



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar

Biztonságtudományi és Kibervédelmi Intézet



OE-BGK

2025.

Hallgató neve: Ács Boglárka

Hallgató törzskönyvi száma: T011322/FI12904/B



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

Óbudai Egyetem
Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar
Biztonságtudományi és Kibervédelmi Intézet

SZAKDOLGOZAT FELADATLAP

Hallgató neve: Ács Boglárka

Szakedolgozat száma: [REDACTED]

Törzskönyvi száma: T011322/FI12904/B

Neptun kódja: [REDACTED]

Szak: biztonságtechnikai mérnöki

Specializáció: biztonságtechnikai mérnöki - biztonságtechnikai

A dolgozat címe: Alacsony pályás műhold konstellációk vészhelyzeti alkalmazása

A dolgozat címe angolul: Emergency applications of low Earth orbit satellite constellations

A feladat részletezése:

1. Az alacsony Föld körüli pályán működő műhold konstellációk felépítése, működési elve és típusai.
2. Az alacsony pályás műhold konstellációk fejlődéstörténete és összehasonlítása a geostacionárius műholdakkal.
3. Az alacsony pályás műhold konstellációk szerepe és jelentősége vészhelyzeti alkalmazásokban.
4. A különböző típusú vészhelyzetek és ezek kommunikációs és információs igényei.
5. Vészhelyzeti műholdas kommunikációs konténer tervezési szempontjai, felépítése, felszereltsége és alkalmazási lehetőségei.

Intézményi konzulens neve: Dr. Pető Richárd

A kiadott téma elévülési határideje: 2027. 12. 15.

Beadási határidő: 2025. 12. 15.

A szakedolgozat: Nem titkos.

Kiadva: Budapest, 2025. 10. 27.



[Signature]
Intézetigazgató

A dolgozatot beadásra alkalmasnak találom: 2025. 12. 15.

[Signature]
belső konzulens

[Signature]
külső konzulens



HALLGATÓI NYILATKOZAT

Alulírott **Ács Boglárka** hallgató kijelentem, hogy a szakdolgozat saját munkám eredménye, a felhasznált szakirodalmat és eszközöket azonosíthatóan közöltem. Az elkészült szakdolgozatban található eredményeket az egyetem és a feladatot kiíró intézmény saját céljára térítés nélkül felhasználhatja, a titkosításra vonatkozó esetleges megkötések mellett.

Budapest, 2024. május 15.

.....
hallgató aláírása

ALACSONY PÁLYÁS MŰHOLD KONSTELLÁCIÓK
VÉSZHELYZETI ALKALMAZÁSA

EMERGENCY APPLICATIONS OF LOW EARTH ORBIT
SATELLITE CONSTELLATIONS

TARTALOMJEGYZÉK

BEVEZETÉS	6
1. A MŰHOLDAS KOMMUNIKÁCIÓ MŰKÖDÉSE	8
1.1. A kommunikációs rendszer alapvető elemei.....	9
1.1.1. Az űrszegmens	9
1.1.2. A földi szegmens.....	11
1.2. A kommunikációs folyamat	12
1.2.1. Hagyományos kommunikációs műholdak	15
1.2.2. A New Space Age, azaz az új űrkorszak	16
2. AZ ALACSONYPÁLYÁS MŰHOLDAK ISMERTETÉSE.....	19
2.1. Felépítésük	19
2.2. Üzemeltetésük	20
2.3. A LEO műholdak típusai	23
2.3.1. Tömeg és méret szerinti csoportosítás:	23
2.3.2. Funkció alapú csoportosítás	23
3. A VÉSZHELYZETEK ELEMZÉSE ÉS A KOMMUNIKÁCIÓ SZEREPE	28
3.1. Mit nevezünk vészhelyzetnek?	28
3.2. A vészhelyzetek/katasztrófák típusai	29
3.2.1. Természeti eredetű vészhelyzetek	29
3.2.2. Mesterséges eredetű vészhelyzetek.....	33
3.3. A kommunikáció stratégiai szerepe és követelményei	35
3.4. A hagyományos földi kommunikációs rendszerek korlátai és sebezhetősége	35
4. VÉSZHELYZETI MŰHOLDAS KOMMUNIKÁCIÓS KONTÉNER.....	39
4.1. A jelenlegi helyzet Magyarországon.....	39
4.2. Konceptió terv	42
5. ÖSSZEFOGLALÓ.....	48
6. SUMMARY	50
7. ÁBRAJEGYZÉK.....	52
8. HIVATKOZÁSOK	53

BEVEZETÉS

Az egyre gyakoribb és kiszámíthatatlanabb extrém időjárási események (például hurrikánok, erdőtűzek, árvizek) és különböző szállítással összefüggő balesetek (repülőgép-szerencsétlenségek, olajszállító tankhajókat ért balesetek, stb.) miatt, gyakran a földi kommunikációs hálózatok elérhetetlenné vagy megbízhatatlanná válnak. Ilyen esetekben a műholdas kommunikáció nélkülözhetetlenné válik. Bár a műholdas kommunikáció régóta elterjedt, a geostacionárius pályán (GEO¹) keringő műholdakra alapozott megoldások erre a szerepre kevésbé alkalmasak, mivel fixtelepítésű és viszonylag bonyolult felépítésű végfelhasználói eszközöket igényelnek, ráadásul jelentő késleltetés tapasztalható az átvitel során. Az alacsony Föld körüli pályán (LEO²) keringő műholdak ezzel szemben a kis késleltetés, a nagy sávszélesség, illetve a könnyű telepíthetőség és használat miatt képesek a helyben felmerült adatkapcsolati igényeket kielégíteni, ezzel lehetővé téve a mentőcsapatok számára – a domborzattól és az aktuális körülményektől függetlenül – a kialakult helyzet gyors és pontos felmérését, valamint a hatékonyabb koordináció megvalósítását. Emellett a terepen dolgozó csapatok számára a vészhelyzeti kommunikációs konténerek fejlesztése új vezetési és feladatorientált munkafolyamatok kialakításának a lehetőségét is megteremti.

Szakedolgozatom során elemezni fogom, hogy az alacsony pályás műhold-konstellációk miként alkalmazhatók a gyakorlatban különböző vészhelyzetek esetén, továbbá bemutatnám a tervezési szempontjait egy vészhelyzeti kommunikációs konténerre alapozott ideiglenes távközlési kapacitásokat biztosító megoldásnak.

Ezek a rendszerek katasztrófák esetén jelentősen csökkenthetik a válaszidőt és javíthatják az információáramlást, különösen távoli vagy infrastruktúráisan visszamaradott területeken. Az eredmények nemcsak elméleti jelentőséggel bírnak, hanem hasznosíthatók a katasztrófavédelemben és a mentőszervezetek működésében is.

Véleményem szerint az alacsony Föld körüli pályán működő műhold-konstellációk egyre elterjedtebbek a globális kommunikációban és adatátvitelben. A jelenleg üzemeltetett rendszerek – mint a Starlink, az Iridium vagy az OneWeb - gyors adatátvitelt, alacsony

¹ GEO - Geostationary Earth Orbit

² LEO - Low Earth Orbit

késleltetést és globális lefedettséget biztosítanak, emiatt a használatuk megfelelő választás olyan katasztrófák esetén, amikor a földi kommunikációs hálózatok sérülnek vagy teljesen megsemmisülnek. A kutatás központi célkitűzése annak feltárása, hogy ezek a konstellációk miként javíthatják a vészhelyzeti kommunikációt és információközlést.

A szakdolgozatot korlátozhatja, hogy egyes LEO-konstellációk (például Starlink) vészhelyzeti alkalmazásairól még korlátozott számú esettanulmány áll rendelkezésre. Ezen túlmenően nagyon kevés információ érhető el a műholdas szolgáltatók weblapján a kormányzati szintű felhasználás lehetőségeiről. Emellett a konténer fizikai tervezési szempontjainak gyakorlati tesztelése a dolgozat keretein túlmutat.

1. A MŰHOLDAS KOMMUNIKÁCIÓ MŰKÖDÉSE

A rádiós kommunikáció ötlete már az 1800-as években megfogalmazódott, bár technológiailag csak az évszázad végére jutottak el odáig, hogy alkalmazzák. Az első rádiós üzenetet (Morse-kóddal) 1901-ben küldték át az Atlanti óceán felett. Ezzel a rádiós kommunikáció megállíthatatlan fejlődése elindult, az élet minden területére beszivárogha biztosított a gyors üzenetváltás lehetőségét mind a polgári (vállalatok, állampolgárok), mind pedig a kormányzati (diplomáciai szolgálatok, katonaság) szereplők részére. [1]

A II. világháborút követő rakéta technológiai fejlődés lehetővé tette, hogy az addigi földi átjátszó állomásokat akár az űrbe is ki lehessen telepíteni. Meglepő, de az alapötletet egy 28 éves, feltörekvő angol sci-fi író és egyébként az angliai radarkutatásokban résztvevő jól képzett villamosmérnök, Arthur C. Clark fogalmazta meg. Egy 1945-ben megjelent, mindössze két oldalas publikációjában mutatta be, hogy a földgolyó két tetszőleges pontja közötti folyamatos kommunikáció biztosítása elméletileg mindösszesen három geostacionárius pályára helyezett műholddal megoldható. Műszaki „jóslata” pedig alig több mint két évtizeden belül már részben meg is valósult. [2]

Az űrverseny hatására (1957-től) a műholdtechnológia rohamos fejlődésen ment keresztül és mára a Föld körül keringő aktív műholdak száma meghaladta a húszezret. A mai generáció számára már teljesen mindennapi és megszokott a műholdak által nyújtott szolgáltatások igénybevétele, de a legtöbben nem gondolnak bele, hogy vajon hogyan is működnek ezek a szolgáltatások valójában. [3]

De mi is az a műholdas kommunikáció?

A rádiófrekvenciás kommunikációs technológiák közé tartozik, amelyben a műholdakat használják jelátviteli központként a Föld különböző felszíni pontjai között. Legnagyobb előnye a földi hálózatoktól való függetlensége, így olyan területeken is lefedettséget biztosít, ahol a földi hálózatok kiépítése gazdaságtalan vagy lehetetlen, mint például hegyvidéki területeken, sivatagokban vagy a tengereken és az óceánokon.

Az alábbiakban részletesen fogom bemutatni a műholdas kommunikációs rendszerek alapvető elemeit, és a kommunikációs folyamat lépéseit.

1.1. A kommunikációs rendszer alapvető elemei

A műholdas kommunikációs rendszer alapvető felépítése független a műholdak típusától vagy feladatkörétől. A rendszer kettő fő részre bontható:

- Űrszegmens (műhold)
- Földi szegmens (műholdas vezérlő és feladóállomások, felhasználói szegmens)

E kettő elem együttműködése biztosítja a kommunikáció folyamatos és megbízható működését. [3]

1.1.1. Az űrszegmens

Az űrszegmens foglalja magába a műholdakat, amelyek egy előre meghatározott feladatot látnak el egy kijelölt pályán. Egy rendszerben a műholdak mennyisége a rendszertípustól függően változik, számuk elérheti akár az ezres nagyságrendet is. A műholdak nem csak a Föld-műhold viszonylatban képesek kommunikálni, hanem úgynevezett ISL³ kommunikációval ma már egymás között, ezzel egy rendkívül nagy kapacitású közvetlen műhold-műhold közötti kommunikációs hálózatot hozva létre.



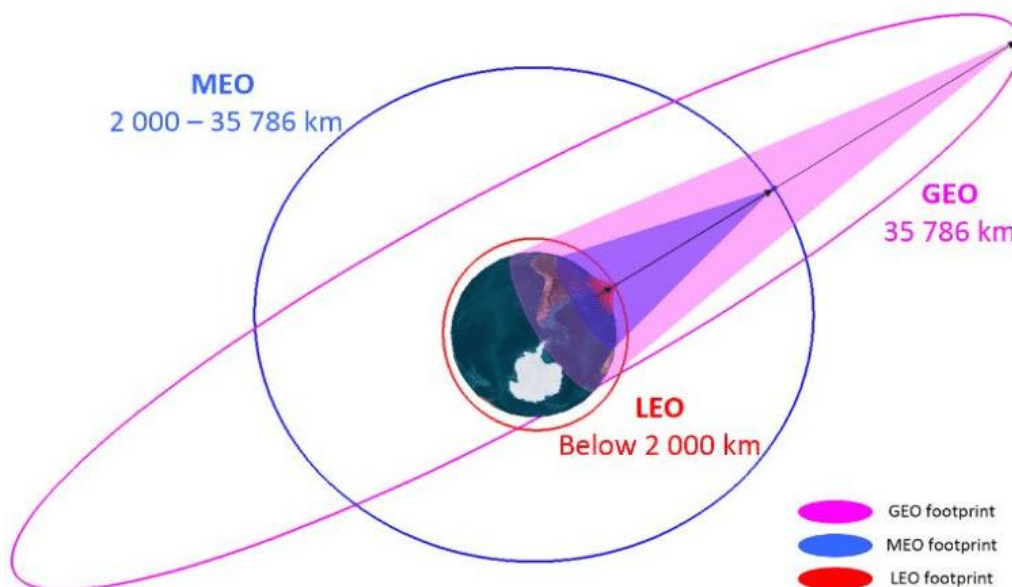
1. ábra: Jellegzetes LEO konstelláció [27]

³ ISL - Inter-Satellite Link

Az alkalmazott műholdpálya jelentős mértékben meghatározza az elérhető műholdas szolgáltatások körét és alkalmazhatóságukat.

