fontosak a hálózat stabilitásának értékelésében. A kutatási eredmények hozzájárulnak a megbízható vezeték nélküli érzékelőhálózatok tervezéséhez és üzemeltetéséhez, különösen az összefűzött adatgyűjtési eljárások esetén. A stabilitási tényező meghatározásával és a hálózat redundanciájának értékelésével betekintést nyerhetünk a vezeték nélküli érzékelőhálózatok tervezéséhez és fejlesztéséhez, biztosítva a megbízható és hatékony adatátvitelt különböző alkalmazásokban.

A stabilitási tényező hasznos mértéke lehet a hálózati telepítések tervezésében, betekintést nyújtva az elérhető stabilitásba. Ez a mérőszám segítséget nyújt a tervezési folyamatban; például, ha a telepítési környezet megköveteli a kommunikációs linkek redundanciájának növelését, a stabilitási tényező iránymutatást adhat a hálózati eszközök elhelyezéséhez a kívánt stabilitás eléréséhez. Általánosságban egy stabilitási tényező (S_n), ami nagyobb, mint 1, elegendő, de ez függ az adott alkalmazástól. Azok a csomópontok, melyeknek a bejövő fokszáma kisebb, mint a VRN-jük, könnyen azonosíthatóak. A csomópontok bejövő fokszámának növelése attól függ, hogy milyen mértékben lehetséges a vezeték nélküli eszközök újra pozicionálása vagy további eszközök hozzáadása a hálózatához. Habár több eszköz hozzáadása növelheti a hálózat stabilitását, ez hosszabb adatgyűjtési időkhöz és megnövekedett energiafelhasználáshoz vezethet.

ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

2. Tézis

A szövevényes időosztásos vezeték nélküli szenzorhálózatokban összefűzött adatgyűjtési eljárás alkalmazása esetén az adott hálózat stabilitása leírható egy stabilitási tényezővel.

2.1 Altézis

Meghatároztam a hálózatban a hálózati kommunikáció kérés- és válaszüzenet továbbítására felírható stabilitási tényező meghatározásához szükséges feltételeket.

2.2 Altézis

Meghatároztam a hálózatban az összefűzött adatgyűjtés eljárás alkalmazása esetén felírható adatgyűjtési stabilitási tényezőt.

2.3 Altézis

Meghatároztam a hálózatban az FRC eljárás alkalmazása esetén felírható adatgyűjtési stabilitási tényezőt.

A témában megjelent publikációk: [S1][S5][S7]

7. HÁLÓZAT FELTÉRKÉPEZÉSE

A vezeték nélküli hálózat telepítése után a hálózat a discovery eljárás során a hálózatot a VRN számok kiosztására. Ezen folyamat során csak az útválasztáshoz szükséges kapcsolatok válnak detektálhatóvá. A szélességi keresés algoritmus, amelyet a folyamat alkalmaz, lehetővé teszi a hálózati csomóponttól adott rádiós hatótávon belül elhelyezkedő eszközök feltérképezését [31][46]. Ezen információk alapján a hálózat feszítőfája felírható. Ez teszi lehetővé a hálózati topológia megismerését, amely magában foglalja az eszközök távolságát a hálózati koordinátortól, valamint a hálózati kapcsolatokat az eszközök között. Ezen információ elegendő a hálózati kommunikációhoz, mivel a hálózat rendelkezik a feszítőfa struktúrával, viszont a bonyolult hálózati topológia alakulásához használt kapcsolatok ezen fázisban még nem láthatóak.

A hálózat feltérképezésének célja a teljes hálózat kapcsolati struktúrájának leképzése. A teljes hálózati topográfia feltérképezéséhez a koordinátornak információkat kell gyűjtenie a csomópontok szomszédságáról, annak meghatározására, hogy mely csomópontok vannak a rádiós hatótávolságukon belül. A hálózat feltérképezésének tehát az a célja, hogy egy reprezentatív gráfot lehessen létrehozni a hálózatról, vagyis a hálózatból felírható gráf szomszédsági mátrixa előállítható legyen. Amennyiben a hálózat egyes eszközei képesek detektálni a szomszédságában található eszközöket és ez az információ eljuttatható a koordinátorhoz akkor a hálózat teljes feltérképezésére van lehetőség. A hálózat feltérképezése során a hálózatból felírt gráf irányítatlan gráfnak tekinthető, mivel a cél a hálózati eszközök kapcsolatainak feltérképezése. Az eszközök önmagukkal nem képesek kommunikálni és többszörös élt sem tartalmazhatnak, ezért a gráf bizonyosan egyszerű gráfnak tekinthető, mivel hurokélet nem tartalmaz. Ezek alapján a hálózatot reprezentáló gráf szomszédsági mátrixa A , amelyben $a_{ij}=1$ ha v_i csomópont hatótávolságon belül található v_j csomóponttal és 0 ha nem.

A szomszédsági mátrix szimmetrikus és a fő átlójának minden eleme zérus. A szimmetriának teljesülnie kell a feltérképezés során is, mert feltételezzük, hogy a hálózat homogén eszközökből épül fel ezáltal a hatótávolságuk kölcsönösen azonos. Amennyiben

ez a feltétel nem teljesül az a későbbiekben hibadetektálásra is felhasználható, mivel feltételezhető kommunikációs zavar vagy egyéb hálózati probléma.

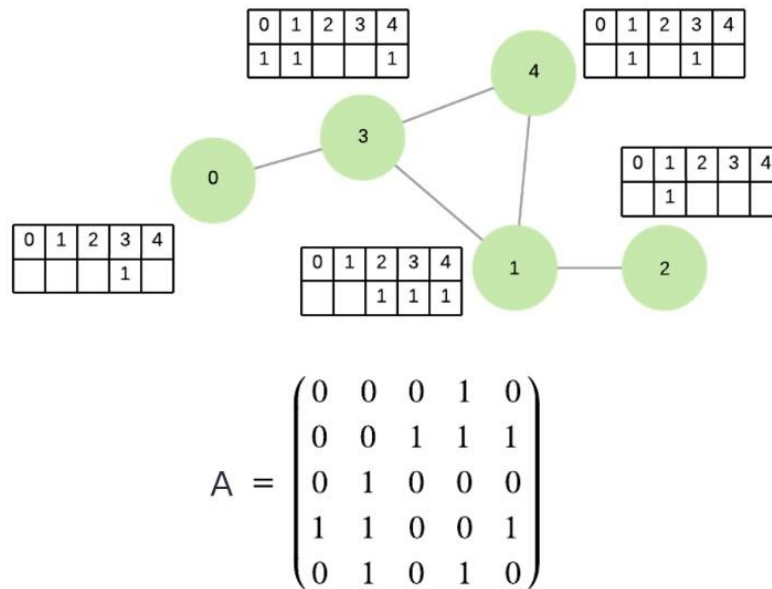
A szomszédsági mátrix sorait a fent leírtak alapján a hálózati eszközök által detektált szomszédos eszközök bit térképével lehetséges reprezentálni. A cél tehát a hálózat feltérképezésére ezen bittérkép előállítására és a koordinátorhoz történő eljuttatására.

Egy lehetséges megoldás a feltérképezésre valamely adatgyűjtési eljárás módosításával lehetséges. A feltérképezés a következő lépésekkel hajtható végre:

- Térképezési kérésüzenet küldése minden hálózati eszköz számára.
- Minden csomópont küld egy üzenetszórás jellegű üzenetet a szomszédos eszközöknek, amelyek regisztrálják mely eszközöktől érkezett üzenet
- Szomszédsági adatok begyűjtése minden eszköztől

Az 29. ábra egy példán keresztül bemutatva látható, hogy miután a csomópontok elküldték a szomszédjaik számára az üzenetet és regisztrálták, előáll az a bittérkép az eszközökben, amely a szomszédsági mátrix sorait tartalmazza. Az eszközökből ezt követően szükséges a bittérképet eljuttatni a koordinátorhoz. A koordinátorban a beérkező sorokból ezután már összeállítható a szomszédsági mátrix.

