

PhD értekezés

Végyári Zsolt
okl. villamosmérnök

- 2023 -

**NEMZETI KÖZSZOLGÁLATI EGYETEM
KATONAI MŰSZAKI DOKTORI ISKOLA**

Végvári Zsolt

**A szárazföldi csapatok villamosenergia-
ellátásának vizsgálata, és a fejlesztés lehetőségei**

Doktori (PhD) Értekezés

Témavezető: Prof. Dr. Turcsányi Károly ny. mk. ezredes (DSc)

Társ-témavezető: Dr. Hegedűs Ernő mk. alezredes (PhD)

BUDAPEST, 2023

Tartalomjegyzék

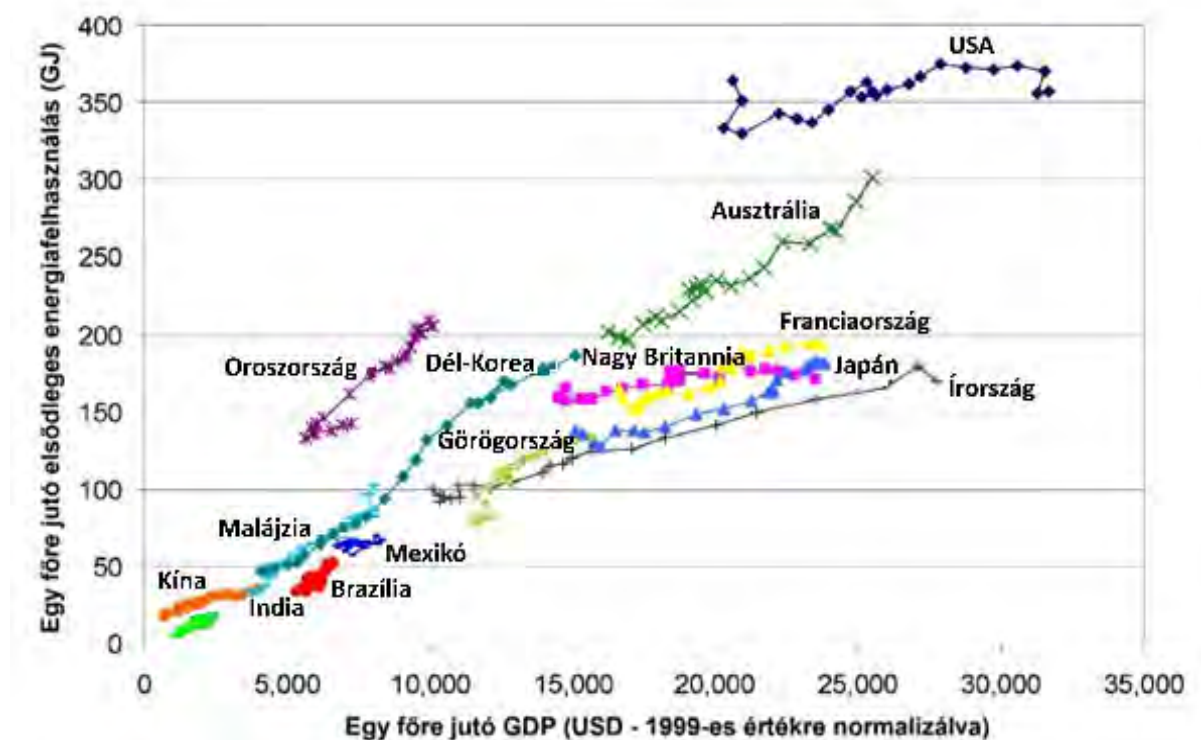
Tartalomjegyzék	3
Bevezetés	6
A tudományos probléma megfogalmazása	10
Kutatási célkitűzések	14
Kutatási hipotézisek megfogalmazása	15
Kutatási módszerek	16
Az értekezés felépítése.....	17
Irodalmi áttekintés	18
1. A villamos energia szerepe a szárazföldi csapatok béke idejű tevékenysége során	24
1.1. A szárazföldi csapatok béke idejű energiakosara.....	26
1.2. A villamos energia költségvetési hatása.....	29
1.3. A szárazföldi csapatok béke idejű villamosenergia-felhasználásának sajátosságai és az energia-hatékonyság	31
1.3.1. A villamos berendezések fogyasztásának csökkentése	33
1.3.2. A Magyar Honvédség saját tulajdonú stacioner villamosenergia-előállító képessége	34
1.3.3. Adminisztratív energiagazdálkodási szabályok alkalmazása.....	36
1.4. A Magyar Honvédség energiapolitikáját meghatározó dokumentumok.....	37
1.5. Összegzés	40
2. A szárazföldi csapatok terepi villamosenergia-ellátásának felépítése és alkalmazott eszközei	45
2.1. A generátorok.....	48
2.1.1. A katonai aggregátorok története	50
2.1.2. A katonai tábori aggregátorok jelene	54
2.1.3. Gép- és harcjárművek generátorai.....	56
2.1.4. A katonák személyi felszerelésének villamosenergia-ellátása.....	57
2.2. Akkumulátorok.....	58
2.2.1. Az akkumulátorok működése, jellemzői	58
2.2.2. Az alkalmazott akkumulátorok típusai.....	60
2.2.3. Szuperkondenzátorok	61
2.3. Az infokommunikáció.....	63
2.3.1. Információs műveletek.....	63
2.3.2. Az információs műveletek és az infokommunikáció összefüggései.....	65
2.3.3. Az infokommunikációs berendezések terepi villamos ellátása.....	65
2.4. Egyéb villamos fogyasztók	68
2.4.1. Világítás	68
2.4.2. Hűtés-fűtés	69
2.4.3. További villamos üzemű tábori eszközök.....	70
2.5. Összegzés	71

3.	A terepi villamosenergia-fogyasztás mértéke és várható trendjei	76
3.1.	A tábori elhelyezésben biztosítandó villamos teljesítmény	76
3.2.	A személyi felszerelés villamosenergia-igénye	79
3.3.	A katonai gép- és harcjárművek villamosenergia-fogyasztása	82
3.4.	A katonák személyi felszerelésének részét képező villamos eszközök fogyasztásának trendjei	85
3.4.1.	A digitális katona koncepció hatása a személyi felszerelés villamos eszközeire	85
3.4.2.	A személyi felszerelés alkalmi használatú villamos eszközei	88
3.4.3.	Egyedi villamos eszközök a katonák felszerelésében	90
3.5.	A katonai gép- és harcjárművek fedélzeti villamos eszközeinek fogyasztási tendenciája	91
3.5.1.	A járműspecifikus villamos berendezések katonai alkalmazása	91
3.5.2.	A katonai járművek speciális fedélzeti villamos berendezései	92
3.5.3.	Alternatív hajtásláncok a katonai gép- és harcjárművekben	94
3.6.	A tábori elhelyezés terén várható villamosenergia-igény változása	97
3.7.	Összegzés	98
3.7.1.	A pilóta nélküli eszközök hatása	102
4.	A terepi villamosenergia-ellátás nehézségeinek elvi és gyakorlati csökkentési lehetőségei	104
4.1.	A villamosenergia-tárolók energia-sűrűségének növelése	105
4.1.1.	A villamos energia natív tárolásának elvi lehetőségei	107
4.1.2.	Mechanikus energia-tárolás	108
4.1.3.	Hőtárolók	109
4.1.4.	Kémiai tárolók	109
4.1.5.	Elektrokémiai tárolók	113
4.2.	Energiatárolók szabványosítása	117
4.3.	Villamos fogyasztók energia-hatékonyságának javítása	118
4.3.1.	Az infokommunikációs eszközök energia-hatékonyságának javítása ...	119
4.3.2.	A világító eszközök energia-hatékonyságának javítása	120
4.3.3.	Az egyéb villamos fogyasztók energia-hatékonyságának javítása	121
4.3.4.	A villamos elosztó hálózat energia-hatékonyságának javítása	121
4.4.	A villamosenergia-termelés hatékonyságának javítása	123
4.4.1.	A hőveszteség csatolt hasznosítása Peltier-elemmel	123
4.4.2.	A hőveszteség csatolt hasznosítása Stirling-motorral	125
4.4.3.	Más hőerőgép alkalmazása	126
4.5.	In situ energiatermelés alternatív üzemanyaggal	126
4.5.1.	Nukleáris energia-termelés tábori körülmények között	127
4.5.2.	Bioenergia terepi hasznosítása	129
4.5.3.	Geotermikus energia terepi hasznosítása	130
4.5.4.	Vízenergia terepi hasznosítása	130
4.5.5.	Szélenergia terepi hasznosítása	131
4.5.6.	A napenergia terepi hasznosítása	133
4.6.	Energia-menedzsment	139

4.7. Összegzés	143
5. A szárazföldi csapatok képességeinek javítására alkalmas villamos energetikai megoldások	147
5.1. A katonai használatra alkalmas villamosenergia-tárolók energiasűrűségének összehasonlítása.....	147
5.2. A katonai használatra alkalmas villamosenergia-termelő lehetőségek összehasonlítása.....	153
5.3. Az automatizált villamosenergia-menedzsment lehetőségei.....	160
5.4. A gyalogos katonák képességeit kiterjesztő villamos energetikai megoldások.....	161
5.5. A gép- és harcjárművek képességeit kiterjesztő villamos energetikai megoldások.....	164
5.6. Tábori elhelyezés.....	166
5.7. Összegzés	168
Összegzett következtetések	171
Új tudományos eredmények.....	174
Ajánlások és további kutatást igénylő területek.....	176
Ábrák és táblázatok jegyzéke.....	177
Témakörből készült publikációim	182
Felhasznált irodalom.....	184
Mellékletek	198
1. melléklet: A Magyar Honvédség energia-felhasználása 2015 és 2020 között (saját szerkesztés a HM VGH és az MH ARB által szolgáltatott adatok alapján).....	198
2. melléklet: Energetikai módszerek összehasonlítása (saját szerkesztés)	201
3. melléklet: A CL15 gyakorlat Smart Energy szekciójában szereplő eszközök termelési és fogyasztási adatai (saját gyűjtés).....	203

Bevezetés

A Nemzetközi Energia Ügynökség¹ 2006 óta minden évben kiadja az előző évre vonatkozó energetikai adatokat tartalmazó statisztikáit, amelyek sok mindent elárulnak a világ, vagy egy-egy nemzet fejlettségéről is. Egy ország gazdaságának fejlettségét általában az egy főre jutó GDP szerint szokás rangsorolni, de akkor is hasonló sorrendet kapnánk, ha az egy főre jutó energiafelhasználás szerint raknánk őket egymás után.