A műholdak úgynevezett orbitális pályákon keringenek a Föld körül annak felszínétől különböző magasságokon. A pályákat magasságuktól függően három fő csoportba soroljuk, úgymint:

- a) A Földhöz legközelebbi, alacsony Föld körüli pálya (LEO), ami a 200-2000 km-es tartományban található;
- b) a MEO, azaz a közepes Föld körüli pálya, amely a 2000 és 35000 km-ig térrészt foglalja magában;
- c) az úgynevezett geoszinkron pálya (GSO) pontosan 35 786 km-es magasságon található, ahol a műhold pontosan ugyan annyi idő alatt kerüli meg a földet, mint amennyi idő alatt a Föld körbefordul a tengelye körül (23 óra 56 perc 4 másodperc). Ennek a pályának a különleges változata a geostacionárius pálya (GEO), amikor a műhold az egyenlítő fölött kering 0 fokos hajlásszögben, ezáltal a Földről nézve a nap 24 órájában folyamatosan ugyanabban a pozícióban látszik.



2. ábra: Lesugárzási nyalábok alakulása a pályamagasság függvényében [24]

1.1.2. A földi szegmens

Irányítás és vezérlés

A földi szegmens a Föld felszínén elosztva egy vagy többfunkciós telephelyek összességéből áll. Két fő feladata van: a műholdak vezérlése és felügyelete, illetve a műholdas rendszer összekapcsolása a földi egyéb (optikai, vezetékes, mikrohullámú) távközlési hálózatokkal. A



4. ábra: CEPT1-es SCPC modemek

3. ábra: 18 m-es C-sávós NEC antenna

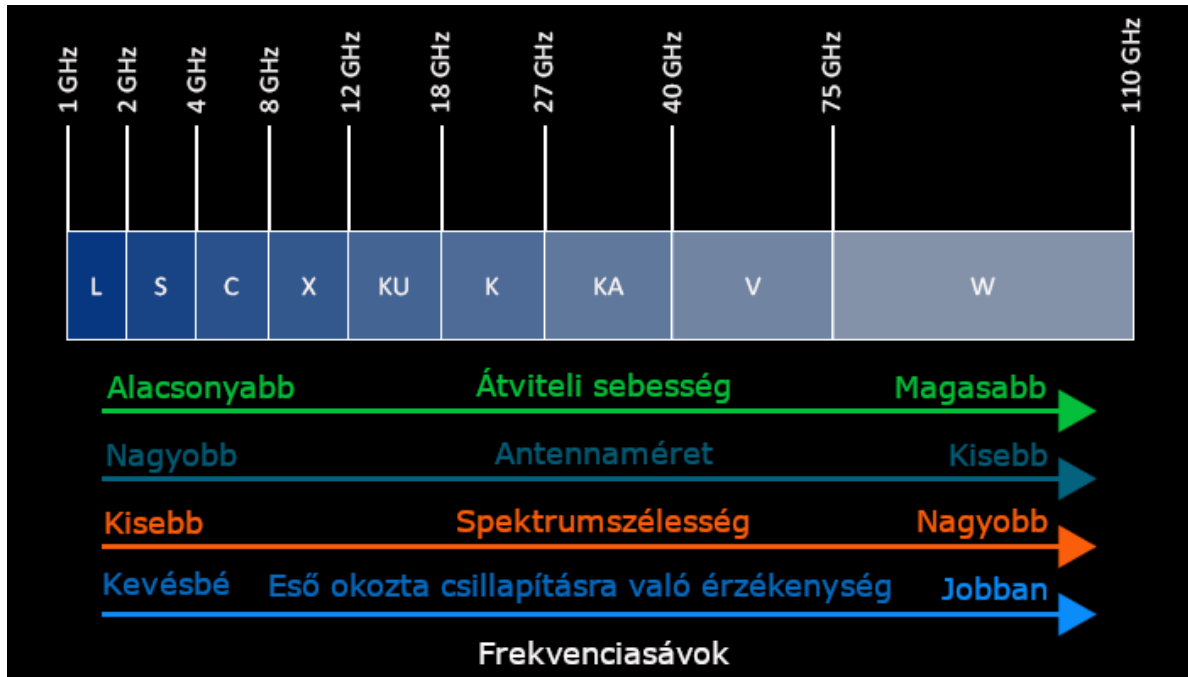
földi kiszolgáló infrastruktúrák különböző csoportokba sorolhatók, például a TT&C (telemetriai, nyomkövető és irányító központ), jelfeladó központok (HUB). [3]

A felhasználói szegmens

A felhasználói szegmens foglalja magába azokat a kommunikációs igénnyel rendelkező végpontokat, amelyek szárazföldön, tengeri és légi járművekben is megtalálhatóak. A végponti rádiós eszközöknek (terminálok) széles skálája létezik. Lehetnek személyi kommunikációt biztosító eszközök (mobil műholdas kommunikációs rendszerek vagy egy vállalat távközlési igényeit kiszolgáló helyi központ. A rendszerekben minimum egy végpont található, de a végfelhasználói terminálok száma akár a több százazres nagyságot is elérheti. [3]

1.2. A kommunikációs folyamat

A műholdas kommunikáció lépései szorosan összefüggenek a műholdas rendszer kettő fő alkotó rendszerének együttműködésével. A kommunikáció két fő irányban zajlik: a Földről a műhold felé az „uplink”, másnéven felmenő ágon, míg a műholdról a Föld felé pedig „downlink”, azaz lejövő ágon.



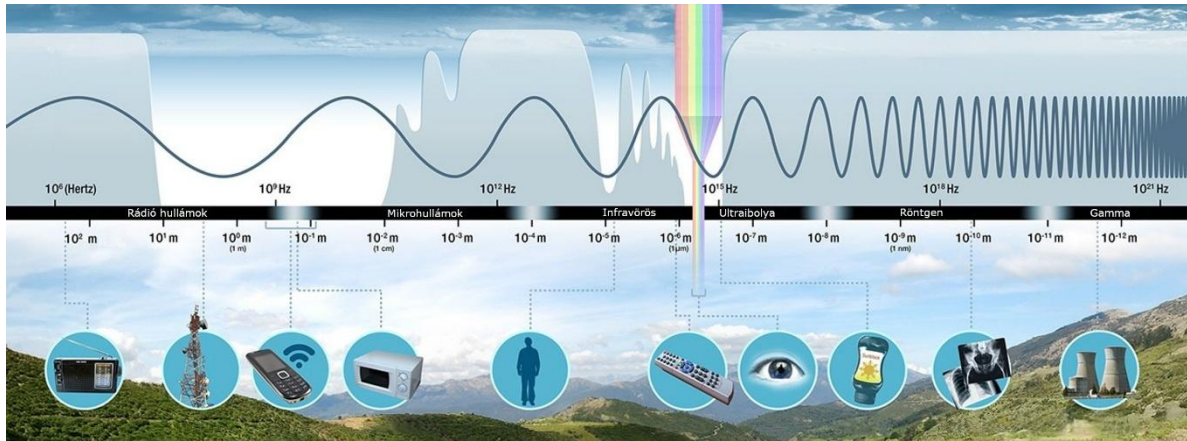
5. ábra: Műholdas frekvenciasávok [25]

A gyakorlatban azonban nem lehet tetszőleges frekvenciákat használni a műholdas távközlési rendszerekben, hiszen a Föld légköre jelentősen, ráadásul frekvenciasávonként eltérő módon befolyásolja a frekvenciák terjedését.

A légkört felépítő gázok (pld.: H_2O , CO_2 , O_3 , O_2 , N_2 molekulák), valamint az egyéb összetevők (víz, por) – a földi élet szempontjából kedvező módon – szelektív szűrőhatást fejtenek ki az elektromágneses sugárzásra, amely az abszorpció⁴, illetve szóródás formájában jelenik meg. Ezek összessége az úgynevezett jelút csillapítás, amelyet a mérnököknek figyelembe kell venniük a tervezéskor. Szerencsére azonban az elektromágneses spektrum

⁴ Abszorpció - elnyelés

egyes tartományai számára a légkör többé-kevésbé átlátszó, amelyet a szakirodalom rádióablaknak nevez.



6. ábra: Az elektromágneses spektrum [26]

Ezek közül a műhold-Föld közötti kommunikációra leginkább az úgynevezett mikrohullámú frekvencia sáv (3-30 GHz) a legalkalmasabb. Említésre méltó, hogy főleg katonai felhasználásra a VHF⁵ (30-300 MHz) és az UHF⁶ (300-3000 MHz) sávokat is igénybe veszik, azonban ezekben a sávokban a relatív sáv szélesség kicsi, azaz kevés frekvencián csak kis sáv szélességű, azaz alacsony adatátviteli sebességű csatorna áll a rendelkezésre, így érthető, hogy nagyszámú felhasználó kiszolgálására miért nem alkalmasak. Általános szabály, hogy a gyakorlatban a rádiófrekvenciák terjedési tulajdonságok miatt felmenő ágon magasabb frekvenciát használnak, mint a lejövő ágon.

A legfontosabb műholdas kommunikációra használt frekvenciatartományok:

L-sáv (L-Band, ~1-2 GHz):

Alapvetően kézi, kis teljesítményű műholdas mobil (hajó, repülőgép, gépjármű) kommunikációra (pld. GNSS⁷, műholdas telefon) alkalmazzák, mivel ezen jelek jól áthatolnak az épületeken és a növényzeten és viszonylag védett az esőcsillapítás ellen.

⁵ VHF - Very High Frequency - nagyon magas frekvencia

⁶ UHF - Ultra High Frequency - ultra magas frekvencia

⁷ GNSS - Global Navigation Satellite System

C-sáv (C-Band, ~4-8 GHz):

A klasszikus, régóta bevált műholdas kommunikációs sáv, amelyet széles körben használnak beszéd és adatátviteli rendszerekben, azonban viszonylag nagy méretű antennák használatát igényli. Jól tolerálja az esőt, ezért még a trópusi övezetekben is jól alkalmazható.

Ku-sáv (Ku-Band, ~10-18 GHz):

A műholdas TV és adatátviteli (Internet, VSAT) rendszerekben a legelterjedtebben által használt sáv, mivel jóval nagyobb sáv szélességet kínál, mint a C-sáv.

Viszonylag kis antennákkal (40-240 cm) is már nagy adatátviteli sebesség érhető el. Csérbe viszont jóval érzékenyebb az esőcsillapításra, így egy intenzívebb zápor már képes blokkolni a működését.

Ka-sáv (Ka-Band, ~26-40 GHz):

A legmodernebb műholdas távközlési rendszerekben (Starlink, Oneweb) alkalmazott sáv, amely hatalmas sáv szélességet biztosít, mindezt kis antenna méretek (30-100 cm) mellett. Sajnos rendkívül érzékeny az esőcsillapításra, a légköri gázok (oxigén, vízgőz) jelentős elnyelésével kell számolni.

Frekvencia menedzsment és szabályozás

A frekvencia, mint véges erőforrás esetében komoly nemzetközi egyeztetés szükséges a frekvenciahasználatról. A távközlési vállalatok ezért spórolnak a frekvenciákkal, azaz ugyanazt a frekvenciát többször is felhasználják. Ez csak úgy lehetséges, hogy jellemzően a Ku- és a Ka-sáv esetében a lefedettséget több kis méretű (néhány száz km átmérőjű) nyalábbal (spot) biztosítják, így az egymástól távol eső nyaláb esetében már ki lehet osztani ugyanazt a frekvenciát. A C-sávban általában igen nagy méretű ún. globális, azaz a fél földgömböt vagy egész kontinenseket lefedő nyalábokat használnak.

A számos rádiós rendszer (a földi mikrohullámú relé, műholdas távközlés) közötti véletlen zavarások (interferencia) elkerülése érdekében globálisan az ITU⁸, mint nemzetközi

⁸ ITU - International Telecommunication Union

szervezet szabályozza és koordinálja a műholdas távközlés által igénybe vehető frekvenciasávokat.

1.2.1. Hagyományos kommunikációs műholdak

A rendszer alapját egy a Földről mindig egy pozícióban látszó műhold adja, amit a felhasználók különböző méretű, fixen telepített parabola antennákon keresztül érnek el.

A kezdeti, sok buktatóval járó technikai kísérletek eredménye képpen az 1960-as évek közepére már három cég (Telstar, Relay, Syncom) távközlési holdjai üzemeltek közepes magasságú pályákon. 1965-ben azonban egy új szereplő, a COMSAT cég viszont szembe menve a többiekkel egy radikális megoldással tört az éltre, mert ők egyszerre a geostacionárius pályát (28° West) célozták meg az első, mindössze 150 csatornás kommunikációs („Early Bird”) műholdjukkal. A meglepően kis méretű hold pedig bizonyította, hogy a rendelkezésre álló technológiával gazdaságosan lehet szolgáltatásokat (telefon, telefax, televízió) nyújtani geostacionárius pályáról. [4] [5]

A várható siker előtt a COMSAT még 1964-ben megkezdte egy nagyobb erőforrásokkal rendelkező műholdas kommunikációs konzorcium létrehozását INTELSAT néven, amely még napjainkban is az egyik legnagyobb szereplője az iparágaknak. A programhoz számos ország csatlakozott, amelynek eredménye képpen kialakultak azok a műholdas vevő és feladó földi állomások (teleport, HUB, gateway station) hálózatai, amelyek lehetővé teszik a különböző szolgáltatók és szolgáltatások közötti együttműködést, összekötve a műholdas és a földi kommunikációs infrastruktúra elemeit. [4] [5]

Mint lenni szokott kezdetben a rendkívül magas költségek miatt a kormányzati, diplomáciai és a katonai felhasználás minden téren prioritást élvezett a műholdas távközlés területén, a legnagyobb és legmodernebb hálózatokat és kapacitásokat ők, illetve érdekükben üzemeltették.

Az első kereskedelmi műholdas rendszerekben a műholdak leginkább egyszerű átjátszóként működtek és a jelfeldolgozás lényegi része a földi szegmensben zajlott. Kezdetben a kisteljesítményű GEO pályás műholdak forgalma alapvetően a C-sávban (3,7-4,2 GHz) zajlott, így az analóg szolgáltatások igénybevételéhez nagy méretű antennákra volt szükség.