Miután a szomszédsági mátrix sorai rendelkezésre állnak azok begyűjtésére van szükség. A hálózati üzenet mérete korlátos ezért olyan adatgyűjtési eljárást célszerű alkalmazni, amely képes a szükséges méretű bittérkép továbbítására. Az IQRF hálózatok esetén a maximális hálózat mérete 239 lehet. Ezt alapul véve a bittérkép 30 bájtban ábrázolható, amelynek mérete természetesen kisebb hálózatok esetén csökkenthető.



29. ábra Hálózati feltérképezés eredménye összefűzött adatgyűjtéssel, a szomszédsági mátrixszal a hálózati koordinátorban

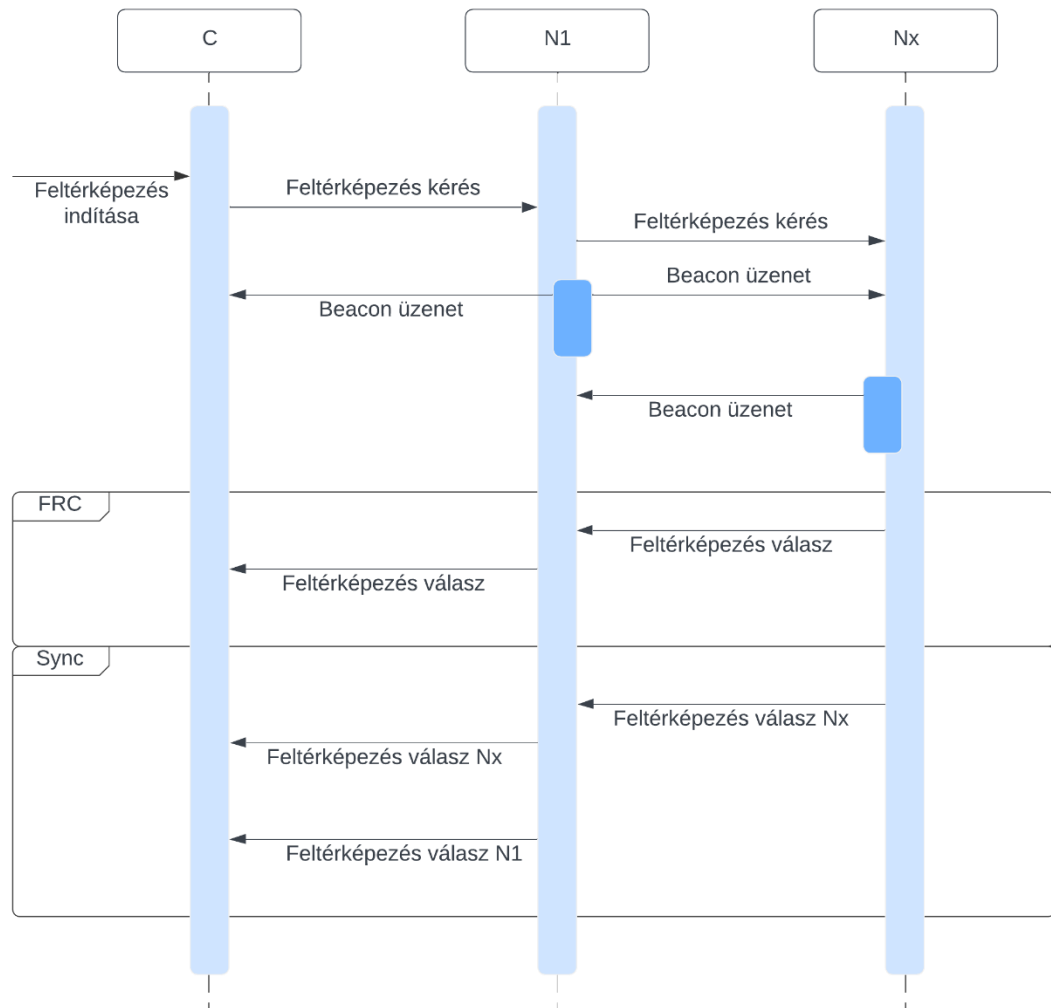
Az 30. ábra látható módon lehetséges ábrázolni egy eszköz által detektált szomszédos eszközöket egy bittérképen. Az ábrán látható, hogy az előző példában bemutatott 1-es hálózati című hálózati eszköz az 2,3,4 hálózati című eszközökkel közvetlenül szomszédos.

0. bájt								1. bájt								29. bájt								
C	N01	N02	N03	N04	N05	N06	N07	N08	N09	N10	N11	N12	N12	N14	N15	...	N233	N234	N235	N236	N237	N238	N239	
0	1	2	3	4	6	6	7	0	1	2	3	4	6	6	7	...	0	1	2	3	4	6	6	7
		1	1	1																				

30. ábra Szomszédos eszközök bittérképes ábrázolása a válaszüzenetben

Ahogy az a korábbiakban már ismertetésre került az adatgyűjtési módszereknek vannak korlátjai a maximális adatméretre vonatkozóan. Az IQRF hálózati üzenet maximális mérete 64 bájt, a DPA hálózati keretrendszer esetén pedig csak 56 bájt a hálózati üzeneteknek és 64 bájt a FRC adatgyűjtési eljárás esetén. A polling és a szinkronizált válaszüzenet küldésekor 56 byte használható eszközönként az FRC esetén viszont maximum 1,2 vagy 4 byte. Más szóval, az FRC nem használható korlátozások nélkül a teljes hálózat térképezéséhez. A polling és a szinkronizált válaszüzenet

adatméretben megegyezik, viszont utóbbi gyorsabb begyűjtést tesz lehetővé ezért a szinkronizált adatgyűjtési módszer lehet megfelelő a szomszédsági mátrixának sorainak begyűjtésére a hálózatból.



31. ábra Feltérképezés folyamata FRC és szinkronizált adatküldéssel

A szinkronizált adatgyűjtési módszer egy broadcast-üzenet kéréssel kezdődik, amely elküldi a feltérképezési parancsot az összes csomópontnak. Miután a legtávolabbi csomópont is megkapta a broadcast-üzenetet, a csomópontok az FRC közbenső szomszédsági adatgyűjtési fázishoz hasonlóan elkezdnek a saját megfelelő időrészükben szomszédsági térképező üzenetet küldeni. Ezt követően a legtávolabbi, legnagyobb VRN-számú csomópont elkezd visszaküldeni a választ, azaz szomszédsági mátrix egy sorát a

koordinátornak. A további csomópontoknak azonban meg kell várniuk, amíg a magasabb című csomópontok befejezik a válaszüzenetek útválasztását. Ez azért szükséges, mert a válaszüzenetek mielőtt eljutnának a koordinátorhoz először az alsóbb szintű csomópontokon kell áthaladjanak. A csomópontok az időzés hosszából és saját címükből képesek kiszámolni a szükséges várakozási időt. A folyamatot a 31. ábra szemlélteti.

7.1. Vezeték nélküli hálózat feltérképezése összefűzött adatgyűjtéssel

Az feltérképezéshez ismertetett szinkronizált válaszküldés módszer esetén minden csomópontnak küldenie kell egy válaszüzenetet, amely N válaszüzenet küldését jelenti egy N csomóponttal rendelkező hálózatban. A szomszédsági mátrix a teljes hálózat feltérképezésére alkalmas, de erőforrásigényes feladat a hálózatból begyűjteni a szükséges információt. A stabilitási tényező meghatározásához a csomópontok befokára van szükség. Arra kerestem a választ, hogy milyen módszerrel lenne lehetséges csökkenteni a hálózatból begyűjtött adatokat, amiből még fel lehet írni a hálózatot reprezentáló gráfot és begyűjthető az összefűzött adatgyűjtés segítségével. Az összefűzött adatgyűjtés kérés broadcast üzenet továbbításakor -mivel az irányított gráfnak tekinthető-látható volt, hogy a folyamat során a hálózatból ezért elegendő lehet minden csomóponttól csak a befokokat begyűjteni.