1. ábra: Az energiafelhasználás és GDP összefüggése 1984-2002 között (saját szerkesztés az [1] alapján)

Ezen statisztikák szerint az emberiség 2019-ben összesen 606 milliárd GJ primer energiát² használt fel, míg 1973-ban ez a mennyiség még csupán 254 milliárd GJ volt [2]. Tehát 44 év alatt 138 %-al nőtt a civilizáció energiaigénye, miközben a bolygó lakossága „csak” 96 %-al növekedett [3]. A villamosság jelentőségét igen jól mutatja, hogy míg 1973-ban a teljes szekunder³ villamosenergia-felhasználás 203 TWh (kb. 730 millió GJ) volt, addig 2019-ben

¹ International Energy Agency (IEA). 1974-ben alapított energetikai adatgyűjtő és elemző szervezet. Működését jelenleg 29 állam finanszírozza, Magyarország 1997-ben csatlakozott.

² A primer (elsődleges) energiák a természetben előforduló energiahordozók. Ide tartoznak a fa és a fosszilis anyagok (szén, földgáz, finomítatlan kőolaj), a radioaktív anyagok és a megújuló források.

³ A szekunder (másodlagos) energiák azok az energiahordozók, amelyek tudatos emberi tevékenység során jönnek létre a primer energiák felhasználásával. Ide tartoznak többek között a finomított kőolaj származékok, és

már 2.790 TWh (kb. 10 milliárd GJ) [2]. Tehát a vizsgált időszakban az emberiség energiakosarán belül a villamos energia részaránya közel hatszorosára (5,76), míg a nominálisan felhasznált mennyiség csaknem a 14-szeresére (13,75) nőtt. Jelenleg a megtermelt primer energia nem egészen 20 %-a kerül villamos energia formájában hasznosításra, ami nem tűnik soknak, ugyanakkor azt is figyelembe kell venni, hogy a primer hordozókból a szekunder elektromosságot előállító erőművek hatásfoka átlagosan 50% körüli [4], ami igen jónak tekinthető, míg felhasználói oldalon alkalmazott villamos gépek hatásfoka jellemzően 90% környékén alakul. Ha még azt is számításba vesszük, hogy a disztribúció során a veszteség alig 1%, akkor azt kapjuk, hogy a villamosság szerepe az emberiség teljes energialáncában 20-30% körüli. Mindezek az adatok elég szemléletesen kirajzolnak egy trendvonalat, amely alapján valószínűsíthető, hogy a belátható jövőben tovább fog nőni az előállított és felhasznált villamosság nominális mennyisége, illetve részaránya is a teljes energiafelhasználáson belül.

Miután a haderő a társadalom része, az ott meghatározó folyamatok markánsan megjelennek a katonai alakulatok működésében is. A különböző haderőnemek közül a szárazföldi csapatok azok, amelyek tevékenysége a leginkább hasonlatos a társadalom többségéhez és általában létszámukat tekintve is ezek a legjelentősebbek a haderőn belül, így az energia-ellátás technológiája, eljárásrendje és a felhasznált energia-hordozók összetétele (energiakosár) is itt van a leginkább szinkronban. Éppen ezért az esetlegesen védelmi-szféra specifikus eltérések is itt tanulmányozhatóak a legjobban

A villamosság, mint szekunder energiaforrás növekvő jelentőségét nem sokan vonják kétségbe, az emberiség és ezen belül a szárazföldi katonai alakulatok függősége a villamosságtól évről-évre nő. Ennek okaira sok elmélet létezik, de én ezt leginkább a villamosság négy fontos jellemzőjére együttesen vezetem vissza:

1. A villamosság rendkívül jól konvertálható más energiaformákra, illetve energiaformákból. Bár az alkalmazott eljárások igencsak eltérő hatásfokkal bírnak, a primer energia csaknem minden hétköznapi megnyilvánulására létezik valamilyen elemi vagy összetett⁴ módszer, amivel az elektromossággá alakítható, vagy abból visszaállítható. Ebből következik, hogy számos olyan eljárás ismert [5], amelyek

a villamosság is. A szekunder energia létrehozása is energia-befektetéssel jár, ezért szekunder formában, az eljárás hatásfokától függően, már csak az eredeti primer energia 40-90 %-a lesz csupán elérhető.

⁴ A hőerőművek tipikusan többszörösen összetett eljárást alkalmaznak. Fosszilis anyag (szén, olaj) kémiai energiájából hőenergiát és abból kinetikus energiát állítanak elő, majd ebből villamosságot.

segítségével a villamos energiát ipari mennyiségben is elfogadhatóan jó hatásfokkal, tehát gazdaságosan lehet megtermelni.

2. A villamos energia a távvezetékek segítségével minimális veszteséggel, tehát olcsón továbbítható. Magának a távvezetékálózatnak a kiépítése elég komoly beruházást jelent, de utána hosszú időn keresztül szerény költségek mellett lehet energiával ellátni a felhasználókat, amelyek jóval kedvezőbbek, mint pl. a fosszilis üzemanyagok csővezetékes, közúti, vasúti, illetve vízen történő disztribúciójának költségei, hiszen példának okáért az ellátási lánc legvégén az úthálózat kiépítésének és fenntartásának extrém magas költségei mellé, a szállítás költsége/vesztesége is rendkívül magas.
3. Bár a villamosság előállítása többnyire nem környezetkímélő, de mind a továbbítása, mind a lokális felhasználása emissziómentes, így egy bizonyos kontextusban akár zöld energiaként is felfogható. A széntüzeléses hőerőművek egyáltalán nem nevezhetők környezetbarátnak, de a villamosság teljesen emissziómentesen is előállítható, a nap, a szél vagy a víz erejével. Ráadásul ezek ára is versenyképes a hagyományos erőművi technikákkal, amíg pl. a motorbenzin vagy gázolaj, mint szekunder energia előállítására nem létezik számba vehető alternatívája az olajbányászatnak és az olajfinomításnak.

energia megjelenési formája	eszköz, hatás és iránya		hatásfok (%)	villamos energia	
kinetikus	→	generátor, dinamó	→		90<
		piezo-elem	→		<5
	←	villanymotor	←		90<
		piezo-elem	←		<5
kémiai	→	szárazelem, akkumulátor	→		60-80
		üzemanyagcella	→		60
	←	akkumulátor	←		80<
		elektrolízis	←		>65
fény	→	fotovoltaikus (PV) hatás (napelem)	→		20-30
	←	izzó	←	5-10	
		LED	←	25<	
hő	→	Seebeck-effektus (Peltier-elem)	→	<10	
	←	fűtőszál	←	100	
		Peltier elem	←	5<	

1. táblázat: Elemi elektromos energiakonverziók és hatásfokuk (saját szerkesztés a [5] alapján)

4. Az emberiség fejlődése szempontjából jelenleg az információs korszakban tart. Márpedig az infokommunikációs technológiánk, csaknem teljes egészében elektronikus berendezéseken nyugszik. A gépek hajtására, a fűtésre vagy világításra is léteznek alternatív, nem elektromosságon alapuló megoldások. A petróleumlámpa például sok szempontból elmaradott technika a villanyvilágításhoz képest, de mégiscsak egy létező, működő alternatíva. Az információ feldolgozása és továbbítása is folyhatna elméletben pl. papír-alapon is, de ezen a területen az elektronikus eszközök olyan félelmetesen hatékonyak, hogy fel sem merülhet semmilyen más módszer. Tehát az információs korszak egyben elektronikus, azaz elektromos korszak is.

Bár ma a világ lakosságának kb. 15 %-a, mintegy egymilliárd ember él olyan helyen, ahol a villanyáram nem elérhető, a civilizáció nagyobb része számára a villamosság mellőzése mára annyira elképzelhetetlen, hogy arról születnek egészen apokaliptikus hangulatú tudományos írások, hogy vajon mennyi ideig lennénk képesek túlélni a hiányát [6], és ezek a kérdések joggal merülnek fel a haderő és természetesen a szárazföldi csapatok tekintetében is. Az emberiség nagy része már nem tudja elképzelni az életét a modern infokommunikációs technológia nélkül, de ennél sokkal nagyobb probléma, hogy a világgazdaság is kritikus mértékben támaszkodik az információkra. Márpedig a villamos berendezéseken kívül az információk jelenleg ismert nagyságrendű tárolására, kezelésére és átvitelére e pillanatban nincs alternatív technológia, és még a távolabbi jövőben sem várható, hogy felbukkanna ilyen.

Napjaink társadalmát nem véletlenül emlegetik gyakorta, mint információs társadalmat. Ez lényegében annyit jelent, hogy a megelőző korszakokhoz képest minden korábbinál fontosabb erőforrássá vált az információ [7]. Vagyis birtoklása sokkal nagyobb jelentőséggel bír, mint a földterületek vagy termelőeszközök birtoklása valaha bírt. Ezt semmi sem szemlélteti ékebben, mint az, hogy a tech-cégek tőzsdei kapitalizációja egészen az orosz-ukrán háborúig rendszerint meghaladja a hagyományos termelő-kereskedő cégekét, annak ellenére, hogy az általuk fizikailag is birtokolt javak mennyisége csupán töredéke azokénak. Miután ez a trend a háború és a kapcsolódó energiaválság miatt megszakadt, de a belátható jövőben várhatóan tovább folyik az elektronikus eszközök és velük a villamos energia diadalmenete is. Mindeközben a korábban említett univerzalitása, kezelhetősége és környezetre gyakorolt kedvezőbb hatása miatt a villamosság olyan területeken is megjelenik majd vagy növeli a jelentőségét, ahol korábban ez nem volt jellemző. Ennek talán legismertebb példája az elektromobilitás, amely kb. két évtizede még csupán teoretikusan

létezett, míg mára a gépjárműipar meghatározó trendjévé vált és már a szárazföldi csapatok képességei szempontjából meghatározó jelentőségű katonai járműtechnológiában is megvetette a lábát.

Ez a megelőző korokban elképzelhetetlen lett volna, de a jelen társadalmában az információ nagyobb érték, mint akár a nyersanyagok vagy termelőeszközök, ami természetesen a szárazföldi csapatok tevékenységére is rányomja a bélyegét. A korszerű hadviselés egyre nagyobb mértékben zajlik az információs térben, olykor a hadműveleteknek az eszköze és a célja is maga az információ [8]. Ez pedig a villamos energiát létszükségletté teszi a katonák számára, hiszen az információ nagy mennyiségű és nagy hatékonyságú feldolgozása során nincs alternatívája az elektronikus eszközöknek.

A tudományos probléma megfogalmazása

A védelmi szféra is része a társadalomnak, így azok szabályszerűségei többnyire itt is érvényesülnek, ugyanakkor ez a terület számos olyan sajátossággal is bír, ami elég élesen elkülönül a társadalom egyéb szegmenseitől. Hosszas kutatások ellenére sem találtam a szárazföldi csapatokra, vagy akár a védelmi területre általában vonatkozó átfogó tanulmányt a villamosság szerepéről. Jelenlegi munkakörömet közvetlenül megelőzően nyolc éven keresztül dolgoztam a haditechnikai kutatás-fejlesztés területén⁵ és tapasztalataim szerint a villamosság kérdésköre a haderőknél egyelőre csak az eszközök szintjén, egy-egy konkrét berendezés kontextusában jelentkezik, nem vizsgálják a technológia jelentőségét, és nem keresik a mélyebb összefüggéseket a villamosság, illetve a csapatok képességei között. Bár 2018 és 2021 között a NATO párizsi székhelyű kutatás-fejlesztési szervezetének, az STO⁶-nak én voltam a nemzeti koordinátora, nem találtam nyomát annak, hogy a haditechnikai fejlesztők trendeket és komplex megoldásokat keresnének ezen a területen, így az elektromosság szerepét jobbra csak egy-egy fejlesztési projekt szempontjából értékelik.