Értelemszerűen a korai földi állomások nagyon komoly méretű infrastrukturális elemet jelentettek és a felhasználók csak azokon keresztül férhettek hozzá a szolgáltatásokhoz. [5]

Azonban gyorsan nyilvánvalóvá vált, hogy a hagyományos analóg eljárásokkal kialakított műholdas távközlési hálózatok nem működnek optimálisan, túl sok az üresjárat, a csatornakapacitások kihasználtsága messze elmarad a lehetőségektől és a gazdaságilag elvárttól. A műholdas távközlési szegmensben a digitális átállás a 1990-es évekre gyakorlatilag egy évtized alatt lezajlott, amely lehetővé tette az egyre inkább terjedő IP alapú adatátvitelt.

Ezzel párhuzamosan megkezdődött a kereskedelmi műholdas szolgáltatások a Ku (12-18 GHz) és Ka (27-40 GHz) sávokra történő kiterjesztése. Jelentős változást hozott a DVB-S⁹ szabvány megjelenése, amely nagymértékben növelte az adatátviteli kapacitásokat és rendkívül rugalmas módon lehetővé vált azok menedzselése. [6]

A műholdak teljesítményének növekedésével a méret problémát kezdetben az úgynevezett VSAT¹⁰ rendszerek bevezetésével oldották meg. Az 1990-es években a professzionális felhasználók részére megjelentek szinte a Föld teljes területén lefedettséget biztosító kisméretű (1-3 méter) antennát használó műholdas adatterminál szolgáltatások széles köre (iDirect, Hughes, Viasat, Gilat, Cobham), amelyeket alapvetően főleg a különböző típusú járműveket (tehergépjármű, hajók, repülőgépek, vasút) üzemeltető szállítmányozási, vagy nagy kiterjedésű földi vagy tengeri infrastruktúrákat üzemeltető cégek, valamint kormányzati (államigazgatás, diplomáciai szolgálatok, nemzetközi szervezetek) és katonai szereplők vesznek igénybe.

1.2.2. A New Space Age, azaz az új űrkorszak

A fentebb bemutatott technológiák jól működtek és céljaiknak megfeleltek, de a kivitelezésük és üzemeltetésük óriási összegeket emésztett fel. Az általuk biztosított szolgáltatások az átlagembereknek megfizethetetlenek voltak így csak a kormányzati szféra és a nagy cégek tudták használni.

⁹ DVB-S - Digital Video Broadcasting Satellite

¹⁰ VSAT - Very Small Aperture Terminal

A változást az új űrkorszak hozta el, amit a szakirodalom a „New Space Age” névvel illet és amelyik teljesen megváltoztatta a piaci körülményeket és lehetőségeket.

Az űrtechnológia fejlődésével és a megnövekedett kereskedelmi hasznosításával nagy mértékű változtatások mentek végbe, ezzel új „ökoszisztémát” létrehozva az űrszektorban. 2010-óta számos új start-up vállalat alakult meg, amik a költséghatékonyságon és a kereslet vezérelt szolgáltatásokon alapulnak. Az új korszakban már nem a kormányzati versengés az irányadó, hanem a magánpiaci résztvevők aktivitása.

Az új űrkorszak technológia alapját az újra felhasználható rakéták, mega-konstellációk és a mesterséges intelligencia jelentik.

A „New Space Age” gazdasági modellje jelentősen eltér az eddigi űrprojektektől. Az új üzleti modell kulcsszavai: a megfizethetőbb, a gyorsabb és az innovatívabb. A finanszírozási forma is nagyban eltér, míg eddig az országok pénzelték az űrkutatást, jelenleg a vállalati finanszírozás lett jellemző. A technológiai-alapú (technology-push) piacvezetői elvről áttértek a piacvezérelt (demand-pull) típusú modellre, ami sokkal inkább vállalkozói szellemű. A kiadások drámai módon csökkentek az eddigiekhez képest, mind az indítási árakban, mind a műholdak költségében.

A 1960-as években használt hordozórakéták kilogrammonkénti felbocsájtási ára elérhette a 1 millió dollárt is. A modernebb Delta IV Heavy, amit 2004-től használtak, 15 000 USD/kg kilövési költséget ért el. A Space X által tervezett Falcon Heavy még tovább csökkentette a költségeket, 1 500 USD/kg árra. A rakéta „Side Booster” -ei – oldal gyorsító rakétái - újrahasznosíthatóak. A jövőben a költségek valószínűleg még tovább fog csökkenni, a rakéták újra felhasználhatósága miatt. A SpaceX által tervezett rakétát a Starship-et amennyiben elkészül, a becsült árat 100-200 USD/kg-ra csökkenti. [7] [8] [9] [10]

NÉV	Hasznos teherbírás (kg)	Kilövési ár (USD)	USD/kg
Delta IV Heavy	28 370	435 millió	15 000
Falcon Heavy	64 000	90 millió	1 500
Starship*	100 000+		~100-200
*még nem volt kilövés, az értékek becslések			

1. táblázat: Fellövési költségek összehasonlítása [Saját készítés]

A méretredukációnak és szabványosításnak hála a „New Space Age” műholdak tömeggyárthatóvá váltak, emiatt a gyártási költségük is drasztikusan csökkent. A kisműholdakat, mint a CubeSat és a CanSat 1 000 és 500 USD-ért legyárthatóak. A költségek csökkenését még az is nagyban befolyásolta, hogy a kis műholdakat tömegesen lehet feljuttatni és pályára állítani. [9] [10]

A hagyományos űr korszakban a műholdakat egyedileg gyártották a legkisebb alkatrészekről kezdve és minden egyes alkatrészt űrkompatibilissé fejlesztettek, nem használták az eredetileg piacon megtalálható termékeket. Az új korszakban viszont sok cég úgy döntött, inkább teszteli, hogy a piaci termékek űrminőségűek-e, ezzel nagy mértékben csökkentették a kiadásokat.

2. AZ ALACSONYPÁLYÁS MŰHOLDOK ISMERTETÉSE

A legalacsonyabban elhelyezkedő és leggazdaságosabban használható pálya az úgynevezett LEO (Low Earth Orbit), azaz alacsony Föld körüli pálya. A Föld feletti magasság ennél a pálya típusnál 200-2000 km közötti és a keringési idő átlagosan 90-120 perc körüli. Előnye a rendkívül alacsony késleltetés (~20-70 milliszekundum) és földmegfigyelés esetén a magas felbontás, akár 15 és 0,5 méter közötti is elérhető, ráadásul a közelebbi pályára való feljutási költségei is jóval kedvezőbbek. [10] [11]

Hátránya a többi pályához képest viszont az, hogy egy műhold csak sokkal kisebb területet képes lefedni (900 km - 3,000 km átmérőjű kör), emiatt több műholdból álló konstellációt kell kialakítani a kívánt időbeli és térbeli lefedettség elérése érdekében. [11]

A másik hátrány pedig a műholdak várható élettartama, hiszen a körülbelül 3-8 évre becsült üzemeltetési idő jelentősen különbözik a GEO műholdak átlagosan ma már legalább 15-20 évre tervezett használhatóságától. [8] [10]

Másfelől a rövid élettartam viszont előnyt is jelent egyben, mivel a gyakori és szükségszerű cserélődés miatt a LEO műholdak mindig a legfejlettebb technológiát hordozzák szemben a hosszú élettartalmú GEO műholdakkal. A fenti indokok miatt használják előszeretettel az új űrkorszakban a LEO műholdakat.

2.1. Felépítésük

Az alacsony pályás műholdak felépítése és működése alapvetően nem tér el jelentősen magasabb pályán keringő rendszerektől, viszont mégis vannak jellegzetes különbségek, abból a tényből kiindulva, hogy sokkal közelebb keringenek a Földhöz, illetve a nagy tömegben gyártott kis méretű műholdakat valamilyen konstellációban alkalmazzák. A felépítésük ugyanakkor igencsak változatos különösen arra való tekintettel, hogy jelentősen különböző funkciót valósítanak meg.

Az alábbiakban bemutatom a LEO műholdak általános jellemzőit és felépítését.

A műholdak két fő alkatrészből állnak úgymint hasznos teherből, valamint a hordozó műholdplatformból.

A hasznos teher foglalja magába a küldetés-specifikus felszerelést, mint az optikai és egyéb opto-elektronikai érzékelőket, vagy éppen a kommunikációs egységeket.

A műholdplatform adja a megfelelően tartós fizikai tartószerkezetet, valamint a műhold alapvető működéséhez szükséges részegységeket. A legfontosabb a fedélzeti tápellátás, amely általában két fő részből épül fel, az elsődleges energiaforrást jelentő napelem(ek)ből, illetve az akkumulátorokból.

A termikus szabályzó rendszer biztosítja a műholdon belüli megfelelő hőmérséklet tartományt. A csillagok helyzetének megfigyelésén alapuló (Star-tracker) navigációs rendszer adja a pályakövetéshez szükséges adatokat és a manőverező hajtóművekkel van lehetőség a szükséges pályakorrekciók végrehajtására.

A fedélzeten rendelkezésre álló üzemanyag mennyiség igen fontos tényező, ezért a passzív orientációt és geomágneses vagy aerodinamikai stabilizációt is használó műholdak esetében jelentős mennyiségű üzemanyag spórolható meg.

A vezérlő és felügyeleti alrendszerek a saját kommunikációs eszközeiken keresztül biztosítják a hosszútávú üzemeltetés lehetőségét a földi irányítóközpont részére.

Napjainkban ma már több cég is kínál szabványosított platformot, így a megrendelőnek csak a hasznos teher kialakításával kell foglalkoznia. Ez a fajta megoldás egyszerre költséghatékony és másrészt gyorsítja a fejlesztés folyamatát.

A "New Space Age" technológiák révén a műholdak gyártása és feljuttatása sokkal olcsóbbá vált a hagyományos műholdakhoz képest. A gyártók innovatív megoldások fejlesztésével a minimális súlyra, a könnyű és gyors gyártásra fókuszálnak. A műholdak elkészítésében egyre nagy szerepet kap a 3D nyomtatás és az automatizált tömeggyártás. A rövid átfutási idő miatt a testre szabott műholdak akár néhány hónap alatt készre szerelhetők. [12]

2.2. Üzemeltetésük

Az alacsonypályás műholdak működése összetett rendszerek harmonikus együttműködésén alapul. Ebben a fejezetben részletesen megvizsgáljuk a műholdak pályadinamikáját, kommunikációs rendszereit és navigációs technológiáit.

Pályadinamika és pozicionálás

A 200–2000 km közötti magasságon elhelyezkedő LEO pályák esetében kb. 90–120 perc közötti keringési idővel kell számolni (minél alacsonyabb a pálya, annál gyorsabb a keringés). A rendkívül gyors pályasebességük miatt ($\sim 7,8 \text{ km/s} = 28\,080 \text{ km/h}$) a műholdak csak rövid ideig láthatók egy adat földrajzi helyről, így azok hamar eltűnnek a földi állomások látóteréből. Ebből kifolyólag egy adott terület teljes és folyamatos lefedettség eléréséhez egy jól megtervezett és a felhasználói igényekhez igazodó konstelláció szükséges. Az azonos konstellációban lévő műholdak alapvetően azonos magasságú és indikációjú pályán mozognak és a térben párokat vagy tripleteket alkotva, meghatározott pozíciójukat folyamatosan tartva üzemelnek. [10] [11]

Pályatípusok

A LEO egy fő pályakategória és több különböző altípusra osztható. Az altípusokat a Föld egyenlítői síkjával bezárt szögük, azaz inklinációjuk alapján kategorizáljuk be, amely meghatározza, hogy a műhold a Föld mely szélességi zónáit fedheti le.

Hajlásszög szerinti típusok az egyenlítői pályák (Equatorial Orbits), a poláris pályák (Polar Orbits) és a napszinkron pályák (Sun-Synchronous Orbits, SSO).

Egyenlítői Pályák (Equatorial Orbits)

Ezen pályák nullához közeli (± 5 fok) inklinációval rendelkeznek és főleg a Föld egyenlítői régióinak lefedésére szolgálnak.

Poláris pályák (Polar Orbits)

Ezen pályák inklinációja közel 90° és mindig áthaladnak a Déli- és az Északi-sark felett, így biztosítva a magasabb szélességi fokú sarkvidéki területeken a lefedettséget.

Napszinkron pályák (Sun- Synchronous Orbits, SSO)

Ezen pályák jellemzően retrográd, több mint 90° -os inklinációjú szögben működnek. Fő jellemzőjük, hogy a Nappal szinkronban forognak oly módon, hogy a műhold egy azonos pont felett minden áthaladáskor ugyanabban a helyi napedőben halad el. [11]

Elrendezés konstelláció szerint

A LEO műholdak ahhoz, hogy folyamatos globális lefedettséget tudjanak biztosítani konstellációkban működnek. A műholdak a konstellációban azonos magasságban és inklinációval, de különböző pályasíkokon helyezkednek el, közel egyenletesen elosztva.