A hálózat struktúrája a csomópontokra meghatározott befokok alapján egyértelműen meghatározható és a szomszédsági mátrix is felírható a befokok halmaza alapján, mivel a mátrix szimmetrikus. A szomszédsági mátrixból az egyes csúcsok befoka meghatározható:

$$deg^-(v_i) = \sum_{j=1}^N A[j][i] \quad (26)$$

Az eljárásnak azonban az összefűzött adatgyűjtés tulajdonságából adódóan vannak limitációi. Mivel egy adatgyűjtési ciklus alatt a maximális üzenet mérete 64 byte lehet, ezért ennek megfelelően az alábbi táblázat szerint alakul. A discovery folyamat során mikor a VRN számok kerülnek kiosztásra minden egyes adattovábbító csomóponthoz tartozik egy szülő, amelyen keresztül megkapta a VRN számot. A szülő

logikai címe eltárolásra kerül - nem csak a koordinátorban, hanem a hálózati eszközökben is, ezért ennek begyűjtésére nincsen szükség. Ez azt is jelenti, hogy az adatbegyűjtés során az ábrázolható eszközök száma egyel nagyobb lehet, mert a szülő címét nem kell küldeni és mivel ezen keresztül kapta meg a VRN számát ez az él biztosan létezik. A szülő címek alapján a hálózat feszítő fája előállítható további kapcsolatok begyűjtése nélkül is.

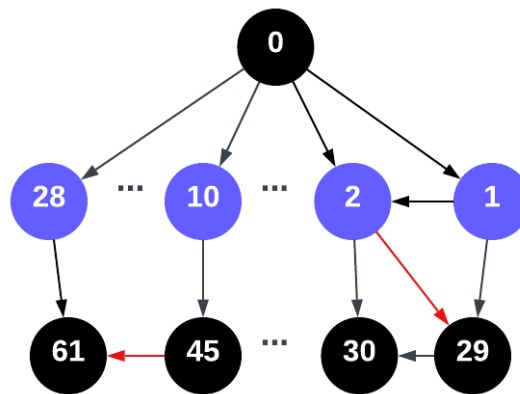
Bájt/eszköz	Maximális hálózati elemszám	Max. stabilitás Abszolút címmel	Max. Stabilitás Relatív címmel
1	63	$S_n \leq 2$	$S_n \leq 3$
2	31	$S_n \leq 3$	$S_n \leq 5$
4	15	$S_n \leq 5$	$S_n \leq 9$

4. táblázat Összefűzött adatgyűjtéssel felírható hálózati limitációk

A táblázatból látható, hogy maximum 63 elemszámú hálózatból gyűjthető be információ $S_n \leq 2$ stabilitás mellett. Ha viszont abszolút címek helyett a VRN-hez viszonyított relatív címek kerülnének begyűjtésre úgy elegendő lehet kisebb adatméret is. A relatív címzés használata esetén meg kell határozni, hogy mekkora címzési tartomány ábrázolására van szükség. A VRN számok szélességi keresés útján kerülnek kiosztásra, aminek alapja az eszközök rádiós hatótávja ezért a szomszédos eszközök közeli VRN számokkal rendelkeznek. A célszerű ábrázolás a 4 bites relatív cím lehet, ezzel megduplázható a feltérképezhető eszközök száma és a relatív címtartomány 16 lesz. Az összefűzött adatgyűjtés maximálisan 63 elemű hálózat esetén ez azt jelenti, hogy a hálózat legalább negyedén belül képes ábrázolni a relatív címeket.

Az FRC esetén alkalmazott szomszédos adatmegosztás a csomópont logikai címének növekvő sorrendjében történik viszont, ha a VRN- u_i relatív cím kerül tárolásra, akkor azzal a módosítással, hogy a VRN számok csökkenő sorrendjében történik meg az üzenetküldés garantálható, hogy minden csomóponthoz legközelebb eső alacsonyabb VRN számú eszközök kerüljenek elsőként regisztrálásra. Az üzenetküldés során csak a logikai címek találhatók meg az üzenet fejlécében ezért az üzenetnek tartalmaznia kell a forrás csomópont VRN számát.

Ezek alapján akár 63 elemű hálózat térképezhető fel, ha $S_n \leq 3$ és $\max\{VRN - v_i\} < 15$. Erre úgy van lehetőség, hogy egy tetrádban (nibble) kerül letárolásra a relatív cím, ezzel egy bájtban két cím tárolható. Amennyiben csak egy csomóponttól érkezett üzenet, akkor annak a relatív címe kerül tárolásra mindkét tetrádban, ami redundáns adat viszont így garantálható, hogy nulla érték ne kerüljön elküldésre, mivel az az összefűzéskor azt jelentené, hogy a csomópont nem válaszolt. Ez alkalmazható a szülő csomópontra is abban az esetben, ha a szülőn kívül más eszköztől nem fogadott üzenetet. Ha legalább egy másik csomópontot is detektált a szomszédjában, akkor annak a címe kerül tárolásra. Ezzel a módszerrel így lehetőség van arra, hogy $S_n \leq 3$ hálózatok és a $\max\{VRN - v_i\} < 15$ hálózatok feltérképezhetőek legyenek.



32. ábra Vezeték nélküli hálózat nagy VRN cím különbségekkel hatótávolságon belül

A relatív címek begyűjtésének korlátja egy csillag topológiához közelítő hálózatban is előfordulhat úgy, hogy egy alacsony és magas VRN számú eszköz is hatótávolságon belül van, például a 32. ábra látható hálózatban. Ezen problémák kezelésére az a javaslatom, hogy kerüljön jelzésre a címzési tartomány túlcsoportulása 0xF értékkel. A koordinátorba beérkező üzenet feldolgozásakor ez alapján látható lesz, hogy a csomópont egy olyan szomszédal rendelkezik, amelynek VRN címe kisebb, mint az ábrázolási tartomány. Az eljárás képes visszajelzést adni azon csomópontokról, ahol nem teljesül a $\max\{VRN - v_i\} < 15$ feltétel, így ezen esetekben a teljes feltérképezés és az összefűzött adatgyűjtésen alapuló feltérképezés adhat megoldást. A 32. ábra látható a korábban bemutatott hálózat, amelyben kézzel jelölt csomópontok a szülők. A piros

színnel jelzett élek lesznek azok, amelyeket az ismertetett eljárás alapján nem lehet rekonstruálni, mivel kívül esnek az ábrázolási tartományon. Azok az élek, amelyek ugyan kívül esnek a tartományon azért állíthatóak elő, mert az adott csomópont szülője és ez az információ rendelkezésre áll a koordinátorban.

A tapasztalatom alapján azonban ez a probléma a telepített hálózatoknál nem gyakori, ezért a legtöbb esetben ez jó megoldást adhat a gyors feltérképezésre. A bemutatott összefűzött adatgyűjtési eljárás jó eredményt adhat a gyakori hálózatok esetén. Ezen térképezési eljárás alkalmazása célszerű, mivel amennyiben a hálózat nem állítható helyre a begyűjtött adatokkal azt az eljárás során képes a koordinátor detektálni és más térképezési eljárással feltérképezhető marad a hálózat.

7.2. Hálózati stabilitás meghatározása összefűzött adatgyűjtéssel

Amennyiben a hálózat feltérképezésekor a cél nem a teljes hálózati kapcsolati struktúra leképzése hanem a hálózat stabilitási jellemzőinek meghatározása, akkor nem feltétlenül szükséges a teljes szomszédsági mátrix előállítása. A stabilitási tényezők meghatározásához elegendő információ volt a csúcsok befoka a küldés folyamata során, azaz az egyes csomópontok esetén azon csomópontok száma, amelyektől képesek üzenetet fogadni. A válaszüzenetek számának csökkentése érdekében a hálózati stabilitás meghatározáshoz szükséges adatok begyűjtésére az összefűzött adatgyűjtéssel is van lehetőség, a bittérkép helyett a csomópontok befokának begyűjtésével.