Az STO-ban elsősorban a kézzel fogható technológiákkal, haditechnikai eszközökkel foglalkoznak. Az energetikának jelenleg nincs önálló panel⁷ szintű képviselője, de minden

⁵ Az 1920-tól fennálló Haditechnikai Intézet jogutódja a Technológiai Hivatal 2007-ben megszűnt, mint önálló intézmény [9], de a tevékenység más szervezetek alatt tovább folyt és természetesen jelenleg is folyik.

⁶ Science and Technology Organization. A szervezet 2012-ig RTO – Research and Technology Organization néven tevékenykedett.

⁷ A NATO STO panelek nagyjából megfelelnek az EDA munkacsoportoknak, tehát tematikus nemzetközi koordinációs fórumok. A NATO STO munkacsoportok pedig nagyjából megfeleltethetőek az EDA projekteknek, vagyis egy konkrét probléma megoldásán dolgozó nemzetközi munkaközösségről van szó.

panelben működik több olyan munkacsoport, amely tevékenységének fókuszában az energia, illetve konkrétan a villamos energia áll.

angol megnevezés	rövidítés	magyar megnevezés
Applied Vehicle Technology	AVT	Alkalmazott Járműtechnológia
Human Factors and Medicine	HFM	Emberi Tényező és Orvostudomány
Information Systems Technology	IST	Információs Rendszerek Technológiája
System Analysis and Studies	SAS	Rendszeranalízisek és Tanulmányok
Systems Concepts and Integration	SCI	Rendszerkoncepciók és Integráció
Sensors and Electronics Technology	SET	Szenzorok és Elektronikai Technológia
Modelling and Simulation Group	MSG	Modellezés és Szimulációs Csoport

2. táblázat: A NATO STO paneljei [10]. Az MSG nem klasszikus panel, mivel nincsenek „alatta” munkacsoportok. Tevékenységével a munkacsoportok kutatásait támogatja

Az Európai Védelmi Ügynökség⁸ a Kutatási Technológiai és Innovációs Igazgatóságának más CapTech-jei⁹ (pl. a szárazföldi technikák) igényei alapján ugyanakkor már viszonylag korán felfedezte, hogy az energia és a környezeti kérdések nagyban meghatározzák majd a jövő védelmi törekvéseit és képességeit, és létrehozta az Energia és Környezet Munkacsoportot¹⁰, amelyben alapításától kezdve 2022 végéig képviseltem Magyarországot¹¹. Létrehozásakor csak ad-hoc munkacsoportnak szánták, de nyolc évnyi működése során nagyon komoly érdeklődés övezte a tevékenységét. Mivel az EDA általában, de az E&E WG különösen szorosan együttműködik az Európai Unióval, illetve a tagállami befizetéseken túl komoly támogatást is kap innen, a tevékenységére jellemzőbb a haderők „béke időszaki” működésének vizsgálata, illetve dual-use technológiák prioritizálása. A munkacsoport szakmai tekintélyét viszont nagyban növeli, hogy 2022-től átalakult állandó munkacsoporttá, az Európai Védelmi Ügynökség terminológiájában, úgynevezett CapTech-é.

⁸ European Defence Agency – EDA.

⁹ Capability Technology Groups – Képesség Technológiai Csoport. Lényegében munkacsoport.

¹⁰ Energy and Environment Working Group (E&E WG) – Energetikai és Környezeti Munkacsoport.

¹¹ 2022 augusztus 1-ig voltam beosztásban az MH K+F koordinációs szervezeténél az MH Modernizációs Intézetnél és annak jogelődjeinél. Augusztus 1-től az NKE-nél teljesítek szolgálatot, ezzel párhuzamosan a haditechnikai K+F nemzetközi képvisellel kapcsolatos megbízásaim többsége is megszűnt.

angol megnevezés	rövidítés	magyar megnevezés
Technologies, Components and Modules	TCM	Technológiák, Komponensek és Modulok
Radio Frequency Sensors Technologies	RFST	Rádiófrekvenciás Szenzortechnológiák
Electro Optical Sensors Technologies	EOST	Elektro-optikai Szenzortechnológiák
Communication Information Systems and Networks	CISN	Kommunikációs Információs Rendszerek és Hálózatok
Materials and Structures	Materials	Anyagtechnológiák és Szerkezetek
Missiles and Munitions	M&M	Rakéták és Lőszer
Aerial Systems	Air	Légi Rendszerek
Ground Systems	Ground	Szárazföldi Rendszerek
Guidance, Navigation and Control	GNC	Irányzás, Navigáció és Irányítás
Naval Systems	Maritime	Haditengerészeti Rendszerek
Simulation Technologies	Simulation	Szimulációs Technológiák
CBRN and Human Factors	CRBN&HF	ABV ¹² és Emberi Tényező
Cyber Research and Technology	Cyber	Kiberkutatás és Technológia
Energy and Environment	E&E	Környezet és Energia
Space	Space	Világűr

3. táblázat: Az EDA RTI¹³ igazgatóságának munkacsoportjai [11]

Ebből a munkacsoportból nőtt ki még 2015-ben a CF-SEDSS¹⁴ eseménysorozat, amelyet az EDA szervez és bonyolít, de az Európai Bizottság finanszíroz. Az első sorozat célja egy komoly szakmai közösség összehívása volt, a 2019-ben befejeződött második sorozatban pedig már európai szintű energetikai és/vagy környezetvédelmi projektek létrehozása volt a cél. A 2020-tól induló harmadik sorozatban már a projektek bonyolítása folyik, amelyek közül Magyarország a személyemen keresztül kétféleképpen is részt vett. Mivel a fórum munkája során végig a magyar delegáció vezetőjeként tevékenykedtem (és még tevékenykedem jelenleg is), igen fontos és hazai viszonylatban unikális információkhoz jutottam hozzá.

A munkacsoportban folyó munka során számtalan olyan ipari vagy akadémiai szereplő olyan kutatási eredményét volt módomban megismerni, amelyet széles körben még nem publikáltak, de ennél is fontosabbak voltak azok a dokumentumok, elsősorban jelentések, amelyeket az EDA rendelt meg és finanszírozott. Ezek közül kiemelendő az OSRA¹⁵ [12], amelyet a tagállamok visszajelzései alapján folyamatosan frissítenek és amely munkacsoportonként tartalmazza a legfontosabb kutatási célokat, illetve a hozzájuk tartozó

¹² Atom, Biológiai és Vegyi fegyverek

¹³ Research, Technology and Innovation – Kutatási, technológiai és innovációs

¹⁴ Consultation Forum for Sustainable Energy in Defence and Security Sector – Konzultációs Fórum a Védelmi és Biztonsági Szektor Fenntartható Energetikájáért.

¹⁵ Overarching Strategic Research Agenda – Átfogó Stratégiai Kutatási Lista.

rész kutatási területeket, úgynevezett TBB¹⁶-ket. Igen hasznosak voltak még számomra egyes, az EDA által finanszírozott projektek jelentései, mint például a Maliban a Smart Energy Camp Project részeként telepített hibrid erőmű állapotjelentései [13], továbbá a munkacsoport, illetve a fórum tanácskozásain bemutatott előadások [1].

A NATO brüsszeli főparancsnokságán működik még egy 2010-ben létrehozott igen érdekes szervezet, amelynek neve Újszerű Biztonsági Kihívások Osztálya¹⁷. Ez egy inkább doktrinális tevékenységet folytató szervezeti egység, amelynek feladata azoknak a fenyegetéseknek és problémáknak a felkutatása, osztályozása, amelyekre jelenleg még nincs kellőképpen felkészülve a szövetség. Az azonosított problémákra lehetőség szerint próbálnak válaszokat is keresni és ennek érdekében megjelennek többek között katonai gyakorlatokon is. 2015-ben Várpalotán került megrendezésre a Capable Logistician 2015 logisztikai gyakorlat, amelynek szervezője a prágai székhelyű Multinational Logistic Coordination Centre¹⁸ volt. Itt az újszerű terepi energetikai megoldások önálló logisztikai szervezeti elembe tömörültek, amelynek magyar részről technikai összekötője és tanácsadója lehettem. Ebben a funkciómban szorosan együtt kellett működnöm a Smart Energy névre keresztelt logisztikai csoportba osztott katonai szervezetekkel, illetve a korszerű technológiákat szállító cégekkel is. Ezen tevékenység által nem csak a gyakorlatról készített jelentést ismerhettem meg [14], de rengeteg olyan gyakorlati tapasztalatra is szert tehettem, ami nélkülözhetetlen segítséget nyújtott az értekezés megírása során.

A hazai tevékenységen túl a nemzetközi szakmai szervezeteknél is azt tapasztaltam, hogy a szárazföldi csapatok képességei szempontjából a villamos energia fontosságát ugyan senki sem vitatja, de azt komplex módon, a mélyebb összefüggéseket is feltárva nem is vizsgálja senki. Ezt a hiányosságot felismerve kezdtem a témát kutatni, illetve ezzel kapcsolatosan publikálni.

Béke időszakban, amely Magyarország esetében az alaptörvény 48-54. cikke szerinti különleges jogrenden kívüli időszakot jelenti, a szárazföldi haderőnem jellemzője, hogy a csapatok tevékenysége energetikai szempontból vizsgálva viszonylag kevés eltérést mutat a civil szférától. Ez globálisan is igaz, ami a gyakorlatban annyit tesz, hogy béke időszakban a katonai szervezetek a működésük során elsősorban költséghatékonysági okok miatt nagyban támaszkodnak a civil villamosenergetikai infrastruktúrára. Geopolitikai okok miatt (ez alatt

¹⁶ Technology Building Block – Technológiai Építőelem.

¹⁷ Emerging Security Challenges Division – ESCD.

¹⁸ Az MLCC a NATO-tól független, de azzal szorosan együttműködő, kimondottan logisztikai gyakorlatokat szervező, illetve azok tapasztalatait gyűjtő és elemző szervezet.

elsősorban a viszonylag kis területi kiterjedést és a Közép-Európára jellemző domborzati és vízrajzi viszonyokat értem) a Magyar Honvédség béke időszakban csaknem 100 %-ban a civil villamos hálózati infrastruktúrát használja, míg más országok szárazföldi csapatainak esetében ez jellemzően csupán 80-90 %.