Egyetlen pályasíkú konstellációk (Single Plane Constellations)

Ennél a típusnál minden eszköz egyetlen pálya síkban mozog és mind az egyenlítői, mind pedig a poláris pályák szóba jöhetnek, így lehetővé téve az egyenlítői vagy a sarkvidéki területek lefedését. [13]

Walker-pattern konstellációk

A Walker Pattern már egy bonyolultabb, globális lefedettséget adó többsíkú konstellációs típus. Az egyik leggyakrabban alkalmazott szervezési mód, amelynek lényege, hogy a műholdak pályája, excentricitása¹¹ és dőlésszöge hasonló, így az esetlegesen megjelenő perturbációs zavarok¹² közel azonos mértékben hatnak mindegyik műholdra. Ezzel biztosítható, hogy a műholdak geometriai pozíciója és a köztük lévő távolság is könnyebben tartható, ezzel üzemanyagot spórolva azok élettartama kitolható. [13]

Streets of Coverage

A poláris pályát alkalmazó konstellációk esetében használatos szervezési mód, amelynek keretében az egyes műholdak mozgását pályasíkokban szinkronizáljuk a szomszédos síkokban lévő műhold mozgásával, ezzel egy optimális konfigurációt létrehozva. [13]

Rozetta konstellációk

A Rozetta elrendezés esetében a pályák periódusa megegyezik a sziderikus nap hosszának egyszerű tört részével, ezzel elérve, hogy a műholdak ismétlődő mintázatot alkotva azonos időn belül ugyanazon földi pont fölé érnek vissza. [13]

¹¹ Excentricitás - eltérés a középponttól vagy a szimmetriatengelytől

¹² Perturbációs zavarok - olyan kis külső hatások vagy eltérések egy rendszerben, amelyek módosítják annak eredeti állapotát vagy pályáját

Hibrid Konstellációk

A hibrid konstellációk a fent leírt típusú konstellációk kombinációjából állnak össze. Az eltérő inklinációjú¹³ szegmenseket az összeütközés elkerülése érdekében jelentősen eltérő magasságban működtetik, az elkülönítés akár 50 km is lehet. [13]

2.3. A LEO műholdak típusai

Az alacsonypályás műholdak számos felhasználásra alkalmasak, ezen belül különösen a kis késleltetésű kommunikációra és földmegfigyelési célokra használják őket előszeretettel.

A LEO műholdakat az alábbi részben sokszínűségük miatt kétfajta csoportosítás alapján, a tömeg/méretet és a felhasználási módot alapul vételeivel vizsgáltam.

2.3.1. Tömeg és méret szerinti csoportosítás:

A gyakorlatban a következő tömeg szerinti kategóriákkal találkozunk a szakirodalomban:

- közepes kategóriájú műholdak mérettartománya 500-1500 kg közé tehető;
- a legnépesebb csoport a kisműholdak 100-500 kg tömeggel rendelkeznek;
- a mikroműholdak 10 és 100 kg közöttiek;
- míg a nanoműholdak (A BME első műholdja a Masat-1 is ebbe a kategóriába tartozott.) mindössze 1 és 10 kg közötti tömegűek. [10]

2.3.2. Funkció alapú csoportosítás

Kommunikációs műholdak

Ebbe a kategóriába tartozik a ma ismert mega-konstellációk mindegyike. A kis késleltetésük és alacsony energiaigényük miatt kifejezetten alkalmasak a telekommunikációs szolgáltatásokhoz. Fő feladataik közé tartozik nagy kapacitású (szélessávú) kommunikációs csatornák biztosítása a földi állomások vagy akár más műholdak között.

Közös jellemzőjük, hogy egyszerre több frekvenciasávot alkalmaznak: a felhasználói terminálok és a műhold közötti kapcsolatokat alapvetően a Ka-sávú (27,5–29,1 GHz-es

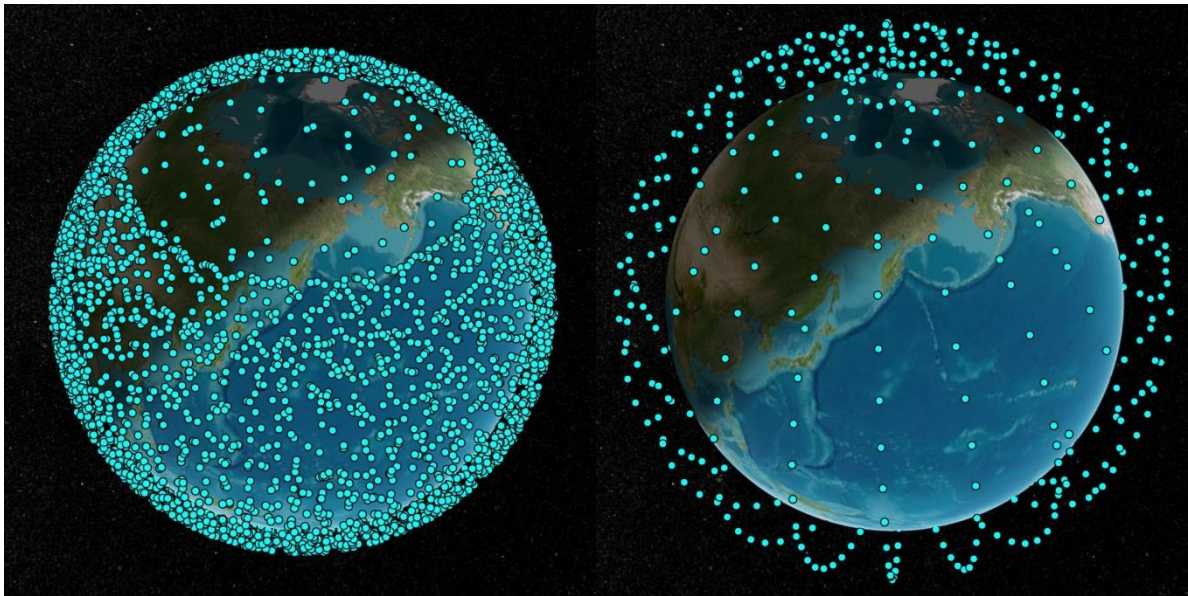
¹³ Inklináció - egy pálya vagy tengely dőlésszöge egy referencia-síkhöz képest

felfelé és 17,8–18,6 GHz-es lefelé) vagy/és a Ku-sávú (14,0–14,5 GHz-es felfelé és 10,7–12,7 GHz-es lefelé) frekvenciatartományban valósítják meg annak érdekében, hogy minél nagyobb adatsebességet tudjanak a legtöbb felhasználó részére biztosítani.

Ebbe a csoportba tartozik többek között a Starlink az SpaceX-től (USA), a OneWeb (UK/EU), a Qianfan (Kína), a Kuiper az Amazontól (USA) és az Irídium (EU).

A LEO műholdak egyik speciális típusa kifejezetten az IoT-alapú eszközök kommunikációját biztosítják (például LoRa¹⁴) azok követése és a folyamatos adatgyűjtés érdekében. Az ilyen kis energiaigényű és kicsi adatátviteli kapacitást igénylő eszközök (például: különböző típusú érzékelők) a kritikus helyzetekben hatalmas szerepet játszanak, hiszen folyamatosan pontos adatokat képesek szolgáltatni az adott körzetből, még akkor is, ha a földi infrastruktúra már súlyosan megsérült.

Starlink



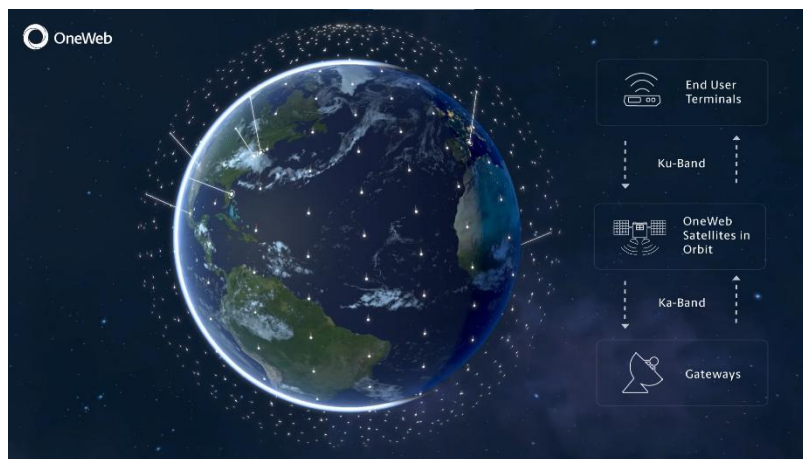
7. ábra: Starlink és OneWeb műholdak helyzete

A Starlink az egyik legismertebb és legelőrehaladottabb LEO konstellációs rendszer, amelyet Elon Musk cége a SpaceX fejleszt és üzemeltet. A műholdak körülbelül 550 km magasságban keringenek. A flotta 2025-re már 9600 műholdból állt. A tervezett műhold mennyiség 12 000, de a távlati tervek egy 42 000-es számot tartalmaznak. A polgári felhasználók részére

¹⁴ LoRa - Long Range, azaz nagy hatótávolságú, de kis kimenőteljesítményű

45-280 Mbps letöltési és 10–30 Mbps feltöltési sebességet nyújtanak 25–60 ms közötti késleltetéssel, ami bőven elegendő egy átlagos felhasználó részére. A kormányzati szereplők számára dedikáltan az X-sávban (7.9–8.4 GHz felfelé és 7.25–7.75 GHz lefelé) legalább 300 Mbps kapacitású sáv szélességet kínálnak.

OneWeb



8. ábra: OneWeb konstelláció műholdjai [14]

A OneWeb egy indiai-angol tulajdonú vállalat, amelynek internet szolgáltatás a fő profilja. A flotta műholdjai 1200 km magasságban működnek és 109 perc alatt kerülnek meg a Földet. 12 síkban, 87° inklinációjú pályán Walker-Star alakzatban keringenek. A cégnek jelenleg 648 műholdja van. A rendszer késleltetése körülbelül 70 milliszekundum, az áteresztő képessége jelenleg 100+ Mbps, de a Nextgen projekt keretében 2032-re már a 600 Mbps kapacitás elérését célozták meg. A szolgáltatásukat egyre inkább az európai nagyvállalati és kormányzati igények (védett kommunikáció) irányába összpontosítják. Az első – az európai szuverenitást biztosító – LEO műholdas szolgáltatóvá kívánnak válni az EU területén. [14]

Qianfan

A Qianfan vagy másnéven G60 Starlink/Spacesail Constellation, a kínai LEO mega-konstelláció, a Shanghai Spacecom Satellite Technology (SSST) tulajdonában áll. Célja felvenni a verset a SpaceX Starlink-jével és világszerte hozzáférhető internetelérést biztosítani. A grandiózus projekt 2024-ben indult és 2030-ra 15 000 műholdat terveznek pályára állítani és jelenleg már 108 műholdjuk kering a Föld körül. A piaci dinamikát jól

jellemzi, hogy Kína ezzel a projekttel párhuzamosan további három hasonló rendszert tervez üzembe helyezni. 2030-35 közötti időszakban.

Kuiper

Az Amazon Leo régebbi ismert nevén a Kuiper projekt az Amazon cég által 2019-ben létrehozott internetszolgáltató konstelláció. A cégnek jelenleg 3236 műholdra van fellövési engedélye. A műholdjai tervezetten majd három orbitális héjon 590 km-en, 610 km-en és 630 km-en 98 orbitális síkon fognak keringeni. A felbocsátást az Arianespace, a Blue Origin, a SpaceX és a United Launch Alliance (ULA) biztosítja.

Iridium

A legrégebbi konstelláció, amelyet az Iridium Communications birtokol és üzemeltet. A rendszer 66 aktív műhoddal üzemel, 1998-óta. A műholdak 781 km magasságban 86,4°-os hajlászögben keringenek. A konstelláció a műholdas telefonok számára biztosít L-sávú hang- és adatátvitelt. Az első műholdak antennáinak alakja, valamint a felületi borításuk miatt a műholdak a napfényt erősen visszaverték a Földre, és emiatt éjszaka az egyik legfényesebb objektumok („Iridium flare”) között szerepeltek és akár nappal is láthatóak voltak. A második generációs műholdak már nem produkálnak ilyen jelenséget.

Földmegfigyelő (EO) és meteorológiai műholdak

A föld folyamatos megfigyeléséhez az egyik legjobb megoldás a nagy felbontóképesség (30cm/pixel) és a felvételek közel valós idejű továbbításának lehetősége miatt a LEO műholdak alkalmazása. Bár a LEO műholdak egyesével csak kis területet fednek le a konstellációk miatt megvalósítható a teljes földfelszín, illetve légkör folytonos megfigyelése.

A Föld-megfigyelő műholdak két fő érzékelési módszert használnak. Az egyik módszer más tárgyak által visszavert sugárzásokat mérése a passzív érzékelők, például optikai szenzorok, radiométerek segítségével. A másik módszer az aktív érzékelők használata. Ezek

elektromágneses sugárzást bocsájtanak ki (letapogatnak) és a visszavert energiát mérik. Ilyenek például a SAR¹⁵ radarok és a LiDAR¹⁶ eszközök.

Az európai hírügynökség égisze (ESA¹⁷) alatt futó Copernikus program keretében a különböző típusú Sentinel műholdak igen jó minőségű képeket képesek készíteni a Föld felszínéről, amelyeket feldolgozva a polgári és kormányzati megrendelők viszonylag gyorsan (az átrepülést követően néhány órán belül) meg is kaphatnak. Egy vészhelyzetben ezen képek rendkívül fontos szerepet kapnak a helyzet értékelése során.

Az évtizedek óta működő, rendszeresen továbbfejlesztett időjárás megfigyelő műhold rendszerek mára már elengedhetetlen szerepet töltenek be az időjárás előrejelzésében. Szerepük nem megkerülhető és a tőlük származó adatok minden vészhelyzetben rendelkezésre kell, hogy álljanak. [11] [15]

¹⁵ SAR - Szintetikus Aperturájú Rádiólokátor

¹⁶ LiDAR - Light Detection and Ranging, lézeres távmérő

¹⁷ ESA - European Space Agency

3. A VÉSZHELYZETEK ELEMZÉSE ÉS A KOMMUNIKÁCIÓ SZEREPE

A 21. században élünk, ahol az információ azonnali és folyamatosan elérhető, ezzel biztonságérzetet adva az embereknek. Ennek ellenére, amikor a legfontosabb lenne a kapcsolattartás és a kommunikáció, az információ áramlás megszakad. Amikor különböző természeti és emberi eredetű katasztrófák sújtanak le, az információs infrastruktúra gyakran csődöt mond. A kommunikáció összeomlása nem csak kényelmetlenséget okoz. Az információ nem jut el elég gyorsan az áldozatokhoz és a mentőcsapatokhoz, ami közvetlenül életüket veszélyeztet.