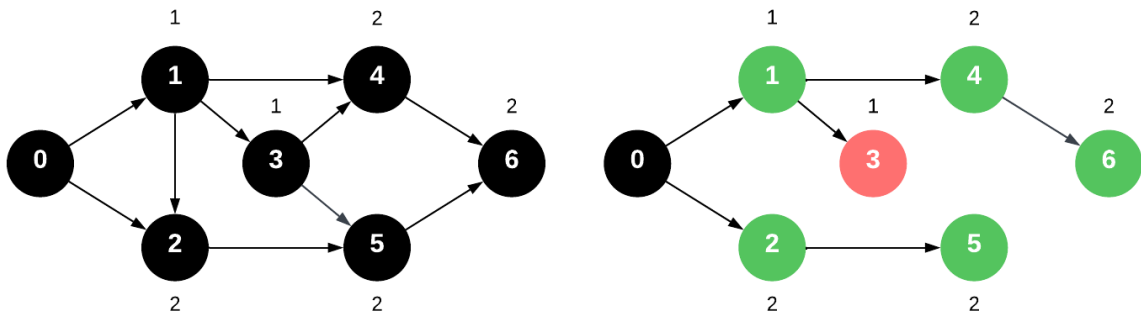
Ebben az esetben a csomópontok nem egyedi módon küldik el a válaszaikat, hanem minden csomópont összegezi a szomszédos adatmegosztási fázis alatt érkező üzeneteket, amely csomópontok VRN száma alacsonyabb a fogadó csomóponténál. Ez a megközelítés nemcsak egyszerűsíti a válaszadási folyamatot, hanem az FRC adatgyűjtési eljárás módosításával egyszerűen megvalósítható. A közbenső fázis során az adatokat nem kell összefűzni, hanem összegezni kell az üzenetek számát, amely alacsonyabb VRN számú csomópontok irányából érkezik. A válaszüzenetben ezáltal elküldhető csomópontonként az az információ, amiből meghatározható a stabilitási tényező. A csomópont-specifikus befok módszer a beérkező üzenetek felhasználásával lehetővé teszi

a hálózati stabilitási jellemzők meghatározását, de nem teszi lehetővé a hálózati gráf struktúrájának rekonstrukcióját, mivel nem ad egyértelmű hozzárendelést. Ez azt jelenti, hogy ugyanaz a befok sorozat több hálózatot is leírhat. A koordinátor rendelkezik a hálózat feszítő fájával, mivel az a discovery folyamat során ismerté válik. A feszítő fa és a csúcsok befoka alapján a hálózat jellegre felírható, de nem ad egyértelmű hozzárendelést.

Az IQRF esetén a maximális hálózati elemszám 239, ezért az egy bájtos ábrázolás elégséges a hálózatban esetlegesen kialakuló befok ábrázolására. Az FRC mérete azonban csak 64 bájt lehet, ezért az egy bájtos adatgyűjtés esetén 63 elemű hálózatnál nagyobb nem lenne feltérképezhető, tehát az ábrázolási tartomány csökkenthető. A valóságban telepített szenzorhálózatok esetén viszonylag ritka, hogy három vagy négyszeres redundanciánál magasabb lenne elvárt a hálózattól. Amennyiben nagyobb hálózat feltérképezésére lenne szükség és elegendő a stabilitási tényező $S_n < 4$, akkor alkalmazható az FRC 2 bites változata. Ezzel lehetőség lehet a teljes hálózatra történő stabilitás meghatározására, ellenben minden csomópont maximum három befokot képes meghatározni. A 2 bites adatgyűjtés esetén is praktikus megoldás lenne, hogy a szülő csomópont nem kerülne bele a befok összegbe, viszont azon csomópontok esetén, amik csak egy hálózati kapcsolattal rendelkeznek nulla értéket küldenének, ami azt jelentené, hogy az eszköz nem válaszolt. A szülő kapcsolattal együtt így csomópontonként három kapcsolat detektálható. Az eljárás előnye, hogy akár maximális hálózati mérettel is működőképes. A kisebb elemszámú hálózatnál természetesen növelhető a detektálható csomópontok száma.

A hálózatból gyűjtött adatok alapján felírható $D = \{\text{deg}^-(u_0), \text{deg}^-(u_1) \dots \text{deg}^-(u_N)\}$ amiből meghatározható a hálózat stabilitási tényezője. A hálózat telepítése során, ha szükséges magasabb stabilitási tényezőt elérni, akkor fontos tudni mely eszközök azok, amik rontják a hálózat stabilitását. A hálózatnál elvárt stabilitási tényező $S_n = 2$, akkor ennek megfelelően lehetséges ábrázolni a hálózatot. A hálózat feszítő fája felírható a koordinátorban tárolt hálózati információk alapján és a csomópontok zöld színnel történő jelölése mutatja azokat az eszközöket, amik eleget tesznek a kívánt stabilitás eléréséhez.

A 33. ábra látható, hogy a VRN=3 csomópont befoka csak egy, ezért ennek a csomópontnak az áthelyezésére vagy új csomópont behelyezésére lehet szükség.



33. ábra Az alacsony befokkal rendelkező csomópont észlelése

Egy további optimalizációs lehetőség a közbenső szomszédsági üzenetküldési fázis kihagyása. A kérés broadcast üzenet során már megtörténhet a befokok összegzése, mivel miután először megkapta az üzenetet egy csomópont az lesz a legkisebb VRN számú csomópont, amivel kapcsolatban áll és ezután kaphatja meg azoktól az eszközöktől, amelynek kisebb a VRN száma a sajátjához viszonyítva. Ennek köszönhetően amennyiben csak a befokra van szükség és nem a teljes hálózati térképre akkor a közbenső szomszédsági üzenetküldés elhagyható is lehet.

ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

3. Tézis

A szövevényes időosztásos vezeték nélküli szenzorhálózatokban elárasztásos útválasztás alkalmazása esetén a hálózat stabilitási tényezőjének meghatározásához szükséges adatok egy összefűzött adatgyűjtési ciklus segítségével begyűjthetők és adott peremfeltételek esetén a hálózat feltérképezhető.

3.1. Altézis

Kidolgoztam egy adatgyűjtési eljárást, amellyel a teljes hálózat feltérképezhető előállítva a hálózatot reprezentáló gráf szomszédsági mátrixát.

3.2. Altézis

Kidolgoztam egy egyszerűsített térképezési eljárást, amely a szomszédos csomópontok relatív címén alapul.

3.3. Altézis

Kidolgoztam egy egyszerűsített eljárást, amivel megállapítható a csomópontokra és hálózatra felírható stabilitási tényező.

A témában megjelent publikációk: [S5][S6][S9][S10]

8. TOVÁBBI KUTATÁSI LEHETŐSÉGEK

A vezeték nélküli érzékelőhálózatok területén végzett további kutatások középpontjában a hálózati energiafelhasználás csökkentése áll, különös tekintettel a redundáns csomópontok kezelésére és a rádióteljesítmény csökkentésére. Ezek a módszerek nemcsak az energiafogyasztást hivatottak csökkenteni, hanem hozzájárulnak a hálózatok hosszabb élettartamához és megbízhatóságához is. A rádióteljesítmény csökkentése, bár csökkenti a rádiós hatótávolságot és ezzel potenciálisan a redundáns kapcsolatokat, finomhangolása lehetővé teszi a hálózati topológia optimalizálását anélkül, hogy veszélyeztetné a hálózati összeköttetést. Azonban ez kihívásokat is jelent, mivel a kisebb teljesítményszintű eszközök hosszabb élettartama diszbalanszt okozhat, ami a magasabb energiafogyasztású eszközök előbbi kieséséhez vezethet, ezáltal potenciálisan hálózati kommunikációs problémákat okozva.