Viszont különleges jogrendi időszakban, akár területvédelmet valósít meg, akár missziós feladatot lát el, akár katasztrófavédelmi feladatkörben tevékenykedik, a szárazföldi csapatoknak energetikai szempontból viszonylag autonóm módon kell működniük. Ez olyan sajátosság, amelynek hatásait vizsgálni szükséges, a csapatok képességeinek fenntartása és növelése érdekében számolni kell a terepi körülmények közötti energiaellátással is. Ennek a tevékenységnek pedig része kell(ene) legyen a terepi villamosenergia-ellátás tervezése is mind a jelenben, mind a jövőben.

Az MH szárazföldi csapatainak a képességeik fenntartásához, és még annál is inkább a képességeik jövőbeni fokozásának érdekében elkerülhetetlen megismerni a harcéri villamosenergia-ellátás jelenlegi helyzetét, a várható jövőbeni kilátásokat, és mindazokat a technikákat és eljárásokat, amelyek felhasználhatóak lehetnek a jövőbeni villamos energetikai haditechnikai kutatás-fejlesztési tevékenység során.

Kutatási célkitűzések

1. A villamos energia és szárazföldi csapatok tevékenysége közötti összefüggések elemzése a béke időszakban, illetve műveleti körülmények között. Különös tekintettel a korszerű csapatok villamos energia függőségére.
2. A jelen és a közeli jövő villamos működésű haditechnikai eszközeinek vizsgálata, külön megvizsgálva a termelési és a fogyasztási oldalt, továbbá az ellátás rendszerét. A szárazföldi csapatok jelenlegi és a várható villamos energetikai igényeinek felmérése.
3. Az alkalmazott terepi villamos energetikai termelési és elosztási technológiák összehasonlító elemzése és a hatékonyság javítására vonatkozó lehetőségek vizsgálata. Szempontrendszer kidolgozása a villamos energetikai rendszerek értékelésére.
4. A korszerű technológiák és eljárások összevetése a hagyományos módszerekkel, a műveleti környezetben történő alkalmazhatóságuk vizsgálata és értékelése. Alternatívák keresése a meglévő rendszerek és eszközök hatékonyságának növelésére.

Kutatási hipotézisek megfogalmazása

1. A korszerű szárazföldi csapatok nem nélkülözhetik a villamos energiát, annak megléte esszenciális a harcképesség fenntartása szempontjából, a csapatok villamosenergia-igényének kielégítése több szempontból is szükséges a harci képességek fenntartása érdekében.
2. A szárazföldi csapatok terepi jelenlegi villamosenergia-ellátás rendszerének architektúrája rendkívül egyoldalú, erősen centralizált, ezért sérülékeny is. A villamosenergia-igény kielégítésének módja nagyon megterheli a logisztikai támogatást, műveleti területen a villamos energia iránti igény tartós növekedése fokozott kockázatot jelent a logisztikai támogatás rendszerére.
3. A szárazföldi csapatok villamosenergia-igénye az ismert tendenciák alapján mind a közeli, mind a távolabbi belátható jövőben nőni fog, az új technológiák bevezetésével egyes területeken akár viszonylag rövid idő alatt igen jelentős mértékben is. Ezek kielégítésének érdekében szükséges növelni az ellátási rendszer autonómiáját.
4. A szárazföldi csapatok villamos energia iránti igényének hosszabb távú kielégítésére nincs olyan technológia vagy eljárásrend, ami önmagában megoldást jelentene. A meglévő technikák optimalizálására és új innovatív megoldások tervszerű, komplex alkalmazására van szükség a megoldáshoz.
5. A napelemes rendszerek, a hibrid aggregátorok, a hidrogén alapú energia-tárolási technika, illetve más korszerű technológiák a terepi villamosenergia-ellátás bizonyos szegmenseiben jelentős mértékben képesek növelni az ellátási rendszer biztonságát, így a csapatok harckészültségét.

Kutatási módszerek

Értekezésemben, ahol az lehetséges volt, próbáltam primer kutatási módszereket felhasználni, de számos esetben csak szekunder módszerek voltak alkalmazhatóak [15]. Összességében az alábbi kutatási módszereket alkalmaztam:

1. A *szakirodalmi kutatás módszerét*, továbbá *a primer adatgyűjtés és elemzés módszerét alkalmazva* feltártam a magyar, illetve a releváns nemzetközi energia- és környezetpolitikai elvárások és a védelmi szféra összefüggéseit.
2. A *szakirodalmi kutatás módszerét alkalmazva* – a kutatáshoz szükségesnek ítélt mértékben – megvizsgáltam a releváns energetikai technológiák működési elvét, jellemzőit és elemzés, továbbá *saját fejlesztő-mérnöki tapasztalatok alapján* értékeltem azok haditechnikai alkalmazhatóságát. Megvizsgáltam a releváns katonai szabványok és szabályzatok tartalmát és értékeltem azok alkalmazhatóságát.
3. Az *indukció módszerét alkalmazva*, vagyis egyes eszközök és rendszerek trendjeit egy teljes eszköz- vagy rendszercsoportra kivetítve megbecsültem a szárazföldi csapatok bizonyos csoportjainak, eszközeinek, illetve azok egyes részeinek jelenlegi és várható villamosenergia-igényét.
4. Az *analízis-szintézis módszerét alkalmazva* meghatároztam az egyes technológiák és technikai eszközök alkalmazásának energetikai hatásait. Néhány a katonai alkalmazás szempontjából releváns technológia esetében *radar-diagramokat alkalmazva* végeztem összehasonlítást.
5. Az *adatgyűjtés és összehasonlítás módszerét alkalmazva* összesítettem és értékeltem egyes technikai megoldások és eljárások valós teljesítményét műveleti körülmények között. Ennek keretében saját *laboratóriumi és terepi méréseket, vizsgálatokat is felhasználtam*.
6. *Táblázatra és diagramra épülő szempontrendszerrel dolgoztam ki*, és értékeltem a tábori villamos energetikai berendezéseket és az esetleges fejlesztések, beszerzések és a rendszeresítésük hatásait az ellátás biztonságának szempontjából.

Az értekezés felépítése

Az értekezés a bevezetésből, a kutatómunka öt fejezetéből, továbbá az új tudományos eredmények bemutatásából áll.

A [1. fejezet](#)ben áttekintem a védelmi szféra energetikai és villamos energetikai tevékenységeinek összefüggéseit, és feltárom a Magyar Honvédség, illetve azon belül szárazföldi csapatok béke időszaki működésének villamos energetikai sajátosságait.

A [2. fejezet](#)ben megvizsgálom a szárazföldi csapatok által használt főbb villamos működtetésű rendszereket azok működését, főbb paramétereit és jelentőségét a csapatok képességei szempontjából, továbbá áttekintem azokat a villamos rendszereket, amelyek belátható időn belül várhatóan megjelennek a szárazföldi csapatok eszköztárában és ezzel növelik a villamosenergia ellátási rendszer terheit.

A [3. fejezet](#)ben meghatározom a terepi villamosenergia iránti igény jelen mértékét és várható trendjeit, és feltérképezem a terepi villamos energetikai rendszerek műveleti célú energia-hatékonyság javításának lehetőségeit és ezek alkalmazási korlátait.

A [4. fejezet](#)ben összefoglalom és a szükséges mértékben elemzem mindazokat a módszereket, amelyekkel a közeli jövőben racionálisan csökkenteni lehet a növekvő terepi villamosenergia iránti igényből fakadó, a logisztikai támogatási rendszerre rótt terhelést.

Az [5. fejezet](#)ben konkrétan megjelölöm azokat a fejlesztési lehetőségeket, amelyek a leginkább alkalmasak a Magyar Honvédség szárazföldi csapatainak műveleti területen történő villamosenergia-gazdálkodásának a korszerűsítésére és szempontrendszerrel dolgozok ki az egyes megoldások feladatfüggő optimális összeállítására.

Az [összegzett következtetések](#)ben megfogalmazom azokat a végkövetkeztetéseket, amelyek a tudományos kutatómunkám eredményeképpen álltak elő. Kiemelem tudományos eredményeimet és tézisekbe foglalom őket. Végül [ajánlások](#)at teszek az értekezés további felhasználására, illetve a rá épülő javasolt tudományos kutatási területekre.

A kézirat korrektúráját és formázását, a tudományos írásművekkel szemben támasztott elvárások teljesülésének ellenőrzését a [Haditechnika folyóirat](#) szerkesztősége, Rojkó Annamária, polgári szerkesztő, Druzsina József őrnagy, katonai szerkesztő, valamint Rózsáné Drahos Gabriella munkatárs segítette.

A formai követelmények a Nemzeti Közszolgálati Egyetem Doktori Szabályzatának megfelelően kerültek meghatározásra, az abban nem specifikált részletek tekintetében a [Hadtudomány](#) és a [Haditechnika](#) folyóiratok elvárásait tekintetem mérvadónak.

Egyes felhasznált irodalmak nem szabványos mértékegységeket is használnak. A globális energetikai makroadatokat pl. gyakran MToe-ben (egymillió tonna olaj ekvivalens) adják meg. Én az értekezésben kizárólag SI mértékegységeket használtam, így az energia tekintetében a Joule-t (J), illetve többnyire a villamosságban általánosan elismert Wh-t alkalmaztam. Ha valamilyen forrás más mértékegységet is használt, azt az értekezésben külön jelzés nélkül is SI egységre átszámolva közöltem. Ahol idegen nyelvű képanyagot módosítás nélkül használtam, ott minden esetben magyarra fordítva, de az eredeti forrásra hivatkozva tettem ezt.

A felhasznált források nyilvántartására, továbbá a hivatkozások pontos és szabályos kezelésére a [Zotero](#), szabadon felhasználható hivatkozáskezelő szoftvert alkalmaztam.

Irodalmi áttekintés

Könnyen belátható, hogy az emberiség és az általa létrehozott civilizáció egyre inkább függ a villamosságtól, ezért ennek technológiájáról, társadalmi, gazdasági és kulturális hatásairól bőszegesen áll rendelkezésre írott forrás is. Logikus lenne az a feltételezés, hogy számottevő irodalma legyen a villamosság katonai célú felhasználásának is, de ez sajnos nem így van. A kutatómunkám egyik első és nem várt eredménye, hogy bár egyes részterületek jól dokumentáltak, és egyes jól körülhatárolható szegmensekben valóban komoly fejlesztőmunka folyik, tulajdonképpen a villamosság szerepét, jelentőségét és hatását még senki nem vizsgálta átfogóan a védelmi szféra, vagy akár csak a szárazföldi alakulatok vonatkozásában.

Miután a villamosság általános használatának több, mint bőszeges az irodalma, az azonos technológia miatt tulajdonképpen a haderők béke időszaki működésének villamos háttere is jól dokumentáltnak tekinthető. Azonban éppen a béke időszakon túlmutató tevékenységek során (amelyek viszont épp azok, amikre egy haderőt elvben fel kell készíteni), és ahol igen sajátos igényei vannak a katonáknak, a szakirodalom töredékes, rendezetlen, sőt sok esetben gyakorlatilag nem is létezik. Ennek megfelelően a forráskutatást több eltérő fázisban és módszerrel valósítottam meg.