E fejezet célja a vészhelyzetek típusainak és annak bemutatása, hogy ezen helyzetek miként befolyásolják és akadályozzák az információ áramlást, elemzem a hagyományos kommunikációs rendszerek gyengeségeit.

3.1. Mit nevezünk vészhelyzetnek?

A vészhelyzet egy alapvető fogalom, amelyet mindenki használ, de a pontos meghatározását nem feltétlenül tudja. A vészhelyzet nem csak egy rendkívüli esemény, hanem egy speciális állapot, amely alapvetően változtathatja meg a társadalmi és technikai rendszer normális rendszerinti működését. A legszélesebb körben elfogadott definíció a vészhelyzetre, hogy az egy olyan váratlan és veszélyes esemény, ami életet, egészséget, anyagi javakat, kritikus infrastruktúrát vagy környezetet fenyeget, és azonnali, koordinált beavatkozást igényel.

A vészhelyzet, mint fogalom, magába foglalja a kisebb, lokális helyzeteket is, mint például közlekedési balesetek, lakástüzek stb., és ez a fogalom nem teljesen felel meg a jelen dolgozat alapjául szolgáló alaphelyzetnek. Az általunk vizsgált vészhelyzetekre leginkább a katasztrófa szó a legmegfelelőbb. Általánosan olyan helyzeteket tekintünk katasztrófának, amikor a vészhelyzet következményei meghaladják a helyszínen rendelkezésre álló erők kezelői képességét, és emiatt külső segítségre van szükség (regionális, országos, nemzetközi). Az, hogy e két fogalmat megkülönböztetjük, fontos a különböző igények szempontjából. Nekünk a kommunikációs igényeket kell vizsgálnunk. Míg egy kisebb vészhelyzetnél a kommunikációs igény csekély, és a hagyományos rendszer könnyedén kezelni tudja, addig egy tényleges katasztrófa bekövetkeztekor jobb esetben csak túlterhelődnek, de a valós tapasztalatok alapján gyakran összeomlanak vagy akár fizikailag meg is semmisülnek a hálózatok a külső tényezők miatt.

A dolgozat témájának körében az olyan vészhelyzeteket, katasztrófákat vizsgáljuk, amelyek a hagyományos kommunikációs infrastruktúra összeomlásával járnak. Ilyenek például a különböző környezeti katasztrófák vagy az ipari balesetek, terrortámadások. [16] [17]

3.2. A vészhelyzetek/katasztrófák típusai

A vészhelyzetek ismerete rendkívül fontos a felkészülés szempontjából, emiatt különböző típusainak ismerete elengedhetetlen. Az eltérő esetek eltérő megoldásokat igényelnek. A dolgozatban csak a Magyarországon is elforduló veszélyeket veszem figyelembe és ismertetem.

A szakirodalom alapján a katasztrófákat két fő csoportra osztjuk: az egyik a természeti eredetű a másik az mesterséges eredetű katasztrófák csoportja.

3.2.1. Természeti eredetű vészhelyzetek

A természeti eredetű vészhelyzetek a bolygónk természetes rendjébe beletartozó folyamatok. Ezek az események akkor válnak vészhelyzetté, ha emberi tevékenységgel kerülnek konfliktusba. Az emberi tevékenységek, mint például a környezetpusztítás vagy azon belül városiasodás egyre inkább beleszól a Föld természeti rendszerébe, miáltal egyre több és pusztítóbb katasztrófa következik be.

Geofizikai események

A geofizikai veszélyek a Föld belső folyamataiból adódó nagy pusztító erejű természeti események lehetséges megtörténtét jelentik. E típusú katasztrófákat sok esetben nehezen vagy egyáltalán nem lehet előre jelezni, és gyakran azonnali következményekkel járnak.

Földrengések

A földrengések a tektonikuslemezek mozgásából eredendően, hirtelen felszabaduló energia következményei. Előre jelezhetőség hiányában nem lehet felkészülni rájuk, és emiatt a veszélyességi szintjük nagyon magas, ráadásul gyakran váltanak ki más geofizikai veszélyeket, mint például szökőárakat vagy földcsuszamlásokat. Magyarországon a földrengések alapvetően nem gyakoriak, de 30- 40 évente előfordulnak érdemi következményeket kiváltani képes nagyobb földrengések, amelyek az 5 fölötti magnitúdót is

eléri. A földrengések a kommunikációs infrastruktúrát is lerombolhatják, ezzel megnehezítve a mentőcsapatok munkáját.

Biológiai események

A biológiai veszélyek, mint az egyik legjellemzőbb példával élve, a járványok, bár az emberekre veszélyt jelentenek, a kommunikációs hálózatokban nem tesznek kárt. Az egyetlen problémát a hálózatok túlterhelődése okozza, illetve, hogy a szakképzett munkaerő a megbetegedések miatt kiesik a munkából, ezzel hátráltatva a rendszerek megfelelő működését.

Klimatológiai események

Ezek a Föld éghajlatának változásából következő hosszú távú, globális vagy regionális változások, amelyek olyan negatív következményekkel is járhatnak, mint az aszály, a hőhullámok, rendszeres erdőtűzek. A tényleges katasztrófhelyzet tehát nem maguk a klimatológiai események, hanem az általuk okozott, hirtelen bekövetkező, másodlagos események okozzák.

Meteorológiai események

A meteorológiai veszélyek bár előre jelezhetőek, a leggyakoribb veszélyforrások közé sorolhatóak, és a hatásuk nagy területre is kiterjedhet. Előfordulásuk gyakoriságának növekedése összefüggésbe hozható a bolygónkat érintő klimatológiai folyamatokkal.

Extrém viharok (tornádók)

A legpusztítóbb légköri jelenségek egyike a pusztító erejű szélvihar. Gyors kialakulásuk miatt az előrejelzésük kifejezetten nehéz/lehetetlen. A szélsősebesség szélsőséges esetekben akár 500 km/óra feletti is lehet. Egyik legismertebb típusuk a tornádó, amely Észak-Amerika szárazföldi területeit sújtó forgószelek. Bár a tornádók útvonala általában nem túl széles sávot érint és a tornádók, szemben a tengeri forgószelekkel, csak rövid, pár kilométeres távot tesznek meg, erejükkel szinte minden útjukba eső tárgyat elpusztítanak.

A Forgószelek az elmúlt években többször is megfigyelhetők voltak Magyarországon is, bár szerencsére csak kisebb erejűek. A távközlési- és elektromosvezeték hálózatokat azonban így is többször megrongálták.

Viharok és a kapcsolódó jelenségek

A kisebb léptékű de heves viharok is veszélyt jelenthetnek a földi kommunikációs csatornákra. A nagy sebességű szelek megrongálhatják az antennákat és a vezetékhalózatokat. A villámok tüzeket okozhatnak és üzemzavarokat okozhatnak a villamos áram-hálózatokban. A jégesők veszélye sem elhanyagolható.

Extrém hideg/hőhullámok

Az extrém hideg, a hóviharok, a jegesedés rengeteg problémát okoz az elektromos hálózatokban. Ezek láncreakciót indíthatnak el, súlyos üzemzavarokat okozva a hálózatokban.

A hőhullámok növelik az erdőtüzek kockázatát, illetve a megnövekedett áramfogyasztás miatt a hálózatok túlterhelté válhatnak. Egyre gyakoribb továbbá, hogy az adatátviteli infrastruktúra egyes elemei (különösen a megnövekedett terhelés következtében) túlmelegednek és ennek következtében tönkremennek vagy védelmi megoldásaiknak köszönhetően lekapcsolnak.

A klímaváltozás miatt egyre gyakoribbak az aszályok és az egyre forróbb nyarak. Emiatt megnő a pusztító tüzesetek veszélye. Kiváltó okok lehetnek viharok, villámcsapások, de sok esetben emberi kiváltó okokról beszélhetünk, mint például felelőtlen mezőgazdasági égetések, gondatlan tűzgyújtás, túlhevülő villanyvezetékek vagy eldobott cigaretta-csikkok. A legnagyobb veszélyt és pusztítást a tűzviharok okozzák, amire Magyarországon még csak egyszer került sor, de a környező országokban és az egész világon egyre gyakoribbak.

Mi is az a tűzvihar? Olyan tüzeset, amikor a tűz olyan intenzív és nagy energiájú, hogy a hőtermelésével saját önálló felhőrendszert hoz létre. Erre a felhőrendszerre jellemzőek a száraz villámok, amelyek akár a kialakulási helyüktől több kilométer távolságban is újabb tüzeket okozhatnak, ezzel újabb veszélyeket váltva ki és akadályozva az oltási munkálatokat. A tűzvihar másik veszélyes sajátossága a kaotikus, gyorsan változó szélrendszer, amelyet a tűz extrém hője és az ennek következtében kialakuló hőmérsékleti különbségek keltenek. Ennek a szélrendszernek az egyik legveszélyesebb tulajdonsága, hogy megváltoztathatja a tűz irányát, illetve, hogy extrém esetekben akár tűzörvény vagy tornádó is kialakulhat belőle.

A tűzvihar felhőrendszere zivatarhoz hasonló csapadékot is produkálhat, bár ez, mire elérné a talajt, általában újra elpárolog.

Hidrológiai események

Hidrológiai vészhelyzetekről beszélünk, ha szélsőséges vízzel kapcsolatos események következnek be és olyan mértékű károkkal fenyeget vagy károkat okoz, amelyek veszélyeztetik az emberi életet, tulajdonokat vagy a környezetet. Magyarországon a leggyakoribb hidrológiai katasztrófák az árvizek.

Árvizek

Ha a természetben megjelenő vízmennyiség oly mértékben lépi túl a szokásos, a tervezésnél figyelembe vett mértéket, hogy az az érintett meder, part vagy gátak kapacitását meghaladja, és így elárasztva a szárazföldet, árvízről beszélünk. Ennek okai lehetnek gyors hóolvadás, tartós vagy heves csapadék, jégtorlaszok, vagy akár szökőár. Ez a kommunikációs infrastruktúrát is veszélyezteti azzal, hogy elmoshatja a hálózatokat, azokban pillanatnyi üzemzavarokat okoz vagy hosszú távon korrodálja azokat.

Magyarországon két típusú árvízzel találkozunk, az egyik a folyami árvíz, a másik a villámárvíz.

A folyami árvíz kialakulásának okai leginkább a folyók vízgyűjtő területén történő hóolvadás, intenzív csapadék vagy a hosszabb esőzések és a talaj telítettsége.

A villámárvizek általában helyi, rövid időtartalmú intenzív zivatarokhoz kapcsolódnak és heves áradást okoznak. Akár órákon, sőt, percekben belül is kialakulhatnak. A problémát a gyorsan érkező nagysebességű víz okozza, amely akár a járműveket, épületeket is elsodorhatja, és ezzel jelentős károkat okozhat. A villámárvizek általában nem érintik a folyóvíz hálózat teljes hosszát, csak egy-egy konkrét patakot vagy folyót.

Magyarországon az villámárvizeknek általában két típusa fordul elő: a hegyi, illetve dombvidéki és az alföldi, síkvidéki villámárvizek. A hegyi és dombvidéki villámárvizek előfordulása a Dunántúli-dombságra és Északi-középhegységre jellemző. A szűk völgyekben a víz nagyon gyorsan folyik le és nagy tömegben gyűlik össze. A víz a nagy sebessége és mennyisége következtében általában iszapot, kavicsot, ágakat, sőt, gyakran egész fákat és más hasonlóan nagy mértékű hordalékot is magával visz. Az alföldi területeken előforduló

villám-árvizek jellemzően az intenzív záporok után keletkeznek, mivel a víz aszályok után nem tud a felkeményedett, vízzáró felszínű talajba elég gyorsan beszivárogni, és ezért a sekély ártereket, lakott területeket önti el. Ilyen esetben a víz lassabb áramlású, viszont nagy kiterjedésű álló-vizeket hoz létre, amelyek akár több napig is megmaradnak és emiatt jelentős ingatlan- és infrastrukturális károkat okoznak. A villám-árvizek legjelentősebb kiváltó okai általában az intenzív helyi záporok, amelyek során egy-két óra alatt akár 50-100 mm csapadék is leesik, és emiatt a talaj azt nem tudja befogadni. Lehet az is a probléma, hogy a területen már előzőleg is volt jelentős esőzés, és emiatt a vízzel telítődött talaj már nem tud több vizet felszívni. Városi környezetben is előfordulhat, hogy a víz az általában betonozott, aszfaltozott területek miatt nem tud a talajba beszivárogni, hanem ehelyett azt átmeneti pufferhatás nélkül a csatornák vagy a kisebb várost átszelő patakok, folyók gyűjtik össze, amelyek gyűjtőszállító kapacitása azonban kevésnek bizonyul.

A villám árvizek pusztító erejét növeli a magukkal vitt törmelék is, amely egyrészt torlaszokat képezve csökkenti a levezetési keresztmetszetet, másrészt az útjába kerülő tárgyokban jelentős kárt tud okozni.

3.2.2. Mesterséges eredetű vészhelyzetek

Az olyan katasztrófákat, amelyeket közvetlenül vagy közvetve emberi tevékenység idéz elő, nevezzük mesterséges eredetű katasztrófának. Az okok lehetnek szándékos cselekmények, balesetek, vagy infrastrukturális rendszerek működési zavarai. Hatásuk általában nem csak az adott helyszínt érinti, hanem a környező területekre is kiterjed.