A többszörösen redundáns hálózatokban különös figyelmet érdemel a felesleges csomópontok üzenettovábbítási funkciójának kikapcsolásának lehetősége további energiamegtakarítás érdekében. Az egyes redundáns csomópontok kikapcsolása mellett fontos szerepet kap az időosztásos vezeték nélküli szenzorhálózatokban az összefűzött adatgyűjtési eljárások alkalmazása, amely az üzenettovábbítás ütemezett kikapcsolásával csökkentheti a hálózati csomópontok energiafelhasználását, miközben fenntartja a kapcsolatok redundanciáját. Ezen stratégiák sikeressége azon múlik, hogy az üzenettovábbítás kikapcsolása után is megőrizhető-e a hálózat stabilitása, ami további részletes vizsgálatokat igényel.

A lokális döntéshozatal lehetősége, ahol egy csomópont maga dönti el az üzenet továbbításának szükségességét, jelentős mértékben hozzájárulhat a hálózati erőforrások hatékonyabb felhasználásához. Különösen többszörösen redundáns hálózatokban, ahol a csomópontok képesek előzőleg érkezett üzenetek alapján dönteni az üzenetek továbbításáról, ezáltal csökkentve az ismétlések számát és optimalizálva az útválasztást.

A stabilitási tényező meghatározása, legyen az lokális vagy központi, kulcsfontosságú a hálózati redundancia és az energia-megtakarítás szempontjából. A központi felügyelet, amely a szomszédsági mátrix alapján történik, a routing bitmap-et

tartalmazó kérés üzeneteken keresztül, lehetővé teszi a routing be- és kikapcsolásának hatékony kezelését, így garantálva a fogyasztás egyenletes eloszlását a hálózatban.

Fontos megemlíteni, hogy a többszörös redundancia lehetőséget nyújt az ismétlések számának optimalizálására, de ez csak akkor valósítható meg hatékonyan, ha a redundancia a hálózat egészében áll fenn, vagy a koordinátortól távolodva csökken. Ellenkező esetben a redundancia hiánya sérülékenyebbé teheti a hálózatot, és a koordinátorhoz közelebb eső eszközök magasabb energiafogyasztása csökkentheti a hálózat élettartamát. Ezek a kutatási irányok nemcsak az energiamegtakarítást célozzák, hanem a megbízhatóság javítását is szolgálják, elősegítve a vezeték nélküli érzékelőhálózatok hatékonyabb működését.

A további kutatásomban tervezem, hogy javaslatokat tegyek az IQRF technológia keretein belül az energiahatékonyság javítására, a kommunikációs megbízhatóság növelésére és az útválasztási stratégiák optimalizálására.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Kandris, D.; Nakas, C.; Vomvas, D.; Koulouras, G. Applications of Wireless Sensor Networks: An Up-to-Date Survey. *Applied System Innovation* **2020**, *3*, 14, doi:[10.3390/asi3010014](https://doi.org/10.3390/asi3010014).
- [2] Chochul, M.; Ševčík, P. A Survey of Low Power Wide Area Network Technologies. In Proceedings of the 2020 18th International Conference on Emerging eLearning Technologies and Applications (ICETA); November 2020; pp. 69–73., doi: 10.1109/ICETA51985.2020.9379213
- [3] Adefemi Alimi, K.O.; Ouahada, K.; Abu-Mahfouz, A.M.; Rimer, S. A Survey on the Security of Low Power Wide Area Networks: Threats, Challenges, and Potential Solutions. *Sensors* **2020**, *20*, 5800, doi:[10.3390/s20205800](https://doi.org/10.3390/s20205800).
- [4] De Beelde, B.; Plets, D.; Joseph, W. Wireless Sensor Networks for Enabling Smart Production Lines in Industry 4.0. *Applied Sciences* **2021**, *11*, 11248, doi:[10.3390/app112311248](https://doi.org/10.3390/app112311248).
- [5] Artetxe, E.; Barambones, O.; Calvo, I.; Fernández-Bustamante, P.; Martín, I.; Uralde, J. Wireless Technologies for Industry 4.0 Applications. *Energies* **2023**, *16*, 1349, doi:10.3390/en16031349.
- [6] Yang, S.-H. *Wireless Sensor Networks: Principles, Design and Applications; Signals and Communication Technology*; Springer London: London, 2014; ISBN 978-1-4471-5504-1.
- [7] Fahmy, H.M.A. *Concepts, Applications, Experimentation and Analysis of Wireless Sensor Networks; Signals and Communication Technology*; Springer International Publishing: Cham, 2021; ISBN 978-3-030-58014-8.
- [8] Ramin Hekmat, *Ad-Hoc Networks: Fundamental Properties and Network Topologies*; Springer Netherlands, 2006; ISBN 978-1-4020-5165-4.
- [9] Al-Karaki, J.N.; Kamal, A.E. Routing Techniques in Wireless Sensor Networks: A Survey. *IEEE Wireless Communications* **2004**, *11*, 6–28, doi:[10.1109/MWC.2004.1368893](https://doi.org/10.1109/MWC.2004.1368893).
- [10] Shabbir, N.; Hassan, S.R.; Shabbir, N.; Hassan, S.R. Routing Protocols for Wireless Sensor Networks (WSNs). In *Wireless Sensor Networks - Insights and Innovations*; IntechOpen, 2017 ISBN 978-953-51-3562-3.
- [11] De Guglielmo, D.; Brienza, S.; Anastasi, G. IEEE 802.15.4e: A Survey. *Computer Communications* **2016**, *88*, 1–24, doi:[10.1016/j.comcom.2016.05.004](https://doi.org/10.1016/j.comcom.2016.05.004).
- [12] Nixon, M.; Blvd, W.L.H. A Comparison of WirelessHART and ISA100.11a. 2012.
- [13] H.C. IEC 62591 WirelessHART System Engineering Guide. 2013.

-
- [14] Song, J.; Han, S.; Mok, A.; Chen, D.; Lucas, M.; Nixon, M.; Pratt, W. WirelessHART: Applying Wireless Technology in Real-Time Industrial Process Control. In Proceedings of the 2008 IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium; April 2008; pp. 377–386.
- [15] Raptis, T.; Passarella, A.; Conti, M. A Survey on Industrial Internet with ISA100 Wireless. *IEEE Access* 2020, PP, 1–1, doi:10.1109/ACCESS.2020.3019665.
- [16] Chupaev, A.V.; Zaripova, R.S.; Galyamov, R.R.; Sharifullina, A.Y. The Use of Industrial Wireless Networks Based on Standard ISA-100.11a and Protocol WirelessHART in Process Control. *E3S Web Conf.* 2019, 124, 03013, doi:10.1051/e3sconf/201912403013.
- [17] IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks. *IEEE Std 802.15.4-2020 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2015)* 2020, 1–800, doi:10.1109/IEEESTD.2020.9144691.
- [18] Zigbee | Complete IOT Solution Available online: <https://csa-iot.org/all-solutions/zigbee/> (Accessed 2 February 2024).
- [19] Petrova, M.; Riihijarvi, J.; Mahonen, P.; Labella, S. Performance Study of IEEE 802.15.4 Using Measurements and Simulations. In Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2006. WCNC 2006.; April 2006; Vol. 1, pp. 487–492.
- [20] Khanafer, M.; Guennoun, M.; Mouftah, H.T. A Survey of Beacon-Enabled IEEE 802.15.4 MAC Protocols in Wireless Sensor Networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 2014, 16, 856–876, doi:10.1109/SURV.2013.112613.00094.
- [21] ZigBee Specification Revision r21, <https://zigbeealliance.org/wp-content/uploads/2019/11/docs-05-3474-21-0csg-zigbee-specification.pdf> (Accessed 2 February 2024)
- [22] Bouzidi, M.; Dalveren, Y.; Cheikh, F.A.; Derawi, M. Use of the IQRF Technology in Internet-of-Things-Based Smart Cities. *IEEE Access* 2020, 8, 56615–56629, doi:[10.1109/ACCESS.2020.2982558](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2982558).
- [23] Bazydło, P.; Dąbrowski, S.; Szewczyk, R. Wireless Temperature Measurement System Based on the IQRF Platform. In Proceedings of the Mechatronics - Ideas for Industrial Application; Awrejcewicz, J., Szewczyk, R., Trojnacki, M., Kaliczyńska, M., Eds.; Springer International Publishing: Cham, 2015; pp. 281–288., doi:10.1007/978-3-319-10990-9.
- [24] Bouzidi, M.; Amro, A.; Dalveren, Y.; Alaya Cheikh, F.; Derawi, M. LPWAN Cyber Security Risk Analysis: Building a Secure IQRF Solution. *Sensors* 2023, 23, 2078, doi:[10.3390/s23042078](https://doi.org/10.3390/s23042078).