Ahhoz, hogy az értekezésemben megfelelő módon és színvonalon tudjam a választott témát áttekinteni, olyan mélységben kellett a villamosságtan és a kapcsolódó tudományok energetikai részterületeit, magukat a fizikai és kémiai alapokat ismernem, hogy gyakorta kellett átfogó, nagy terjedelmű, tankönyvszerű, alpművekhez fordulnom. Előnyben részesítettem az angol nyelvű irodalmat, mert a legismertebb címeket minden újabb kiadással

átszerkesztik és frissítik, így azok jóval naprakészebbek, mint a magyar nyelven elérhető kiadványok.

Az energia-tárolás kérdésekor minden esetben Robert A. Huggins: *Energy storage: fundamentals, materials and application* [16] című művét tekintetem elméleti kiindulási alapnak. Ez a könyv klasszikus értelemben vett alapmű, a legelemibb tudományos alapokról a Carnot-körfolyamattól és az entrópiától kezdve építi fel az energia-tárolás elméleti fundamentumait és mutatja be az ismert gyakorlati megvalósításokat. Számomra a mű egyik legértékesebb vonása, hogy terjedelmében is igazodik a gyakorlathoz. Például bár a Lítium-ionos akkumulátor globálisan szemlélve csupán egy kis szeglete a reverzibilis elektrokémiai reakcióknak, de mivel a hétköznapi energiatarolókban ezzel találkozunk a legtöbbször, a könyv viszonylag nagy oldalszámban tárgyalja azt.

A gyakorlatibb jellegű pl. elektrokémiai reakciók tanulmányozása során olyan, a maguk területén szintén alapműnek számító könyvekre támaszkodtam, mint az akkumulátorok terén a Pei Kang Shen által szerkesztett *Electrochemical energy: advanced materials and technologies* [17], a Gianfranco Pistoia által írt *Lithium-ion batteries: advances and applications* [18], az üzemanyagcellák terén a Ryan P. O'Hayre által vezetett szerzőkvarter *Fuel cell fundamentals* [19] című könyve vagy a szuperkondenzátorok terén a Yu, Chabot és Zang szerzők *Electrochemical supercapacitors for energy storage and delivery: fundamentals and applications* [20] című munkája.

Ezek a művek lényegében megfeleltethetőek az *Energy storage: fundamentals, materials and application* egy-egy fejezetének, de a terjedelemből következően ezekben számos olyan kisebb technológiai megoldás is részletesen kerül tárgyalásra, amely ott legfeljebb említést nyer. Megemlíthető, hogy bár természetesen a Huggins-féle *Energy storage: fundamentals, materials and application* is megemlíti az elektrokémiai reakciók hőmérsékleti függését, de a Pistoria-féle *Lithium-ion batteries: advances and applications* már valóban komoly oldalszámot szán a változó klimatikus viszonyok közötti akkumulátor töltés-kisütési ciklusoknak az élettartamra gyakorolt hatására is.

A villamos forgógépek terén Slobodan N. Vukosavic *Introduction to electrical machines* [21], a szűkebben vett aggregátorok terén L. L. J. Mahon *Diesel generator handbook* [22] című műveiben lefektetett fizikai alapokból indultam ki. Mivel az elmúlt évtizedekben a BLDC¹⁹ kivételével a villamos forgógépek területén nem sok dolog változott, akár az 1960-as

¹⁹ BrushLess DC, vagyis szénkefe nélküli egyenáramú motor. Ennek kifejlesztését csak a mikroelektronika elterjedése tette lehetővé.

kiadású Alapi Gábor által vezetett szerző-ötös által írt *Villamos forgógépek*-et [23] is használhattam volna, de a kapcsolódó elektronika (egyenirányítás, inverterek, szabályozás) miatt mégis a korszerűbb angolszász anyagot választottam. Miután az aggregátorok csupán hőerőgépekkel meghajtott generátorok, és a dugattyús motorok technológiája sem változott oly sokat, itt a Mahon-féle *Diesel generator handbook*-ra azért esett a választásom, mert 1992-es kiadás lévén talán nélkülözi a legújabb eredményeket, de bőséges ábrajegyzékével jól mutatja a napjainkban is használt eszközök működését.

A fotovillamos hatások terén Konrad Mertens *Photovoltaics: fundamentals, technology and practice* [24], míg általában a megújuló források terén Bent Sorensen *Renewable energy conversion, transmission, and storage* [25] című műveitől indultam el. Mivel a terület napjainkban nagyon divatos, talán itt találhattam a legtöbb korszerű és minőségi szakirodalmat. Jelen esetben mégis azért esett erre a két műre a választásom, mert az elméleti alapokon kívül kellő részletességgel tárgyalják az egyes technológiák gyakorlati megvalósítását is.

A fenti könyveknél a szerzők olykor egzotikus hangzású nevei ellenére a művek minden esetben olyan nagynevű kiadók gondozásában jelentek meg, mint a John Wiley & Sons, a CRC Press, az Elsevier vagy a Springer, tehát a nemzetközi szakirodalom széles körben elfogadott alaplíráiról van szó, amelyeket ahogy azt említettem, többnyire újra és újra kiadnak és ezzel együtt aktualizálnak is. Szintén fontos szempont volt, hogy ezek a könyvek a legtöbbször már önálló ISBN azonosítóval elektronikus formában is megjelennek, ami nemcsak az egyébként terjedelmes kiadványok fizikai kezelését könnyítette meg, de tudtam élni az elektronikus keresés nyújtotta gyakorlati előnyökkel is.

Ha kevésbé tárgyalt technikai részletekre kerestem a választ, akkor is preferáltam ezen kiadók kiadványait az elfogadottságuk és naprakészségük miatt. Kiemelném Dmitri Bessarabov, Haijiang Wang, Li Hui és Nana Zhao által szerkesztett *PEM electrolysis for hydrogen production: principles and applications*-t [26] és a Gavin Conibeer valamint Arthur Willoughby által írt *Solar cell materials: developing technologies*-t [27], amelyek nem csupán a jól dokumentált és széles körben alkalmazott eljárásokat tárgyalják, de olyan jelenleg kevésbé ismert technikák elvi alapjait is, amelyek még csupán a laboratóriumi fejlesztés stádiumában vannak, ám a későbbiekben még nagy jelentőségre tehetnek szert.

Mindezek ellenére néhány területen olyan gyors a technika fejlődése, hogy egyes eljárások átfogó irodalmi feldolgozása tulajdonképpen még meg sem történt. Ilyen esetekben a szakfolyóiratokban kerestem, de ezek többsége sajnálatos módon nem elérhető az egyetemi könyvtári adatbázisokból sem. A jelentős *impact factorral* rendelkező kiadványok friss

cikkeinek többségét csak egyesével lehet megvásárolni, amelyhez nem rendelkezem forrással. Szerencsére egyes periodikák, mint pl. az Elsevier által kiadott *Applied Energy* bizonyos időnként több korábban megjelentetett, de még nagyon is aktuális cikket szabadon hozzáférhetővé tesz az interneten.

A civil társadalom összefüggései alapján tekinthetjük triviálisnak azt a tényt is, hogy a villamosság szerepe nőni fog a jövő haderőinek harcképessége szempontjából, de amint azt említettem ezt még senki nem vizsgálta részletesen, illetve bizonyította be. Amennyiben elfogadjuk a hipotéziseimet, hogy a villamosság iránti igény fokozódni fog a jövő harcterein, illetve általában a szárazföldi csapatok műveletei során, akkor sem ismert ennek mértéke, és az, hogy az ellátás megoldható-e a jelenleg rendelkezésünkre álló technológiákkal.

Amint azt említettem, a villamosság szerepét a katonai szakirodalomban sajnos még nem csak hogy nem vizsgálták átfogóan és nem kerestek komplex összefüggéseket más területekkel, de tulajdonképpen még az adatok gyűjtése is csak gyermekcipőben jár, márpedig ezek nélkül igazán pontos elemzésnek nem is lehet alávetni a területet. A katonai műveletek során a vezetés a villamosságot jelenleg többnyire úgy kezeli, akár a levegőt, így általában csak akkor döbbennek rá a fontosságára, ha éppen nem áll rendelkezésre.

Természetesen próbáltam a kimondottan katonai szakirodalmat is feltérképezni és feldolgozni, de az említett hiányosságok okán a hagyományos könyvtári irodalom-kutatás helyett más módszerrel kényszerültem tájékozódni. Katonaként a szabályzatok, műszaki emberként pedig a szabványok irányából próbáltam releváns információkhoz jutni. Amint említettem, azt is kutatási eredménynek tekintem, hogy a terepi villamosságnak nincs mértékadó szakirodalma. Magyarország ezen a területen nincs elmaradva Európához képest, ugyanis a szabályzatok és szabványok területén lényegében ugyanazok a figyelembe vehető források. Ezek a *STANAG*²⁰ 4133-35 [28] szabványok, ahol a *STANAG 4133* a „vezető” szabvány, amely specifikálja a szabványos feszültségeket, illetve váltakozó-feszültség esetén a frekvenciát. A *STANAG 4134* az egyenfeszültségű, míg a *STANAG 4135* a váltakozó-feszültségű forgógépekre, generátorokra (aggregátorokra) ad meg további követelményeket.

Miután a terepen az energia biztosítása klasszikus logisztikai feladat, megpróbáltam a logisztikai kiadványokban is megkeresni az ellátásra vonatkozó eljárásrendet. Az *Allied Joint Publications* sorozat (AJP) tulajdonképpen egy NATO Szabványosítási Iroda²¹ által kiadott szabálygyűjtemény a szövetségi együttműködés rendjéről. Az *AJP-4*, az *Allied Joint Doctrine*

²⁰ STANdardisation AGreement – vagyis szabványosítási megállapodás. Ezek a valamennyi NATO tagállam által betartandó szabványok.

²¹ NATO Standardisation Office – NSO.

for Logistics [29], mint doktrinális mű elsősorban a magasabb szintű együttműködés rendjéről szól, így nem volt meglepő, hogy nem ment le a villamos energia biztosításának szintjére. Nagyobb reményeket fűztem a *NATO Logistics Handbook*-hoz [30], amely nem szabvány, de olyan szabványokon alapul, mint a szárazföldi csapatok üzemanyaggal történő ellátását szabályozó STANAG 4362 [31], így a szövetséges műveletek során taktikai szinten is nélkülözhetetlen logisztikai támogatási információkat tartalmaz. Ebben már több oldalon taglalják a különféle üzemanyagfajtákat és az ellátás rendjét, de itt sem esik szó a villamos energiáról, sőt még csak arról sem, hogy tábori körülmények között az üzemanyagok egy jelentős részét áramfejlesztésre szokás használni.