Ipari/technológiai vészhelyzetek

Az ipar és az alapjául szolgáló technológia képezi mai modern civilizációnk alapját, működéséről számtalan gyár és összetett műszaki struktúrák gondoskodnak. Ezen rendszerek üzemeltetése azonban óriási kockázattal is jár. Az olyan, emberi tevékenységre visszavezethető katasztrófákat, amelyeket az infrastruktúrák vagy iparifolyamatok meghibásodása, az ellenőrzés elvesztése vagy baleset bekövetkezése idéz elő, nevezzük ipari vagy technológiai katasztrófának. Ezen katasztrófák általában azonnali és pusztító károkat okoznak mind a környezetben, mind emberi életekben és egészségben, mind pedig a gazdaságban, mindezzel maradandó nyomot hagyva az érintett területen és közösségben.

Vegyi anyagok kiszabadulása

Az ipari baleseteknek számos fajtája van. Az egyik leggyakoribb a különböző veszélyes anyagok kiszabadulása. Magyarországon az egyik legismertebb ilyen baleset az ajkai vörösiszap-katasztrófa, amely 2010-ben következett be és tíz ember életét követelte. Tragikus kimenetele ellenére is eltörpül azonban a történelem legpusztítóbb ipari katasztrófájaként számontartott, 1984-ben bekövetkezett bhopáli (India) katasztrófa mellett, amelyben egy vegyi üzemből kiszabaduló mérgező gáz azonnali, illetve hosszú távú hatásai a becslések szerint 8000-15 000 ember halálát okozták.

Nukleáris balesetek

A nukleáris balesetek alatt a legtöbbször az atomerőmű balesetekre gondolnak, mint Csernobil (1986) és Fukushima (2011). Bár ezek az esetek okozták a legnagyobb kárt, nem szabad elfeledkezni a kisebb léptékű, de jóval gyakoribb olyan esetekről sem, amikor orvosi vagy ipari sugárzó anyagokkal történnek balesetek. Ilyen volt például az 1987-es Goiâniai (Brazília) sugárzási baleset, amelyben elhagyott radioterápiás gépekből szerelték ki a sugárforrást ezzel beszennyezve számos embert és helyszínt.

Infrastrukturális katasztrófák

Ide tartoznak a gátszakadások, épületek és hidak összeomlása, de ebbe a kategóriába sorolhatjuk a villamosenergia-hálózatok összeomlását is.

Szándékos cselekmények

Míg az ipari katasztrófák többsége hanyagság vagy véletlen mulasztás következménye addig a szándékos emberi eredetű vészhelyzeteket előre megfontolt és eltervezett, rosszindulatú cselekmények okozzák. Céljuk sok esetben a félelemkeltés, a gazdasági károkozás vagy politikai, ideológiai cél érvényesítése. Ezen szándékos cselekmények két fő fajtája a terrorizmus és a kibertámadások, amelyek gyakran szétválaszthatatlanok.

Terrorizmus

A terrorizmus erőszakos cselekmény, amelynek fő célpontja általában a lakosság. Célja politikai, vallási, ideológiai eszmék érvényesítése a félelmen és pánikon keresztül. A hagyományos terrortámadásoknál robbanóanyagokat (öngyilkos merénylők, autóbombák

stb.), különböző fegyvereket és túszejtést alkalmaznak. A terrorizmus egyik legveszélyesebb formája a vegyi, biológiai, sőt, nukleáris terrorizmus.

Kibertámadások kritikus infrastruktúrák ellen

A legújabb emberi veszélyforrások közé tartoznak a kibertámadások. Ezek célja lehet adatlopás, különböző rendszerek túrterhelése és megbénítása. A legnagyobb probléma az, hogy az elkövető akár a világ másik felén is tartózkodhat a cselekmény elkövetésekor ezzel nehezítve a felderítést és az elfogást. Ha a kibertámadás emberi életet veszélyeztet vagy fizikai pusztítást okoz, akkor kiberterrorizmusnak nevezzük.

3.3. A kommunikáció stratégiai szerepe és követelményei

A vészhelyzetek esetén a kommunikáció az egyik legfontosabb tényező. Megfelelő információáramlás nélkül az életmentés nem megoldható. A kommunikáció három területen játszik döntő szerepet, a helyzet felderítésében és döntéshozatalokban, a mentőcsapatok koordinációjában és irányításában, valamint a lakosság informálásában és védelmében.

A döntéshozók számára a folyamatos információáramlás elengedhetetlen. A valós idejű adatszolgáltatás a katasztrófa állapotáról, terjedéséről, az áldozatok számának meghatározásáról, a rendelkezésre álló erőforrások ismeretéről rendkívül fontos, hogy pontos képet kapjanak a szituációról és ideális parancsokat és utasításokat tudjanak adni.

A különböző szervek (katasztrófavédelem, rendőrség, egészségügy) összehangolása kulcsfontosságú a helyzetkezeléshez. Ahhoz, hogy az együttműködés zökkenőmentes legyen biztonságos és üzembiztos kommunikációra van szükség.

A civilek tájékoztatása is elengedhetetlen a helyzet súlyosbodásának elkerülése érdekében. A pánik elkerülése és a hatékony menekítés szervezése elengedhetetlen része.

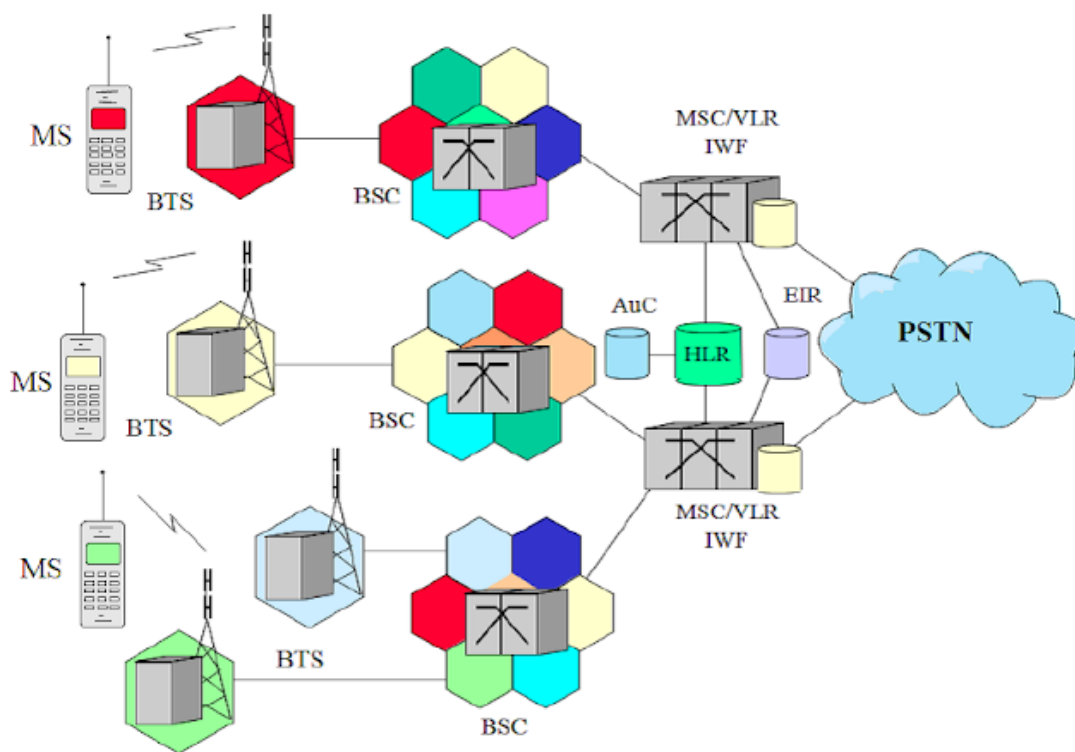
A kommunikációs rendszernek a fenti feladatok ellátásához meg kell felelnie alapvető követelményeknek, ilyenek a garantált rendelkezésre állás, üzembiztosság, megfelelő sávszélesség, minimális késleltetés és biztonság az érzékeny adatok védelme érdekében.

3.4. A hagyományos földi kommunikációs rendszerek korlátai és sebezhetősége

A jelenleg használt földi kommunikációs hálózatok vészhelyzetben pont akkor veszítik el a képességeiket, amikor a legnagyobb szükség lenne rájuk.

A földi cellás rendszerek elvi működése

A végfelhasználói készülékek rádiófrekvencián keresztül érik el a BTS¹⁸ egy adott celláját. Az egyedi BTS-eket a BSC¹⁹ kontrollálja és fogja össze. A BSC-eket a területi vagy központi MSC²⁰ koordinálják. A BTS – BSC – MSC között megfelelő kapacitású réz, optikai vagy mikrohullámú összeköttetéseket alakítanak ki. Ezek megléte a rendszer működése szempontjából létfontosságú. Érdekesség BTS – BSC – MSC összeköttetéseket akár műholdon keresztül is meg lehet oldani ABIS/ATER jel- és jelzésátviteli protollokon keresztül.



9. ábra: A földi cellás rendszerek felépítése [28]

A fentiek alapján egyértelmű, hogy a földi infrastruktúrák legnagyobb hátránya a fizikai sebezhetőségük. A különböző katasztrófák gyakran semmisítik meg a kommunikációs és elektromos hálózat elemeit, a mobilantennákat, az adótornyokat, a kábeleket és az áramellátást.

¹⁸ BTS - Base Transceiver Station – bázisállomás

¹⁹ BSC - Base Station Controller - bázisállomás-vezérlő vagy bázisvezérlő központ

²⁰ MSC - Mobile Switching Centre - mobilkapcsoló központ

A cellás rendszerek esetében a működés képtelensége több okból is kialakulhat. A rádiófrekvenciás cellás lefedettséget biztosító tornyok (BTS) fizikailag sérülnek (például összedőlnek), vagy megszűnik a tápellátásuk, vagy a BTS - BSC - MSC közötti távközlési vonalak sérülnek. Esetleg a mobiltelefon hálózat teljes központja (MSC) szenved károkat, ami lehetetlenné teszi a hálózat működését. A fentiek alapján bizonyos esetekben gyorsan önállóan működésképtelen részekre eshet szét.

Ezeket nehezen, lassan és rengeteg erőforrást felhasználva lehet csak újraépíteni, így a problémát nem lehet gyorsan orvosolni. Az infrastruktúra pótlása mobil bázisállomásokkal korlátozott megoldást nyújt csak, amit nagy területekre nehéz kivitelezni.



10. ábra: „Cell on wheels” – mobil GSM rendszer

Sok esetben, ha maga az infrastruktúra nem is sérül meg végzetesen, maga a hálózat lelassul, akadozik vagy leáll a túlterhelés miatt, amit a szokatlan nagy mennyiségű kommunikáció okoz. A földi kommunikációs infrastruktúra kiépítése költséges és egyes területeken nem megoldható, így korlátozott a lefedettsége. Vészhelyzetek esetén ezek a “sötét foltok” megnehezítik a helyzetfelmérést, a mentési munkálatokat és a segély eljuttatását ezen területekre.

Összefoglalva a hagyományos földi kommunikációs rendszer olyankor válik használhatatlanná, amikor a legnagyobb szükség lenne rá. Ez rámutat arra, hogy a földi hálózatoktól független és redundáns kommunikációs megoldásra van szükség, ezt a megoldást pedig a LEO kommunikációs műholdak képesek biztosítani. nyújtják.

4. VÉSZHELYZETI MŰHOLDAS KOMMUNIKÁCIÓS KONTÉNER

Katasztrófák esetén a földfelszíni infrastruktúra sérülése, túlterhelése következtében az információk áramlása mind sebességben, mind megbízhatóságban korlátozott. Ilyen esetekben a műholdas kommunikáció lehetősége nagyban segítené a mentőcsapatok munkáját.

A műholdas kommunikáció másik nagy előnye a földfelszíni infrastruktúrával szemben az, hogy nem befolyásolja a domborzat. Míg a rádióantennák lefedettségét egy-egy kisebb domb, hegy vagy városi közegben egy-egy épület is árnyékolni tudja, addig a műholdak az égbolt felől érkező jeleit ezek az akadályok nem zavarják.

A következőkben kitérek Magyarország jelenlegi kommunikációs hálózatára és hátrányaira és vizsgálom egy LEO műholdakra támaszkodó kommunikációs hálózat földi egységeinek kritériumait és összetételét.

4.1. A jelenlegi helyzet Magyarországon

Magyarországon a készenléti szolgálatok jelenleg az EDR – Egységes Digitális Rádiótávközlő rendszert használják. Ezek a szolgálatok az alábbiak:

- Polgári és katonai titkosszolgálatok,
- Igazságügyi és Rendészeti Minisztérium,
- Országos Rendőr-főkapitányság és alárendelt szervei,
- Országos Katasztrófavédelmi Főigazgatóság,
- Büntetés-végrehajtás Országos Parancsnoksága,
- Vám és Pénzügyőrség Országos Parancsnoksága,
- Honvédelmi Minisztérium és a Magyar Honvédség.

Hazánkban a készenléti szolgálatot ellátó hálózatok többsége elavult volt, még az egysatornás analóg (URH²¹) rádiórendszert alkalmazták, ezért is határozták el még 2005-ben az EDR rendszer megvásárlását és 2007. februárjában meg is kezdték meg annak

²¹ URH - ultrarövidhullámú

kiépítését. Az elkészülte után minden állami szervnek (kivéve a Magyar Honvédség tábori mobil távközlést) át kellett állnia a használatára.

Az EDR célja a megfelelő valós idejű hang kommunikáció biztosítása és eszközkövetés lehetővé tétele. A rendszer megfelel az Európai Unió által előírt Schengeni-kritériumoknak, ezzel hatékony együttműködést elérve más tagországok rádiórendszereivel.

Az EDR rendszer TETRA²² hálózataarchitektúrára épül, ez egy az ETSI²³ szervezet által kidolgozott digitális rádiókommunikációs szabvány²⁴.

Közös infrastruktúrát használnak az egyes felhasználói szervezetek, de mindegyik szervezet a többiekétől függetlenül külön kialakíthatja a saját logikai hálózati struktúráját.