-
- [25] Properties of a Wireless Mesh Network Constructed with the Use of IQRF Modules in the Indoor Environment. *International Journal of Electronics and Telecommunications* **2023**, doi:[10.24425/ijet.2020.134010](https://doi.org/10.24425/ijet.2020.134010).
- [26] Pies, M.; Hájovský, R.; Velička, J. Wireless Measuring System for Monitoring the Condition of Devices Designed to Protect Line Structures. *Sensors* **2020**, *20*, 2512, doi:[10.3390/s20092512](https://doi.org/10.3390/s20092512).
- [27] Kuchta, R.; Vrba, R.; Sulc, V. Smart Platform for Wireless Communication - Case Study; **2008**; p. 120; ISBN 978-0-7695-3106-9.
- [28] Sulc, V. Module for Wireless Communication between Electric or Electronic Equipment or Systems, Method for Its Control and Method for Creating Generic Platforms for User Applications in Area of Wireless Communications with Those Modules, US Patent 20070188343A1, filed 2006-09-26
- [29] Sulc, V. Electronic Transceiver Module for Network Wireless Communication in Electric or Electronic Devices or Systems, a Method of Controlling It and a Method of Creating a Generic Network Communication Platform with Transceivers, US Patent 9336676B2, filed 2008-05-30
- [30] Sulc, V. System for wireless mesh network communication, US Patent 9743404B2, filed 2015-11-03
- [31] Sulc, V. Configuring a Wireless Mesh Network of Communication Devices with Packet Message Transmission, and Routing Packet Message Transmission in Such a Network, US Patent 20120163234A1, filed 2015-11-03
- [32] Sulc, V. System for Message Acknowledgement and Data Collection in Wireless Mesh Networks, US Patent 20070188343A1, filed 2017-04-03.
- [33] Lim, C.L.; Goh, C.; Li, Y. Long-Term Routing Stability of Wireless Sensor Networks in a Real-World Environment. *IEEE Access* **2019**, *7*, 74351–74360, doi:[10.1109/ACCESS.2019.2920248](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2920248).
- [34] Sajadian, S.; Ibrahim, A.; Pignaton de Freitas, E.; Larsson, T. Improving Connectivity of Nodes in Mobile WSN; 2011; p. 371; doi: 10.1109/AINA.2011.81
- [35] Lohs, S.; Karnapke, R.; Nolte, J. Link Stability in a Wireless Sensor Network – An Experimental Study. In Proceedings of the Sensor Systems and Software; Martins, F., Lopes, L., Paulino, H., Eds.; Springer: Berlin, Heidelberg, **2012**; pp. 146–161., doi: 10.1007/978-3-642-32778-0_12
- [36] Delaney, D.T.; Higgs, R.; O’Hare, G.M.P. A Stable Routing Framework for Tree-Based Routing Structures in WSNs. *IEEE Sensors Journal* **2014**, *14*, 3533–3547, doi:[10.1109/JSEN.2014.2329391](https://doi.org/10.1109/JSEN.2014.2329391).
- [37] Ishibashi, K.; Yamaoka, K. A Study of Network Stability on Wireless Sensor Networks. In Proceedings of the 2015 9th International Conference on Next

-
- Generation Mobile Applications, Services and Technologies; September **2015**; pp. 96–101., doi:10.1109/NGMAST.2015.42
- [38] Xu, Y.-H.; Wu, Y.; Song, J. A Routing Metric to Improve Route Stability in Mobile Wireless Sensor Networks. *KSII Transactions on Internet and Information Systems (TIIS)* 2016, 10, 2245–2266, doi:10.3837/tiis.2016.05.016.
- [39] Sulc, V.; Kuchta, R.; Vrba, R. IQMESH Implementation in IQRF Wireless Communication Platform. In *Proceedings of the 2009 Second International Conference on Advances in Mesh Networks*; June **2009**; pp. 62–65., doi:10.1109/MESH.2010.17
- [40] Seflova, P.; Sulc, V.; Pos, J.; Spinar, R. IQRF Wireless Technology Utilizing IQMESH Protocol. In *Proceedings of the 2012 35th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*; July **2012**; pp. 101–104.
- [41] Dąbrowski, S.; Bazydło, P.; Szewczyk, R. Functional Performance Testing of Routing Devices in Networks Based on IQMESH Protocol. In *Proceedings of the Progress in Automation, Robotics and Measuring Techniques*; Szewczyk, R., Zieliński, C., Kaliczyńska, M., Eds.; Springer International Publishing: Cham, **2015**; pp. 39–47., doi: 10.1007/978-3-319-15835-8_5
- [42] Angelov, K.K.; Sadinov, S.M.; Kogias, P. Deployment of Mesh Network in an Indoor Scenario for Application in IoT Communications. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* **2021**, 1032, 012004, doi:[10.1088/1757-899X/1032/1/012004](https://doi.org/10.1088/1757-899X/1032/1/012004).
- [43] Fujdiak, R.; Mlynek, P.; Malina, L.; Orgon, M.; Slacik, J.; Blazek, P.; Misurec, J. Development of IQRF Technology: Analysis, Simulations and Experimental Measurements. *EIAEE* **2019**, 25, 72–79, doi:[10.5755/j01.eie.25.2.22739](https://doi.org/10.5755/j01.eie.25.2.22739).
- [44] DPA - IQRF Available online: <https://www.iqrf.org/technology/dpa> (accessed on 1 October 2023).
- [45] IQRF Alliance. IQRF Technology. Available online: <https://www.iqrf.org/technology/> (accessed on 1 October **2023**).
- [46] IQRF Tech s.r.o., IQRF OS User's Guide Version 4.03D for (DC)TR-7xD, 2018, Available online: https://www.iqrfalliance.org/data_files/news/user-guide-iqrf-os-403d-tr-7xd-181025.pdf (accessed on 1 October **2023**).
- [47] Obr1342_p240.Jpg Available online: https://cdn.sos.sk/novinky/obr/obr1342_p240.jpg (accessed on 19 December **2023**).
- [48] Bouguera, T.; Diouris, J.-F.; Chaillout, J.-J.; Jaouadi, R.; Andrieux, G. Energy Consumption Model for Sensor Nodes Based on LoRa and LoRaWAN. *Sensors* 2018, 18, 2104.