Tehát a korábban említett három szabványon kívül egyebet nem találtam, így elmondható, hogy jelenleg sem nemzeti sem szövetségi szinten nincsen megfelelően szabályozva a terepei villamosenergia-ellátás kérdése. Jelenleg nincs rá szabály, hogy egy adott alakulat esetében mekkora energiaigénnyel kell számolni. Ehhez hány darab és milyen teljesítményű aggregátort szükséges telepíteni, mekkora a tüzelőanyag felhasználás időarányosan és hogyan lesz folyamatosan biztosítva ez a mennyiség? Jelenleg ezek a problémák a villamos energia biztosításáért felelős logisztikusok tapasztalataira vannak bízva, amely nem biztos, hogy szerencsés, hiszen egy „éles” helyzetben esetleg kritikus rendszerek nem juthatnak energiához és állhatnak le.

Sajnos csak a kontinensen kívül találtam olyan anyagokat, amelyek megkönnyítették számomra a hazai rendszer feltérképezését és részletes feltárását is. A világ vezető haderői bizonyára mind rendelkeznek hasonló kiadványokkal, de én csupán az amerikai dokumentumokhoz fértem hozzá, mivel azok az interneten, publikusan is hozzáférhetőek.

Az USA katonai szabványait a *MIL-STD*²² sorozat foglalja magába. A *MIL-STD-633* [32] tartalmazza a szárazföldi csapatoknál²³ rendszeresített valamennyi, jelenleg több, mint 100 eszköz (mobil aggregátorok, valamint a hozzájuk tartozó elosztók és kábelek) részletes paramétereit, nézetrajzokkal, fotókkal és bekötési vázlatokkal. A szabványt rendszeresen frissítik, az éppen aktuális 633G jelzésűt 2013-ban adták ki.

A magyar katonai terminológiában leginkább a szakutasításnak lehetne megfeleltetni az ATP-eket²⁴. Számomra különösen fontos a 2018-as kiadású *ATP 3.34.45 „Electric Power*

²² Military Standard – Katonai Szabvány.

²³ A szabványt az USA-ban a védelmi minisztériumnak megfelelő Department of Defense (DoD) készítette, a US ARMY-n kívül a haditengerészet (NAVY) és a tengerészgyalogság (USMC) szárazföldi rendszereit is magába foglalja.

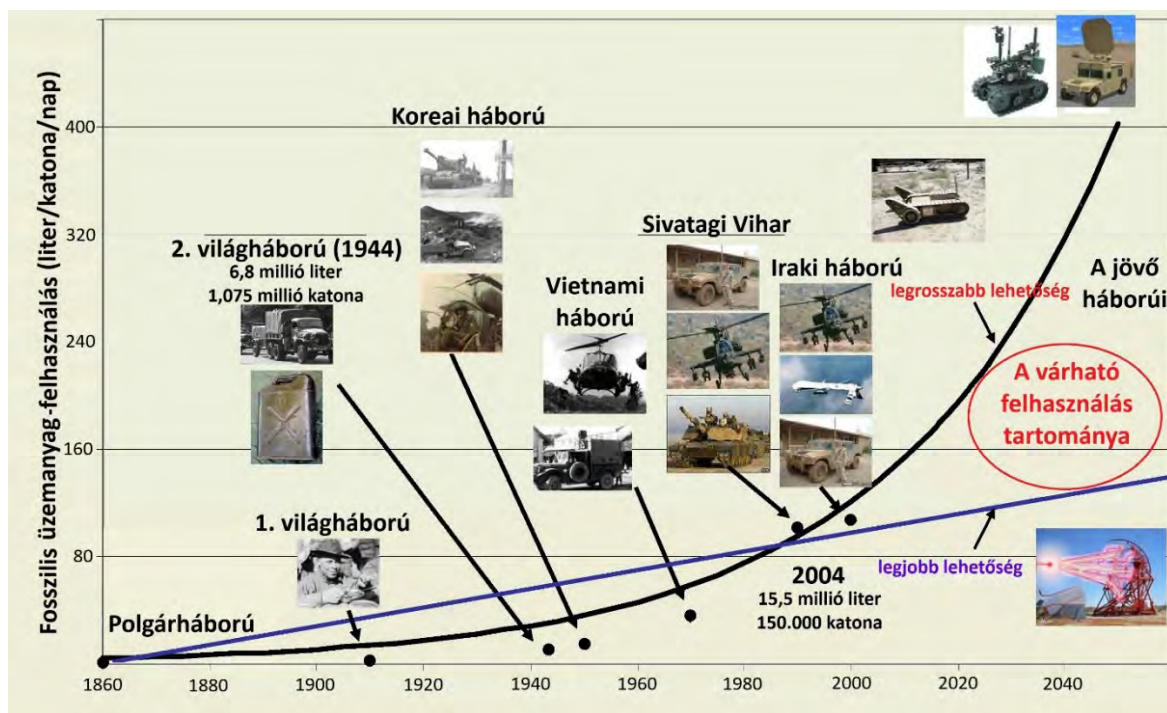
²⁴ Army Techniques Publication – Hadsereg Technológiai Kiadvány.

Generation and Distribution” [33] illetve a 2017-es kiadású *ATP 3.37-10 „Base Camps*” [34]. Előbbi a tábori villamosenergia-ellátó rendszerek tervezésére, felépítésére és üzemeltetésére vonatkozó eljárásrendet tartalmazza, míg az utóbbi a települt szárazföldi csapatok tábori elhelyezésére vonatkozó szabályrendszer. Az *ATP 3.34-45* a kategóriájában – igaz még csak a jövőre vonatkozóan – egyedülálló módon már említést tesz a megújuló forrásokról is, míg az *ATP 3.37-10* jelentősége egyebek mellett abban áll, hogy a körülményeket is figyelembe véve meghatározza az egy főre jutó átlagos villamosenergia felhasználást terepi körülmények között.

Miután az így felderített irodalom még mindig nem tekinthető bőségesnek, igénybe kellett vennem azt a valóban kissé unortodox kutatási módszert is, amely során csak egy nagyon szűk közösség számára, és csak részben hozzáférhető dokumentációt dolgoztam fel. Szerencsére létezik egy olyan szakmai közösség, akik, ha nem is minden esetben a maga teljességében, de felismerték a problémát és elkezdtek dokumentálni azokat a technikákat és eljárásokat, amik alapján később majd megoldásokat lehet keresni.

1. A villamos energia szerepe a szárazföldi csapatok béke idejű tevékenysége során

A hadviselés, illetve általában a védelmi képességek fenntartása mindig is rendkívül energiaigényes tevékenységnek számított, de többé-kevésbé egzakt számokkal csak a gépesített haderők energiafogyasztása jellemezhető. A második világháború végére egy amerikai katona²⁵ napi ellátásához már mintegy 4 liternyi olaj ekvivalens energiára²⁶ volt szükség. Ez a szám a vietnami háború idején már 33 liter volt, az első Öböl-háború alatt pedig elérte a 81 litert [35]. Ezek a számok persze nem a katona tevékenységének az energiaszükségletét mutatják, tartalmazzák a kapcsolódó hátszági energiafelhasználást és a szállítás energia-szükségletét is. Ugyanakkor a meglehetősen nagy számokból az is következik, hogy a védelmi tevékenység minden állam esetében jelentős fogyasztó. Napjaink katonai műveleteire jellemző, hogy gyakorta földrajzilag távol eső területeken és rendkívül gyors felvonulás után kerülnek végrehajtásra, így az is prognosztizálható, hogy a szektor energia felhasználása a belátható jövőben tovább fog nőni.



2. ábra: A USA katonai műveleteinek fosszilis energia-szükséglete (saját szerkesztés a [36] alapján)

²⁵ A második világháborúban az amerikai hadsereg volt egyedülként teljes egészében gépesítve, ezért a modern konfliktusok tekintetében ezt tekintjük kiindulási alapnak.

²⁶ Az igen nagy mennyiségű energia, de facto, nem hivatalos SI mértéke az olaj ekvivalens hordó, ami SI egységben kifejezve 6,12 GJ. Mivel egy hordó a kőolaj esetében nem egészen 159 litert jelent, egy liternyi kőolaj energiataralma kb. 38,5 MJ.

Az esetek többségében a védelmi szféra igen jelentős szereplője az energiapiacnak is. Az Egyesült Államokban a Védelmi Minisztérium messze a legnagyobb energia-felhasználó, és amennyiben az USA valamennyi haderőnemét egyetlen entitásként kezelnék, akkor ez lenne a világ legnagyobb energia felhasználója. A US DoD²⁷ a 2015. évben nagyjából 791 millió GJ-nyi felhasználása éppen meghaladja az egyébként igen fejlett iparral rendelkező Svédországot az évi teljes felhasználását [37], [38]. Ennek az energia-mennyiségnek az előállításához a Paksi Atomerőműnek 12,5 évre lenne szüksége. Nem nehéz elképzelni, hogy egy ekkora felhasználó milyen jelentős hatással lehet nemcsak a saját nemzetgazdaságára, hanem az egész világpiacon is.

Nem szabad elfeledkezni arról sem, hogy a védelmi szféra mindenkor része az adott állam gazdaságának. Még rendkívüli helyzetben, például háború idején sem attól függetlenül létezik, csupán a prioritása változik. Ebből következik a közgazdasági értelemben a Magyar Honvédség által biztosított katonai biztonság²⁸ egyfajta termék, azaz „jóság”, amelynek előállításához piaci szereplőként van jelen, még akkor is, ha sok szempontból különleges a helyzete, példának okáért a haza fegyveres védelme, mint tevékenység a Magyar Honvédség monopóliuma. Piaci szereplőként folyamatosan verseng a nemzetgazdaság más szereplőivel az erőforrások, egyebek mellett az energia birtoklásáért is [39], ahol az energia allokációja a védelmi igények kielégítésének érdekében a védelemgazdaság feladata.

Bár az értekezés elsődleges célja a katonai sajátosságok miatt a szárazföldi csapatok villamos energiával kapcsolatos viszonyának a műveleti környezetben történő vizsgálata, elkerülhetetlen, hogy azt bővebb kontextusban is elhelyezzük. Ennek során makrogazdasági mutatók alapján áttekintem a honvédelmi szféra és a védelemgazdaság szerepét a nemzetgazdaság(ok) energetikai viszonyaiban, illetve a villamos energia szerepét általában a honvédelmi szféra energetikai mixében. Mindezek alapján megpróbálok egy felhasználási trendet is felállítani. Egyebek mellett megvizsgálom a honvédelmi szféra és a villamos energia szerepét bizonyos nemzetgazdasági, energetikai és klímavédelmi vállalások és célkitűzések tükrében is.

²⁷ United States Department of Defense – Az Egyesült Államok védelmi minisztériumának megfelelő szervezet.

²⁸ Magyarország de facto katonai biztonságát a NATO tagság garantálja, ami viszont nem ajándék, hanem az ország NATO céljára felajánlott katonai képességén alapszik.