A szolgáltatásokat három különböző üzemmód biztosítja, közvetlen üzemmód (DMO²⁵), relézett üzemmód és azonos idejű kisugárzás (Simulcast). A DMO esetében a kézi rádiók képesek infrastruktúra nélkül egymással kommunikálni szimplex üzemmódban, de ez kis körzetekben (néhány km sugarú körre) valósítható meg. Az átjátszó üzemmódnál az állomások a kommunikációt egy hordozható csatornaismétlőn vagy egy uralgó²⁶ pontra telepített átjátszón keresztül végzik, ez a DMO-hoz képest jóval nagyobb sugarú kört tud lefedni (30-40 km). A lefedettséget tovább növelhető a Simulcast technológia bevezetésével, amit főleg vidéki környezetben lehet megfelelően használni a nagyon csekély felhasználó-sűrűség miatt.

A EDR rendszer alapvető szolgáltatásai a beszédalapú adatátvitel, de azon túl vészhívás, adatüzenet továbbítás (SDS²⁷), státuszüzenet küldés is elérhető, viszont csak korlátozott (7,2 kbps) adatátviteli kapacitást ad.

²² TETRA - Terrestrial Trunked Radio

²³ ETSI - European Telecommunications Standards Institute – távközlési szabványosító intézet

²⁴ ETSI EN 300 392-1

²⁵ DMO - Direct Mode Operation

²⁶ uralgó - magas, kiemelkedő

²⁷ SDS - Safety Data Sheet

Az EDR rendszernek a régi analóg rendszerhez képest számos előnye van azonban mára reménytelenül elavult, tovább fejlesztésére nincs lehetőség.

Míg a vele egyidőben megszülető GSM szabvány mára már a nagy sebességű adatátvitelre optimalizált 4G/LTE/5G/6G változatoknál jár, addig a TETRA szabvány fejlődése a kényszerű kompatibilitási igények miatt megrekedt.

Számos probléma van a rendszerrel, az egyik fő hiányossága, hogy a használt eszközök többsége kézi terminál a hálózat a lefedettség ugyan nem hiányos, de nem is teljes. A szolgáltató (Pro-M Zrt.) nem tud teljes, országos lefedettséget biztosítani. A rendszerben lévő átjátszó állomások időosztásos módon csak négy hangcsatornát képes kezelni, ami viszont sokszor – főleg forgalmasabb körzetekben nem elegendő. A rendszer nem tartalmaz prioritáskezelési funkciót így, ha sürgős üzenetet kell továbbítani akár hosszú másodperceket is várni kell. A másik fő hibája, hogy a DMO kézi terminálok sok esetben használhatatlanok a hálózatilag lefedetlen területen, illetve a DMO csatornaismétlők a nem homogén környezetben (épületekben, városokban) gyakran kioltják egymást ezzel nem biztosítva megfelelő lefedettséget. Ezen túlmenően az EDR nem támogatja a modern nagysebességű adatátvitelt és ezzel egyáltalán nem felel meg a mai kommunikációs elvárásoknak. Az EDR egyébként kellően erős és biztonságos (bizonyítottan nem törhető) beépített titkosítással rendelkezik. [18]

A nemzetközi tapasztalatok alapján egyre több hivatalos és polgári kezdeményezésű vészhelyzeti szervezet tér át a LEO műholdas szolgáltatásokra. Ennek egyik oka a kedvező árfekvés, másik pedig egyszerűen a praktikusság. Egyik példát a német partiőrség jelenti, amelyik már öt évvel ezelőtt megkezdte az új technológiák tesztelését. A szervezet a hagyományos analóg VHF²⁸ rádiós rendszerek mellett a teljes partvonalon, - még a szomszédos országokkal is együttműködve - kiépítette a part menti LTE²⁹ alapú rádiótelefonos lefedettséget, ezzel párhuzamos pedig valós idejű modern mentési irányító és felügyeleti szolgáltatásokat vezetett be. Az új rendszer – a mindennapi tapasztalatok alapján – azonban nem hozta a várt eredményeket, mert kihajózva a tengerre – akár már 25 km

²⁸ VFH - Very High Frequency

²⁹ LTE - Long-Term Evolution

távolságra - az LTE lefedettség sok esetben nem érte el a minimum szintet, így az új hálózati szolgáltatások elérhetősége erősen bizonytalanná vált.



11. ábra: Starlink működésének tesztelése hajón
[21]

A partiőrség a OneWeb, a Starlink, valamint a CubeSat megoldásait fél éven keresztül tesztelve arra a következtetésre jutottak, hogy a Balti-tenger sokszor szélsőséges viszonyai közepette is folyamatos nagy sebességű adat kommunikációt képesek biztosítani az új technológiák. Ráadásul az antennák és a modemek is igen jól bírták a nem éppen barátságos fizikai behatásokat és meghibásodás nélkül vészték át a teszt időszakot. A pozitív visszajelzések eredménye képpen 2024-re minden hajójukat felszerelték. [19]

Jelenleg az Európai Unió a GOVSATCOM program keretében már dolgozik az európai műholdas szolgáltatások kormányzati szervek részére történő egységesítésén, aminek egyik nem titkolt célja, hogy a IRIS projekt keretébe független európai LEO műholdas szolgáltatást indítsanak 2030-ig, kiszolgálva a kormányzati és katonai igényeket. Ezt felhasználva jövőben az európai rendszerre is tudnak támaszkodni majd a vészhelyzeti szervezetek ezáltal elvágva a függést az Európán kívüli cégektől. [20]

4.2. Konceptió terv

A földi egységnek több alap szempontnak is meg kell felelnie. A kiinduló pont, hogy a funkcionális igényeknek és az operatív feladatoknak megfeleljen. A rendszer gerincét a LEO műholdas rendszer fogja adni a gyors adatforgalom lehetősége miatt. A kapcsolatnak a földi rendszerrel folyamatosnak kell lennie és párhuzamosan több sáv szélességet is tudnia kell használni. Ki kell alakítani egy művelet támogató felületet, amelyben lehetőség van a beérkező adatokat elemezni egy központi szerver egységen. A LEO műholdas antennák

mérete szolgáltatótól függően körülbelül 80 cm átmérőtől akár 18 cm átmérőig változik és általában téglalap alakú, valamint néhány cm vastagságúak. A súlyuk méretüktől függően az 1 kilótól akár 5 kilóig is terjedhet. A méretük miatt kevésbé hordozhatóak, emiatt az mentésben résztvevők egyéni kommunikációjára más távközlési megoldást kell alkalmazni.

A vészhelyzeti kommunikációs csomagot rugalmas, három rétegű rendszernek tervezem, ami biztosítja az adat- és hangkommunikációt LEO műholdas rendszeren keresztül. A rendszert modulárisra tervezem, hogy az aktuális igényeknek és elvárásoknak megfelelően szabadon lehessen skálázni a kapacitásokat.

A három réteget a parancsnoki központ, a járműre szerelhető mobil egység és a kézi kommunikátor egység alkotná.

Parancsnoki központ

A parancsnoki központ a teljes vészhelyzeti kommunikációs hálózat fő irányítója, a rendszer szíve és agya. A parancsnoki központot két módon lehetne kivitelezni.

Az egyik egy állandó telepítésű bázis kórházak vagy katasztrófavédelem székházára telepítve. Ez a megoldás főleg olyan helyeken érdemes kivitelezni, ami rendszeresen katasztrófákkal sújtott terület. Az alapjait mindenképp olyan épület vagy helyszín kell, hogy adja, ami védve van a térségre jellemző katasztrófától (például: földrengésbiztos, árvízvédtett stb.).

A másik egy mobil bázis, amelynek az alapját például egy Hight-Cube 40 láb hosszú konténer adhatja.

- Külső méretek: Hossz 12.192 m × Szélesség 2.438 m × Magasság 2.896 m
- Belső méretek: Hossz 12.032 m × Szélesség 2.352 m × Magasság 2.698 m
- Ajtónyílás: Szélesség 2.343 m × Magasság 2.585 m
- Térfogat: ~76 m³

Azért erre a típusú konténerre esett a választásom mert a magasságával kényelmes munkaterületet tesz lehetővé, a hosszúsága pedig megengedi a rendelkezésre álló tér több részre osztását. Igényektől függően moduláris konténert is lehetne használni, ezzel nagyobb teret nyerve a mentésirányítók számára. Illetve lényeges, hogy gyorsan telepíthető legyen

bárhol, bármikor. Mozgatását kamionnal, repülőgéppel vagy helikopter segítségével könnyedén meg lehessen oldani.

A konténert három részre lehetne osztani. A műveleti részre, ahol a művelet irányítók helyezkednek el. Ezen a részen lennének elhelyezve az előre berendezett irányítói munkahelyek. A munkaállomások, mint vékony kliens csatlakoznának a helyi szerverhez. Innen indulnának ki és érkezének be a hívások a kisebb rangú egységek vonatkozásában.

A műszaki rész tartalmazná a kiszolgáló szervereket (alkalmazás, térkép) és NAS³⁰ tárolókat, a szünetmentes tápegységet, a routereket, a rádióátjátszót (amivel ki tudjuk használni a már meglévő és érintetlen mobiltelefon rendszereket) és az akkumulátorokat.

A tároló rész tartalmazná a kisebb szintű egységek tároló, illetve töltő állomásait, illetve szállítás közben a fenntartási rendszereket és az antennákat, illetve a klímaegység külső egységét.

Mindkét típusnak fontos eleme, hogy önfenntartó legyen. A katasztrófák miatt a külsős áramellátás általában nem megoldható, emiatt az áramellátást aggregátorral vagy különböző megújuló energiaforrások (napelem) használatával kell megoldani. Az áramellátás folyamatos biztosítása érdekében nagy kapacitású áthidaló akkumulátorokkal is szükség van. A katasztrófák által sújtott térség helyreállítása akár napokba, hetekbe is telhet, ezért úgy kell kialakítani az energiaellátást, hogy a műveletek végéig üzemidő megszakítása nélkül ki tudja szolgálni az állomást.

Ez az egység rendelkezne a legstabilabb és legnagyobb sáv szélességgel. A műholdas kapcsolatot legalább két automatikus LEO terminál látná el a redundanciáért. A megfelelő biztonság érdekében és hogy ne csak egy cégtől függjön a rendszer mindenképpen érdemes több LEO konstellációt szolgáltató céggel szerződést kötni és használni a szolgáltatásaikat.

A legtöbb LEO műholdas szolgáltatónál (Starlink, OneWeb) létezik egy úgynevezett kormányzati előfizetési konstrukció, amelynek lényege, hogy egy külön nemzetközi szintű szerződés keretében a szolgáltatók garantált kapacitásokat biztosítanak a kijelölt kormányzati felhasználók részére. Ennek keretében a civil és a kormányzati forgalom teljesen elkülönül

³⁰ NAS - Network Attached Storage

egymástól, az teljes prioritást élvez – akár még a polgári forgalom kárára is – és gyakorlatilag elkülönített frekvenciákon, speciális hozzáférési protokollon és módosított terminálokon keresztül érik el a kiajánlott szolgáltatásokat. Természetesen a teljes forgalom már eleve titkosítottan történik. Ez a konstrukció költség szempontjából ugyan drágább, mint a kommersziális változatok, de még így is jóval olcsóbb, mint a hagyományos GEO szolgáltatások bármelyike.

A parancsnoki központ biztosítaná a körülbelül 1 km-es körben elhelyezkedő kézi egységek WLAN³¹ lefedettséget, illetve ugyanekkora távolságban tudna biztosítani szabadon hozzáférhető WLAN-t (Free hotspot) a polgári lakosság részére.

A központba célszerű lenne még 4G/LTE mobil bázisállomást is telepíteni, amellyel időlegesen mobiltelefon lefedettséget lehetne kialakítani a mentőcsapatok vagy akár a civilek részére kb. 10-15 km körben. A mobil állomás akár egy Starlink kapcsolaton keresztül beköthető lenne az országos szintű szolgáltatók hálózatában.

Szintén érdemes lenne beépíteni egy TETRA vagy DMR szabványú digitális rádióátjátszót a kézi rádiók kiszolgálása érdekében. Technikailag ezek az egységek ma már egy-kettő U méretben egy 19” szabványú állványba beszerelhetők.

Az állomásnak saját GNSS kiszolgálóval kell rendelkeznie a fenti eszközrendszerek pontos hely és időszinkronjának érdekében.

Járműre szerelhető egység

A különböző típusú járműre szerelhető adó-vevő egységek segítségével a központ hatótávolságát ki lehetne terjeszteni, amelyek kisebb mozgó parancsnoksági központként tudnának működni, összekötni a kézi egységeket a központtal vagy a LEO műholdakkal. Lényeges, hogy ezek az egységek mozgás közben is képesek legyenek a kapcsolattartásra. Fontos még hogy az eszközök kellően robusztusok és rázkódás biztosak legyenek elkerülve a fizikai sérüléseket, de az eddigi tapasztalatok szerint mindegyik gyártó antennái és modemjei megfelelnek ezen kritériumoknak. A komolyabb vízállóság sem egy utolsó szempont olyan esetekben, ha hajóra lennének szerelve. Az áramellátását a jármű 12/24 V-os

³¹ WLAN - Wireless Local Area Network

rendszeréből lehetne táplálni bizonyos esetekben extra fedélzeti generátort is be lehet építeni a járművekbe. A független működés elérése érdekében egy beépített akkumulátorra is szükség van. Az egység tartalmazna egy mobil routert, hogy a környezetben létrehozhasson egy helyi hálózatot a kézi egységek számára. Szintén érdemes lenne beépíteni egy TETRA vagy DMR szabványú digitális rádióátjátszót a kézi rádiók kiszolgálása érdekében.