-
- [49] D. Tudose, L. Gheorghe, and N. Tăpuș, "Radio transceiver consumption modeling for multi-hop wireless sensor networks," *UPB Sci. Bull. Ser. C Electr. Eng.*, vol. 75, no. 1, pp. 17–26, 2013.
- [50] J. Song and Y. K. Tan, "Energy consumption analysis of ZigBee-based energy harvesting wireless sensor networks," *2012 IEEE International Conference on Communication Systems (ICCS)*, 2012, pp. 468-472
- [51] V. Agarwal, R. A. DeCarlo, and L. H. Tsoukalas, "Modeling Energy Consumption and Lifetime of a Wireless Sensor Node Operating on a Contention-Based MAC Protocol," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 17, no. 16, pp. 5153-5168, 15 Aug.15, 2017
- [52] Yunxia Chen and Qing Zhao, "On the lifetime of wireless sensor networks," in *IEEE Communications Letters*, vol. 9, no. 11, pp. 976-978, Nov. 2005
- [53] Z. Cheng, M. Perillo and W. B. Heinzelman, "General Network Lifetime and Cost Models for Evaluating Sensor Network Deployment Strategies," in *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 7, no. 4, pp. 484-497, April 2008
- [54] Cheng, S., Li, B., Yuan, Z., Zhang, F., & Liu, J. (2016). Development of a lifetime prediction model for lithium thionyl chloride batteries based on an accelerated degradation test. *Microelectronics Reliability*, 65, 274–279
- [55] XENO-ENERGY Co. Ltd., XL-060F Li/SOCl₂ battery datasheet, http://www.xenoenergy.com/eng/file/Xeno%20Catalog%20XL-060F_E.pdf
- [56] IQ Home, Industrial Temperature Sensor [SI-T-02], <https://www.iqhome.org/SI-T-02>
- [57] Çabuk, U.C.; Akram, V.K.; Dağdeviren, O. An Experimental Analysis of Minimum Cut Size in Wireless Sensor Networks. In *Proceedings of the 2019 27th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*; April **2019**; pp. 1–4.,doi: 10.1109/SIU.2019.8806304
- [58] Richardson, T.S. A Discovery Algorithm for Directed Cyclic Graphs **2013.**, doi:10.48550/arXiv.1302.3599
- [59] Araujo, J.; Cohen, N.; Giroire, F.; Havet, F. Good Edge-Labeling of Graphs. *Discrete Applied Mathematics* **2012**, 160, 2502–2513, doi:10.1016/j.dam.2011.07.021.
- [60] Bermond, J.-C.; Cosnard, M.; Pérennes, S. Directed Acyclic Graphs with the Unique Dipath Property. *Theoretical Computer Science* **2013**, 504, 5–11, doi:10.1016/j.tcs.2012.06.015.
- [61] Cho, S.; Elhourani, T.; Ramasubramanian, S. Resilient Multipath Routing with Independent Directed Acyclic Graphs. In *Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Communications*; May **2010**; pp. 1–5., doi:10.1109/ICC.2010.5502526

-
- [62] Xu, Y.-H.; Wu, Y.; Song, J. A Routing Metric to Improve Route Stability in Mobile Wireless Sensor Networks. *KSII Transactions on Internet and Information Systems (TIIS)* **2016**, 10, 2245–2266, doi:10.3837/tiis.2016.05.016.
- [63] Dash, L.; Pattanayak, B.K.; Mishra, S.K.; Sahoo, K.S.; Jhanjhi, N.Z.; Baz, M.; Masud, M. A Data Aggregation Approach Exploiting Spatial and Temporal Correlation among Sensor Data in Wireless Sensor Networks. *Electronics* **2022**, 11, 989, doi:[10.3390/electronics11070989](https://doi.org/10.3390/electronics11070989).
- [64] Ergen, S.C.; Varaiya, P. TDMA Scheduling Algorithms for Wireless Sensor Networks. *Wireless Netw* **2010**, 16, 985–997, doi:[10.1007/s11276-009-0183-0](https://doi.org/10.1007/s11276-009-0183-0).
- [65] Hajovsky, R.; Pies, M.; Velicka, J. Monitoring the Condition of the Protective Fence above the Railway Track. *IFAC-PapersOnLine* **2019**, 52, 145–150, doi:[10.1016/j.ifacol.2019.12.747](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.12.747).
- [66] Hwang, D.; Kim, D. DFR: Directional Flooding-Based Routing Protocol for Underwater Sensor Networks. In Proceedings of the OCEANS 2008; September 2008; pp. 1–7.,doi: 10.1109/oceans.2008.5151939
- [67] Klempous, R. Collective Behavior in Wireless Sensor Networks. *Acta Polytechnica Hungarica* **2014**, 11.
- [68] Ko, Y.-B.; Choi, J.-M.; Kim, J.-H. A New Directional Flooding Protocol for Wireless Sensor Networks. In Proceedings of the Information Networking, Networking Technologies for Broadband and Mobile Networks; Kahng, H.-K., Goto, S., Eds.; Springer: Berlin, Heidelberg, 2004; pp. 93–102.,doi: 10.1007/978-3-540-25978-7_10
- [69] Kumar, S.; Kim, H. Energy Efficient Scheduling in Wireless Sensor Networks for Periodic Data Gathering. *IEEE Access* **2019**, 7, 11410–11426, doi:[10.1109/ACCESS.2019.2891944](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2891944).
- [70] Lee, S.H.; Rhee, S.H. Efficient Flooding for Reliability in Link-State Routing Protocols. In Proceedings of the 2012 International Conference on ICT Convergence (ICTC); October 2012; pp. 787–788.,doi: 10.1109/ICTC.2012.6387146
- [71] Manuel, E.M.; Pankajakshan, V.; Mohan, M.T. Data Aggregation in Low-Power Wireless Sensor Networks With Discrete Transmission Ranges: Sensor Signal Aggregation Over Graph. *IEEE Sensors Journal* **2022**, 22, 21135–21144, doi:[10.1109/JSEN.2022.3204800](https://doi.org/10.1109/JSEN.2022.3204800).
- [72] Sarioz, D. Geometric Graph Theory and Wireless Sensor Networks., ISBN:978-1-267-23588-6
- [73] Xiong, S.; Li, J. An Efficient Algorithm for Cut Vertex Detection in Wireless Sensor Networks. In Proceedings of the 2010 IEEE 30th International Conference on

-
- Distributed Computing Systems; June 2010; pp. 368–377.,doi: 10.1109/ICDCS.2010.38
- [74] Oehlers, M.; Fabian, B. Graph Metrics for Network Robustness—A Survey. *Mathematics* **2021**, *9*, 895. <https://doi.org/10.3390/math9080895>
- [75] Zhang, D., Zhu, Y., Zhao, C., & Dai, W. (2012). A new constructing approach for a weighted topology of wireless sensor networks based on local-world theory for the Internet of Things (IOT). *Computers & Mathematics with Applications*, *64*(5), 1044–1055.
- [76] “IQ Home - Wireless Sensor Networks and Solutions.” Accessed: Jan. 11, 2024. [Online]. Available: <https://www.iqhome.org/>
- [77] “Sensor Battery Lifetime Calculator.” Accessed: Dec. 11, 2023. [Online]. Available: <https://www.iqhome.org/sensor-battery-lifetime-calculator>
- [78] “Sensor Battery Lifetime Calculator API.” Accessed: Dec. 11, 2023. [Online]. Available: <https://api.iqhstech.eu/>
- [79] “Node.js.” Accessed: Dec. 11, 2023. [Online]. Available: <https://nodejs.org/en>
- [80] Jae-Hwan Chang and L. Tassiulas, "Energy conserving routing in wireless ad-hoc networks," *Proceedings IEEE INFOCOM 2000. Conference on Computer Communications. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (Cat. No.00CH37064)*, 2000, pp. 22-31 vol.1
- [81] Zhou, C., Wang, M., Qu, W., & Lu, Z. (2018). A Wireless Sensor Network Model considering Energy Consumption Balance. *Mathematical Problems in Engineering*, 2018, 1–8.
- [82] Elshrkawey, M., Elsherif, S. M., & Elsayed Wahed, M. (2018). An Enhancement Approach for Reducing the Energy Consumption in Wireless Sensor Networks. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, *30*(2), 259–267
- [83] Muller, I., Winter, J. M., Brusamarello, V., Pereira, C. E., & Netto, J. C. (2014). Algorithm for estimation of energy consumption of industrial wireless sensor networks nodes. *2014 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings*.
- [84] Nikolaos A. Pantazis; Dimitrios J. Vergados; Dimitrios D. Vergados; Christos Douligeris (2009). Energy efficiency in wireless sensor networks using sleep mode TDMA scheduling. , *7*(2), 322–343.
- [85] Muller, Ivan; Winter, Jean; Pereira, Carlos; Brusamarello, Valner; Netto, Joao C. (2016), 2016 IEEE 14th International Conference on Industrial Informatics (INDIN) - Energy consumption estimation for TDMA-based industrial wireless sensor networks.