1.1. A szárazföldi csapatok béke idejű energiakosara

Az EDA E&E CapTech-je 2015 óta működteti a DCAS²⁹ projektjét, amely során elemzési célokból a tagállamoktól bekéri az éves energia-felhasználási adatokat. Megelőző beosztásomban az én feladatomban volt a Magyar Honvédség adatszolgáltatásának összeállítása és annak megküldése az EDA felé. A továbbiakban a 2015 és 2020 között szolgáltatott információkat tekintem kiindulási alapnak.

Ezek az adatok a HM Védelemgazdasági Hivatal és az MH Anyagellátó Raktárbázis által fizetett közmű- és üzemanyag vásárlásokon alapulnak, tartalmazzák a Magyar Honvédség, valamint a Honvédelmi Minisztérium és háttérszervezetei felhasználását és ebben a formában sehol máshol nem találhatóak meg. Az adatok nem tartalmazzák:

- a külföldön szolgálatot teljesítő csapatok energiafogyasztását;
- a rendkívül kis mennyiségben felhasznált energiahordozókat, például tűzifa, pakura;
- a külső partnerektől megrendelt szolgáltatások, például a vasúti szállítás energia-tartalmát.

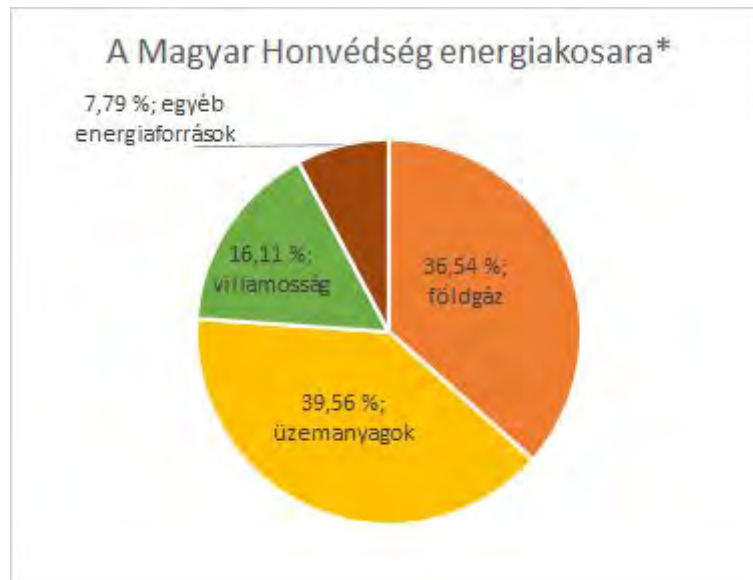
Az üzemanyagok tételei együttesen tartalmazzák a motorbenzint, gázolajat továbbá a kerozint. Az egyéb energiahordozók tételei tartalmazzák a fűtőolajat, a szenet és az LPG-t, mint szekunder energiaforrást, továbbá a vásárolt távhőmennyiséget. A villamos energia tételei magába foglalja a honvédségi tulajdonú naperőműveknek a termelését is.

A szolgáltatott adatok a Magyar Honvédség összesített felhasználási adatait tartalmazzák, technikailag nincs rá mód, hogy abból kizárólag a szárazföldi csapatok, vagy egy adott katonai objektum adatai önállóan megjeleníthetők legyenek. Ez számos esetben egyébként sem lenne releváns, mivel egy objektumban olykor többféle szervezet is elhelyezésre kerül. A szolnoki laktanyában pl. együtt állomásozik a szárazföldi és a légierő haderőnem egy-egy alakulata, míg Budapest helyőrségben a Honvédelmi Minisztérium telephelyein a minisztériumon és háttérintézményein kívül működnek MH alárendeltségbe tartozó alakulatok is.

Feltételeztem viszont, hogy a béke idejű villamosenergia-felhasználást tekintve nincs jelentős eltérés a szárazföldi csapatok, a légierő vagy akár minisztérium szervezetei között, így a Magyar Honvédség általánosságában megfogalmazott gondolatok igazak a szárazföldi csapatokra is.

²⁹ Data Collection, Analysis and Share.

A továbbiakban ezt, az [1. számú mellékletben](#) található adatsort tekintem kiindulási alapnak, amely összesen 118.000 hektárnyi honvédségi tulajdonú területen elhelyezkedő mintegy 1.700 létesítmény közel 14.500 épületét fedti le [40].

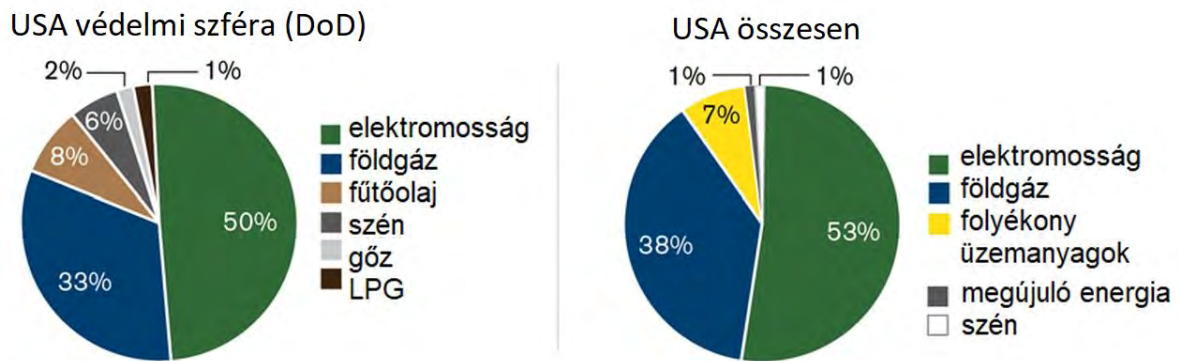


3. ábra: A Magyar Honvédség energiakosara *a 2016-2020 évek átlagát tekintve (saját szerkesztés az [1. melléklet alapján](#))

Ha az adatsort összevetjük a teljes hazai energia-felhasználási adatokkal [37] [41] [2], azonnal nyilvánvaló, hogy a védelmi szféra energiakosara kis eltéréssel megfelel az ország energiakosarának. Ennek legfőbb oka, hogy Magyarországon szinte valamennyi honvédségi tulajdonú objektum rendelkezik polgári közműcsatlakozással, így azok békeidőben, elsősorban gazdasági megfontolások alapján a polgári energetikai infrastruktúrát használják. Ez a villamos energia szempontjából annyit tesz, hogy a szárazföldi csapatok által használt katonai objektumok villamosenergia-igényét elsődlegesen a polgári távvezetékes hálózatról elégítik ki. Más országok haderejének energiakosara is nagyban hasonlít az adott országhoz, de a földrajzi vagy geopolitikai adottságok okozhatnak minimális eltérést. Példának okáért Görögországban számos apró sziget, vagy nehezen megközelíthető sziklás part található, ahol csak korlátozottan vagy sehogy sem érhető el polgári infrastruktúra, ugyanakkor a területnek van katonai jelentősége. Törökország például 2022 májusában 16 olyan görög szigetet jelölt meg, ahol szerintük olyan görög katonai jelenlét található, amely nemzetközi egyezményeket sért [42]. Ezeken a területeken többségében nincs kiépített civil energetikai infrastruktúra, így az ott üzemelő katonai eszközök energia-ellátását sziget³⁰ üzemben kell megvalósítani, pl. a

³⁰ Az országos vagy területi energetikai hálózattól független működési mód.

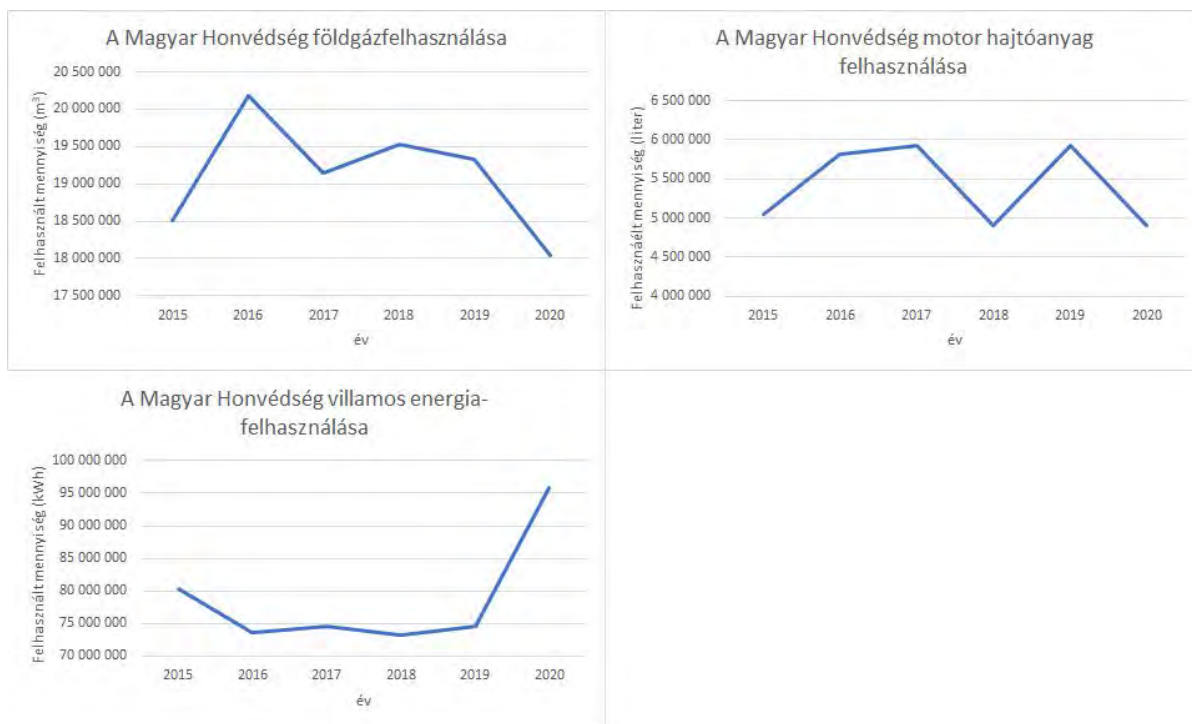
vezetékes áramszolgáltatás hiányában nagy mennyiségű fosszilis üzemanyag helyszínrre szállításával és aggregátorok üzemeltetésével kell megoldani.



4. ábra: Az USA és haderejének 2020. évi energiakiosara (saját szerkesztés a [2] és [43] nyomán)

Az is közismert, hogy mivel a védelmi szféra általában nem folytat termelőtevékenységet, (ez alól a Magyar Honvédség sem kivétel) a földgáz felhasználása nagyon hasonló a lakossági felhasználáshoz. Csaknem kizárólag a fűtéshez, melegvíz előállításához és főzéshez szükséges, amelyen belül az eltüzelt mennyiség tekintetében domináns a fűtés. A fűtéshez használt energia-mennyiség rendkívüli módon függ az adott időszak környezeti hőmérsékletétől. Mivel a vizsgált időszakban a Magyar Honvédség által fűtött légköbméter számottevő mértékben nem változott, az időjárás magyarázza a földgáz felhasználásának ingadozását. A motor hajtóanyag felhasználásának mértéke erősen függhet az adott időszakban végrehajtott szállítási feladatoktól, leginkább a gyakorlatoktól.