12. ábra: Starlink használata utazás közben [23]

Kézi egység

A kézi kommunikátor egység méreteiben lehetőleg zsebméretűnek kell lennie a könnyű hordozhatóság érdekében. Az eszköznek bírnia kell a viszontagságokat, így a víz-, és porvédelem és ütésállóság (IP65/IP67) elengedhetetlen. Az eszköznek könnyen használhatónak kell lennie lehetőleg egy dedikált egyszerű felülettel kell rendelkeznie, ami képes ellátni minden szükséges funkciót. Fontos, hogy az eszköz képes legyen egyszerű előre meghatározott státuszjelentések leadására folyamatos és automatikus pozíció meghatározásra és küldésre a magasabb szintű egységek számára. A kép küldés és fogadás is lényeges bár az eszköz adatátviteli képességei miatt valószínűleg csak kisebb felbontásra lenne képes, de adott helyzetben az is elegendő lehet.



13. ábra: PoC adóvevők [28]

Szóba jöhető és rendkívül olcsón kivitelezhető és igen rugalmas megoldás lehet az egyéni és csoportos szintű hanghívásokat alkalmazni úgynevezett PoC³² adóvevők alkalmazásával. A PoC IP alapú adóvevők telefonhálózaton vagy WLAN-on kommunikálnak egymással, így tetszőleges (helyi, régiós, országos vagy akár határon átnyúló nemzetközi) lefedettséget is biztosítanak. A forgalom menedzselése egy jól áttekinthető felületen úgynevezett diszpécser programokon keresztül könnyen megoldható, ahol lehetőség van lekezelni a kommunikációs platform valamennyi szolgáltatását, egyszerűen koordinálhatják a mentőcsapatok munkáját és nyomon követhetik földrajzi helyzetüket a GNSS alapú helymeghatározás révén.

³² PoC - Push-to-talk over Cellular

5. ÖSSZEFOGLALÓ

A dolgozat célja annak bemutatása volt, hogy az alacsony Föld körüli pályán működő műhold-konstellációk miként járulhatnak hozzá a vészhelyzeti kommunikáció hatékonyabbá tételéhez. Főleg olyan katasztrófahelyzetekre vonatkozóan, ahol a földi infrastruktúra megsérül vagy működésképtelenné válik. A földi infrastruktúra sebezhetősége - legyen az természeti, ipari vagy szándékosan okozott események által – rámutat arra, hogy szükséges egy olyan rendszer, amely a földi környezeti tényezőktől független, gyorsan telepíthető és megbízható.

Az irodalmi áttekintés alapján igazolható, hogy a LEO műholdak előnyei a geostacionárius műholdakkal szemben – alacsony késleltetés, nagy sáv szélesség, könnyű telepíthetőség, globális lefedettség – alkalmassá teszik a vészhelyzeti célú alkalmazásokra. A vizsgált konstellációk olyan modern kommunikációs lehetőséget kínálnának, amelyek nagyban elősegíthetik a terepen dolgozó egységek munkáját.

A LEO-alapú kommunikációs rendszerek minden olyan helyzetben ideális megoldást nyújtanak, amelyben a kiépített földi rendszerek megsemmisültek vagy összeomlottak.

A vészhelyzeti kommunikációs konténer tervezésnél figyelembe vett tervezési szempontoknak tekintettem a hordozhatóságot, az energiaellátást, a redundanciát, a hálózatbiztonságot, és a felhasználói egyszerűséget és hogy minden téren használható legyen. Ezen szempontok figyelembevételével kiderült, hogy a tervezett egység önmagába nem szolgálja ki a vele szemben támasztott kommunikációs igényeket, illetve korlátozná a kommunikációs hatékonyságot az által, hogy nem kompatibilis a már létező egységekkel és nem tudna szolgáltatást biztosítani a polgári lakosság részére. Emiatt bővítettem egy olyan kommunikációs csomaggá, ami minden szempontnak megfelel, és olcsóbb és egyszerűbb eszközöket is képes a hálózatra csatlakoztatni ezáltal növelve a hatékonyságot. A csomag moduláris, skálázható és többszintű rendszer, fizikailag pedig egy fix vagy mobil főbázisból, járműre szerelhető mobil egységekből és a kézi kommunikációs egységekből áll.

A kutatásom során megbizonyosodtam arról, hogy a LEO-alapú rendszerek hatékonyan képesek kiváltani vagy kiegészíteni a jelenlegi földi rendszereket és egyes fejlett országokban a hatóságok már kísérleteznek, vagy aktívan használják ezeket a kommunikációban.

Összességében megállapítottam, hogy a LEO-alapú rendszerek jelentős előrelépést jelentenek és számos előnnyel járnak a vészhelyzeti kommunikáció területén. A technológia fejlődésével egyre hatékonyabb, gyorsabb és megbízhatóbb megoldássá válik, amely hosszú távon fogja átformálni a katasztrófavédelmi és mentési műveletek kommunikációs hátterét.

6. SUMMARY

The aim of the study was to demonstrate how satellite constellations operating in low Earth orbit could contribute to making emergency communication more effective. This primarily concerns disaster situations in which ground infrastructure is damaged or rendered inoperable. The vulnerability of ground infrastructure—whether due to natural, industrial, or intentionally caused events—highlights the need for a system that is independent of ground-based environmental factors, rapidly deployable, and reliable. Based on the literature review, it can be demonstrated that the advantages of LEO satellites over geostationary satellites—low latency, high bandwidth, easy deployability, global coverage—make them suitable for emergency-related applications. The constellations examined would offer modern communication capabilities that could greatly facilitate the work of units operating in the field.

LEO-based communication systems provide an ideal solution in any situation where established ground systems have been destroyed or have collapsed.

In designing the emergency communication container, I considered the following design aspects: portability, power supply, redundancy, network security, user-friendliness, and universal applicability. Taking these aspects into account revealed that the initially planned unit alone would not meet the communication requirements expected of it and would limit communication effectiveness because it is incompatible with existing units and unable to provide service to the civilian population. Therefore, I expanded it into a communication package that meets all criteria and is capable of connecting cheaper and simpler devices to the network, thereby increasing effectiveness. The package is a modular, scalable, and multi-tier system, physically consisting of a fixed or mobile main base, vehicle-mounted mobile units, and handheld communication units.

During my research, I became convinced that LEO-based systems are capable of effectively replacing or supplementing current ground-based systems, and in some developed countries authorities are already experimenting with or actively using them in communications.

Overall, I concluded that LEO-based systems represent significant progress and offer numerous advantages in the field of emergency communication. With the advancement of technology, they are becoming an increasingly efficient, faster, and more reliable solution that

will reshape the communication framework of disaster management and rescue operations in the long term.

7. ÁBRAJEGYZÉK

1. ábra: Jellegzetes LEO konstelláció [27].....	9
2. ábra: Lesugárzási nyalábok alakulása a pályamagasság függvényében [24].....	10
4. ábra: 18 m-es C-sávós NEC antenna	11
3. ábra: CEPT1-es SCPC modemek.....	11
5. ábra: Műholdas frekvenciasávok [25].....	12
6. ábra: Az elektromágneses spektrum [26]	13
7. ábra: Starlink és OneWeb műholdak helyzete	24
8. ábra: OneWeb konstelláció műholdjai [14]	25
9. ábra: A földi cellás rendszerek felépítése [28]	36
10. ábra: „Cell on wheels” – mobil GSM rendszer.....	37
11. ábra: Starlink működésének tesztelése hajón [21]	42
12. ábra: Starlink használata utazás közben [23]	46
13. ábra: PoC adóvevők [28].....	47

8. HIVATKOZÁSOK

- [1] K. Z. Pappné, „Agytörők.hu,” 07 12 2022. [Online]. Available: <https://agytoro.hu/talalmany/a-radio-feltalalasa/>. [Hozzáférés dátuma: 30 11 2025].
- [2] N. m. ITU, „International Telecommunication Union,” [Online]. Available: <https://www.itu.int/itunews/manager/display.asp?lang=en&year=2008&issue=03&ipage=Arthur-Clarke&ext=html>. [Hozzáférés dátuma: 30 11 2025].
- [3] R. S. Dr. Kovács, „Infokommunikációs hálózatok és távközlési rendszerek,” 2021. [Online]. Available: https://rtk.uni-nke.hu/document/rtk-uni-nke-hu/Dr_Kovacs_Robert_Sandor_%20a_nyomozo_szamara_relevans.pdf. [Hozzáférés dátuma: 30 11 2025].
- [4] „Fundinguniverse,” [Online]. Available: <https://www.fundinguniverse.com/company-histories/comsat-corporation-history/>. [Hozzáférés dátuma: 30 11 2025].
- [5] J. Louis J. Ippolito, „Introduction to Satellite,” 2008. [Online]. Available: <https://scispace.com/pdf/introduction-to-satellite-communications-2xrsjwmugl.pdf>. [Hozzáférés dátuma: 30 11 2025].
- [6] Branimir Jaksic, Dragisa Miljkovic, Vladimir Maksimovic, Mile Petrovic és Branko Gvozdic, „Satellite television transmission in the world - broadcasting systems and standards,” 16 10 2018. [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/journal/3032/303265671034/html/#:~:text=The%20first%20broadcast%20of%20the%20digital%20satellite,of%20TV%20channels%20to%20end%20users%20began..> [Hozzáférés dátuma: 30 11 2025].
- [7] A. Stickings, „RUSI,” 12 02 2018. [Online]. Available: <https://www.rusi.org/explore-our-research/publications/rusi-defence-systems/spacex-falcon-heavy-thats-no-moon-its-tesla#:~:text=Perhaps%20the%20greatest%20benefit%20to,about%20half%20the%20payload%20capacity..> [Hozzáférés dátuma: 30 11 2025].
- [8] „Kommunikációs műholdak,” [Online]. Available: <https://gyires.inf.unideb.hu/GyBITT/30/ch02s04.html>.
- [9] K. P. c. i. o. H. C. Péter, Szerző, *Exponential Space - The Dawn of a New Space Age*. [Performance]. 2024.11.20.
- [10] K. Don, Szerző, *Space Economy*. [Performance]. UNISPACE, 2024.12.07..

- [11] A. dr. Kern, Szerző, *A műholdak mozgása és pályái*. [Performance]. ELTE Eötvös Loránd Tudományegyetem, Geofizikai és Űrtudományi Tanszék, 2025.03.01.
- [12] Michael Bennett és Corinne Kramer, „Large Constellations of Low-Altitude Satellites: A Primer,” 04 2023. [Online]. Available: <https://www.cbo.gov/system/files/2023-05/58794-satellite-primer.pdf#:~:text=several%20components%2C%20including%20mission-%20specific%20payloads%20like,ground%20operators%2C%20position%20determination%2C%20and%20other%20functions.> [Hozzáférés dátuma: 30 11 2025].
- [13] Andrew E. Turner, „Constellation Design Considerations for Smallsats,” [Online]. Available: <https://s3vi.ndc.nasa.gov/ssri-kb/static/resources/Constellation%20Design%20Considerations%20for%20Smallsats.pdf>. [Hozzáférés dátuma: 30 11 2025].
- [14] „E-SAT,” [Online]. Available: https://www.e-sat.fr/en/oneweb/#nos_gammes. [Hozzáférés dátuma: 30 11 2025].
- [15] A. dr. Kern, Szerző, *A távérzékelés célja, története - A távérzékelés szerepe a földtudományokban*. [Performance]. ELTE Eötvös Loránd Tudományegyetem, Geofizikai és Űrtudományi Tanszék, 2025.03.01.
- [16] „EM-DAT,” [Online]. Available: <https://www.emdat.be/>. [Hozzáférés dátuma: 30 11 2025].
- [17] „UNDRR - Disaster,” [Online]. Available: <https://www.undrr.org/terminology/disaster>. [Hozzáférés dátuma: 30 11 2025].
- [18] Kuris Zoltán, „AZ EGYSÉGES DIGITÁLIS RÁDIÓRENDSZER (EDR),” *Hadmérnök*, %1. kötetV. Évfolyam 2. szám , 2010. június.
- [19] H. Martin, „heise online,” 09 04 2025. [Online]. Available: <https://www.heise.de/en/news/A-special-Starlink-the-Bundeswehr-tests-development-of-satellite-constellations-10345465.html>. [Hozzáférés dátuma: 30 11 2025].
- [20] „Iris,” [Online]. Available: <https://iris-project.org/>.
- [21] Martyn Wingrove, „rivera,” 24 05 2023. [Online]. Available: <https://www.rivieramm.com/news-content-hub/news-content-hub/mol-starts-trialling-starlink-leo-connectivity-76244>. [Hozzáférés dátuma: 30 11 2025].

- [22] „ANIPOC,” [Online]. Available: <https://www.anico.hu/anipoc-rendszer>. [Hozzáférés dátuma: 30 11 2025].
- [23] „Starlink - Roam,” [Online]. Available: <https://starlink.com/hu/roam>. [Hozzáférés dátuma: 30 11 2025].
- [24] „ResearchGate,” [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/GEO-MEO-and-LEO-orbits_fig5_363595939.
- [25] LotusArise, 13 12 2020. [Online]. Available: <https://lotusarise.com/satellite-frequency-bands-upsc/>. [Hozzáférés dátuma: 30 11 2025].
- [26] „Nasa,” [Online]. Available: https://assets.science.nasa.gov/dynamicimage/assets/science/cds/learn/images/ems/EMS_Diagram_09172025.jpg?w=2500&h=1406&fit=clip&crop=faces%2Cfocalpoint.
- [27] Somkuti Bálint, „Index,” 25 02 2021. [Online]. Available: <https://index.hu/techtud/2021/02/25/miert-enyire-fontosak-a-katonai-muholdak/>. [Hozzáférés dátuma: 30 11 2025].
- [28] Áron, „Blogger.com,” 4 06 2016. [Online]. Available: <https://kozeljovo.blogspot.com/2016/06/cellularis-halozatok.html>. [Hozzáférés dátuma: 30 11 2025].