-
- [86] J. A. Khan, H. K. Qureshi, and A. Iqbal, "Energy management in Wireless Sensor Networks: A survey," *Computers & Electrical Engineering*, vol. 41, pp. 159–176, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.compeleceng.2014.06.009.
- [87] G. Anastasi, M. Conti, M. Di Francesco, and A. Passarella, "Energy conservation in wireless sensor networks: A survey," *Ad Hoc Networks*, vol. 7, no. 3, pp. 537–568, May 2009, doi: 10.1016/j.adhoc.2008.06.003.
- [88] I. Das, R. N. Shaw, and S. Das, "Analysis of Energy Consumption of Energy Models in Wireless Sensor Networks," in *Innovations in Electrical and Electronic Engineering*, M. N. Favorskaya, S. Mekhilef, R. K. Pandey, and N. Singh, Eds., in *Lecture Notes in Electrical Engineering*. Singapore: Springer, 2021, pp. 755–764. doi: 10.1007/978-981-15-4692-1_57.
- [89] B. Guruprakash, C. Balasubramanian, and R. Sukumar, "An approach by adopting multi-objective clustering and data collection along with node sleep scheduling for energy efficient and delay aware WSN," *Peer-to-Peer Netw. Appl.*, vol. 13, no. 1, pp. 304–319, Jan. 2020, doi: 10.1007/s12083-019-00779-3.
- [90] J. Ma, W. Lou, Y. Wu, X.-Y. Li, and G. Chen, "Energy Efficient TDMA Sleep Scheduling in Wireless Sensor Networks," in *IEEE INFOCOM 2009*, Apr. 2009, pp. 630–638. doi: 10.1109/INFCOM.2009.5061970.
- [91] S. V and C. Chandrasekar, "Cluster based Sleep/Wakeup Scheduling Technique for WSN," *International Journal of Computer Applications*, vol. 72, pp. 15–22, Jun. 2013, doi: 10.5120/12513-8030.
- [92] R. Chauhan and V. Gupta, "Energy Efficient Sleep Scheduled Clustering & Spanning Tree based data aggregation in wireless sensor network," in *2012 1st International Conference on Recent Advances in Information Technology (RAIT)*, Mar. 2012, pp. 536–541. doi: 10.1109/RAIT.2012.6194617.
- [93] Y. Wu, X.-Y. Li, Y. Liu, and W. Lou, "Energy-Efficient Wake-Up Scheduling for Data Collection and Aggregation," *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 21, no. 2, pp. 275–287, Feb. 2010, doi: 10.1109/TPDS.2009.45.

SAJÁT PUBLIKÁCIÓK

- [S1] Kopják, J.; Sebestyén, G. "Comparison of Data Collecting Methods in Wireless Mesh Sensor Networks". In *Proceedings of the 2018 IEEE 16th World Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMI)*; February 2018; pp. 000155–000160., doi: 10.1109/SAMI54271.2022.9780791
- [S2] Kopják, J.; Sebestyén, G. "Deep Sleep Algorithms in Battery Powered TDMA Wireless Mesh Sensor Network". In *Proceedings of the 2018 IEEE 18th*

-
- International Symposium on Computational Intelligence and Informatics (CINTI);
November 2018; pp. 000115–000118.,doi: 10.1109/CINTI.2018.8928209
- [S3] Kopják, J.; Sebestyén, G. "Energy Consumption Model of Sensor Nodes Using Merged Data Collecting Methods". In Proceedings of the 2022 IEEE 20th Jubilee World Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMI); March 2022; pp. 000027–000030.,doi: 10.1109/SAMI54271.2022.9780791
- [S4] G. Sebestyén; J. Kopják, "Battery Life Prediction Model of Sensor Nodes using Merged Data Collecting methods," 2022 IEEE 20th Jubilee World Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMI), Poprad, Slovakia, 2022,
- [S5] Sebestyén, G.; Kopjak, J., "Network Mapping for TDMA Mesh Sensor Networks with Flooding Routing". In Proceedings of the 2022 IEEE 5th International Conference and Workshop Óbuda on Electrical and Power Engineering (CANDO-EPE); November 2022; pp. 153–156., doi: 10.1109/SAMI54271.2022.9780791
- [S6] Sebestyén, Gergely; Kopják, József, "Optimization of TDMA Wireless Network Mapping using Merged Data Collecting", SISY 2023 IEEE 21st International Symposium on Intelligent Systems and Informatics Budapest, Magyarország: IEEE Hungary Section (2023) 663 p. pp. 659-662., doi: 10.1109/SISY60376.2023.10417891
- [S7] Sebestyén, Gergely; Kopják, József, "Assessing the Stability of Time-Division Multiple Access (TDMA) Mesh Networks through Flooding Route Selection", SISY 2023 IEEE 21st International Symposium on Intelligent Systems and Informatics Budapest, Magyarország: IEEE Hungary Section (2023) 663 p. pp. 649-652., doi: 10.1109/SISY60376.2023.10417892
- [S8] Sebestyén, Gergely; Kopják, József, "Energiahatékonyság javítása szövevényes topológiájú időosztásos vezeték nélküli szenzorhálózatokban", KVK PhD Workshop Minikonferencia, Budapest, Magyarország: Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar (2023) 23 p. pp. 8-9.
- [S9] Sebestyén, Gergely; Kopják, József, "Hálózat feltérképezési eljárás szövevényes topológiájú időosztásos vezeték nélküli szenzorhálózatokhoz", XXXVIII. Kandó Konferencia 2022, Budapest, Magyarország: Óbudai Egyetem (2022), 68-68

- [S10] Sebestyén, Gergely; Kopják, József, "Adatgyűjtési eljárások szövevényes topológiájú időosztásos vezeték nélküli szenzorhálózatokhoz", XXXVIII. Kandó Konferencia 2022 - Absztrakt kötet
- [S11] Sebestyén, Gergely; Kopják, József, "Estimating Battery Life in TDMA Mesh-based Wireless Sensor Networks for Merged Data Collection Method", Acta Polytechnica Hungarica 21:3 pp. 225-244. (2024)
- [S12] Sebestyén, Gergely; Kopják, József, "Enhancing Battery Efficiency through Dynamic Data Collection Scheduling in IoQRF Wireless Sensor Networks ", Acta Electrotechnica et Informatica 23:4 pp. 3-9. (2023)

TOVÁBBI TUDOMÁNYOS KÖZLEMÉNYEK

- [S13] Bartos, Béla; Wendler, Márk; Kopják, József; Sebestyén, Gergely, Virtuális laboratórium, XXXII. Kandó Konferencia 2016: Kandó a tudomány hajóján, Budapest, Magyarország : Óbudai Egyetem (2016) pp. 1-5.
- [S14] Sebestyén, Gergely; Kopják, József, Vezeték nélküli beléptető rendszer architektúrális tervezése, XXXIII. Kandó Konferencia 2017: "Kandó a tudomány hajóján", Budapest, Magyarország: Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar (2017) 193 p. pp. 148-161.
- [S15] Kopják, József; Sebestyén, Gergely; Mátrai, Pál, IQRF DPA alapú vezeték nélküli beléptető rendszer szoftverének megvalósítása, XXXIII. Kandó Konferencia 2017: "Kandó a tudomány hajóján", Budapest, Magyarország: Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar (2017)
- [S16] Laslo Olah, Richardson; Grigorii, Sokolovskii; Sergey, Losev; Ekaterina, Sokolovskaya; Peter, Czifra; Gergely, Sebestyén, System and method for aiding hearing, USA szabadalom: US-10893370-B1

[S17] Sebestyén, Gergely; Kopják, József, Hálózat feltérképezési eljárás szövevényes topológiájú időosztásos vezeték nélküli szenzorhálózatokhoz, XXXVIII. Kandó Konferencia 2022 - Absztrakt kötet

[S18] Jozsef, Kopjak; Gergely, Sebestyen, Event-driven Fuzzy Inference System Implementation in Node-RED, IEEE 17th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics Proceedings, Sisy 2019, Szabadka, Szerbia: IEEE Hungary Section (2019) 273 p. pp. 255-260., doi: 10.1109/SISY47553.2019.9111512