Valószínűleg a villamos energia felhasználása függ a legkevésbé az időszakos hatásoktól, így ott viszonylag kis eltéréseket kellene tapasztalnunk. Ennek ellentmond a 2020. év kiugróan magas értéke, amelyre nem találtam magyarázatot. Sajnos a 2021. év adatainak hiányában azt sem lehet eldönteni, hogy ez egy trendben bekövetkezett változás, vagy csak egy általam nem ismert esemény vagy történés hatása.



5. ábra: A Magyar Honvédség főbb energiaforrásainak fogyasztási változása 2015-2020 (saját szerkesztés az [1. számú melléklet](#) alapján)

1.2. A villamos energia költségvetési hatása

Az Amerikai Egyesült Államok hadereje az ország teljes energia-felhasználásának több, mint 1 %-áért felelős [44]. Bár más államok esetében ez az adat kevésbé hozzáférhető, Nagy-Britannia esetében például a széndioxid emisszió, egyébként hasonlóan 1 %-os mértékéből lehet következtetni [45], hogy a védelmi szféra energia felhasználásának aránya nemcsak a haderő létszámának és technikai fejlettségének függvénye, de miután a szállítás fogyasztja talán a legtöbb energiát, az nagyban függ az ország földrajzi adottságaitól és főként regionális vagy globális nagyhatalmak esetében azok ambíciószintjétől³¹ is.

Amennyiben az üzemanyagfogyasztást vizsgáljuk a teljes magyarországi üzemanyag töltőállomás-forgalomhoz viszonyítva [46] a Magyar Honvédség felhasználása a vizsgált 2015-2020 időszakban 0,9 és 1,2 ‰ között alakult. Ugyanez az arány a földgáz [47] tekintetében 1,7 – 1,9 ‰. Míg a Magyarországon elfogyasztott villamos energia tekintetében [48] 1,9 – 2,5 ‰-ért felelős a Magyar Honvédség. Az üzemanyagok esetében az összehasonlítást némileg torzítja, hogy csak a közúti járműállományt tudtam figyelembe venni, a legnagyobb fajlagos fogyasztású eszközök, vagyis a repülőgépek fogyasztását,

³¹ A haderő mekkora részét hajlandó az adott állam külföldön bevetni/állomásoztatni.

továbbá a külföldön szolgálatot teljesítő csapatok fogyasztását nem tartalmazzák az adatok, de ezzel együtt is kijelenthető, hogy Magyarországon a teljes energia-felhasználás alig 0,2 %-a írható a védelmi szféra számlájára. Ez a mérték lényegesen kevesebb, mint a világ legnagyobb hadseregéé, de tökéletesen arányban van Magyarország ambíciósintjével.

Alighanem az is fontos energetikai tétel, hogy a Magyar Honvédség a deklarált 1000 fős ambíció-szintjének megfelelően folyamatosan a dolgozat írásakor kb. 900 főt állomásoztat külföldön a különféle NATO, ENSZ, EU és koalíciós missziókban [49], ami az aktív létszám 3-4 %-a, tehát jelentősnek mondható.

A Magyar Honvédség költségvetésén belül is jelentős tétel az energia. A 2015. évre vonatkozóan végeztem becslést³² erre vonatkozólag, és azt az eredményt kaptam, hogy csak a közműszolgáltatóktól és üzemanyagellátóktól vásárolt energia, a maga 6,6 milliárdos költségével [50] a tárca teljes 260 milliárdos büdzsájének mintegy 2,5 %-a. Ha ehhez hozzávonnánk a repülőgépek fogyasztását és a külföldön szolgálatot teljesítők energiaköltségeit, valószínűleg jóval nagyobb arányt kapnánk. Abban az évben csak a hazai honvédségi tulajdonú ingatlanok villamos energia számolja meghaladta a 3 milliárd forintot, tehát csak ez a tétel a teljes honvédelmi büdzsé több, mint 1 %-a volt³³ [50]. Ugyanebben az évben a USA DoD 12,9-14,1 milliárd dollárt³⁴ költött energiára [51] [43], ami a teljes 560,4 milliárdos büdzsé 2,3-2,5 %-a.

Ha figyelembe vesszük, hogy a Magyar Honvédség költségvetéséből az általunk csak részben ismert energiaköltségek is 3,5 %-ot tesznek ki, megállapítható, hogy a Magyar Honvédség arányaiban jóval többet költ energiára, mint az USA hadereje. Tovább árnyalja a képet, ha azt is figyelembe vesszük, hogy az USA DoD a beszerzett és felhasznált energiahordozók több, mint a felét külföldön vásárolta [51], miközben a teljes haderejének csak mintegy 13 %-a állomásozik külföldön [52].

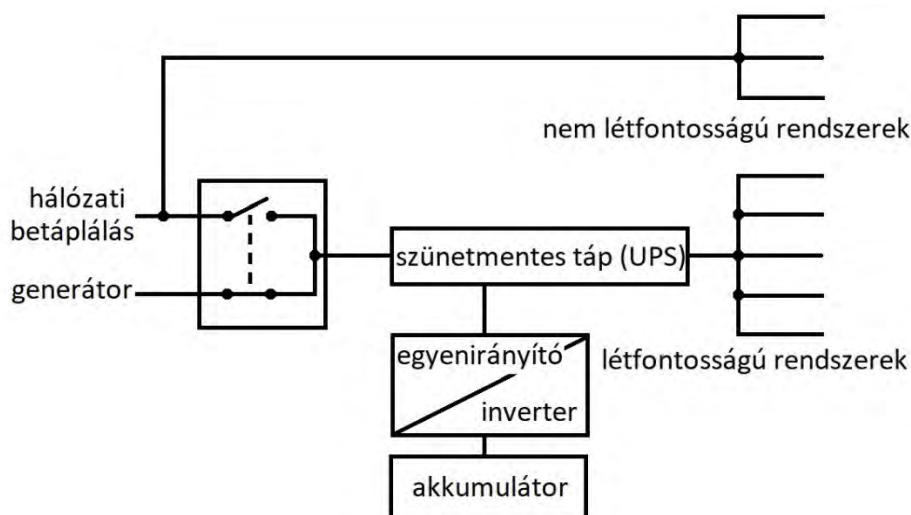
³² A közüzemi szerződések részleteinek hiányában a lakossági díjszabást vettem figyelembe, így alulról közelítettem a tényleges összeget.

³³ Ezek a számok még a 2022-ben meglőduló energiaárak előtti állapotot tükrözik, a 2022-es költségvetésben valószínűleg szignifikánsan nagyobb arányt képvisel majd az energia.

³⁴ Az USA DoD egyedülálló módon minden évben kiad egy jelentést a felhasznált energiáról. A 2015. évre vonatkozólag az az évi jelentés 12,9 milliárd USD, míg a 2020-as jelentés ugyanerre az évre 14,1 milliárd USD kiadást ad meg.

1.3. A szárazföldi csapatok béke idejű³⁵ villamosenergia-felhasználásának sajátosságai és az energia-hatékonyság

Amint az korábban is említésre került, Magyarország geopolitikai adottságai miatt valamennyi katonai objektum csatlakoztatva van az országos villamosenergia távvezeték-rendszerre, nincsenek villamos szempontból stacioner sziget-üzemű területek, vagyis az országhatárokon belüli villamosenergia-fogyasztás csaknem teljes egészében rezsiköltséggént jelentkezik. Egyes kiemelt létesítmények, vezetési pontok, légiirányítás, állandó (stacioner) infokommunikációs hálózat csomópontjai rendelkeznek szünetmentes áramellátással, de ezek csak áramszünet idejére kapcsolnak be. Az áramszolgáltatás kiesésének idejére egy akkumulátor-csoport látja el a fogyasztókat, de ha az áramszünet tartós, akkor még akkumulátorok teljes lemerülése előtt elindítanak egy készenlétben álló, üzemanyaggal feltöltött aggregátort. Ugyanakkor a békeidőben megszokott és elvárt szolgáltatás-biztonságot feltételezve a szünetmentes áramellátásban használt aggregátorok teljes éves fogyasztása is jelentéktelennek tekinthető.



6. ábra: Generátorral ellátott létesítmény áramellátásnak egy lehetséges megoldása (saját szerkesztés)

A fenti néhány példától eltekintve szinte kizárólag a katonai gyakorlatokon kerül sor a rendszeresített áramfejlesztők működtetésére, viszont az itt felhasznált mennyiség nem meghatározható, mert bár az adott gyakorlatokon dokumentálják az üzemanyag felhasználást, de azt nem tartják nyilván, hogy az adott mennyiség mekkora része került a harc- és gépjárművekbe és mekkora része az aggregátorokba. Az is egyfajta sajátosság, hogy mivel a

³⁵ A továbbiakban csak béke időszakként fogom említeni azt az időszakot, amikor nincs érvényben a Magyarország Alaptörvényének 48. cikke szerinti különleges jogrend.

gyakorlótereken is elérhető a vezetékes villamos energia, így költségvetési okokból a tábori elhelyezéssel járó gyakorlatokon sincsenek üzemeltetve áramfejlesztők, kivéve, ha a hálózatról elérhető kapacitás nem elégséges. Ilyenkor viszont jellemzően külső szolgáltatótól bérelnek aggregátorokat, így azok költsége igénybe vett szolgáltatásként és nem villamos energia rezsiszámlaként vagy felhasznált üzemanyagként jelentkezik a gyakorlat költségeinél.

Miután a Magyar Honvédség a költségvetési szféra egyik legnagyobb energiafelhasználója, így védelemgazdasági szempontból igen nagy a jelentősége, hogy mennyit fizet ki energiahordozókra. Minden forint, amit rezsire fizet ki a haderő³⁶, csökkenti azt az összeget, amit a haditechnika fejlesztésére vagy a katonák járandóságaira fordíthat. Az energiafelhasználás csökkentésének kézenfekvő módja, hogyha csökkentjük a felhasználásért felelős tevékenységet, ami nyilvánvalóan nem lehetséges, sőt, a Honvédelmi és Haderőfejlesztési Program egyik deklarált célja a személyi állomány létszámának és felkészültségi szintjének emelése, amiből ez utóbbi csak az energiaigényes gyakorlatokon keresztül valósítható meg. Marad tehát az energia-hatékonyság javítása, vagyis az adott tevékenységek olyan módon történő végrehajtása, ami a kitűzött célokat teljes egészében megvalósítja, de kevesebb energia felhasználása mellett. Másként kifejezve, csökkenteni kell az egyes részfeladatok és tevékenységek fajlagos energiaigényét. A béke idejű energia-hatékonyság növelése többes célt szolgál. Egyrészt a kisebb energiaszámla azonnali (védelem)gazdasági haszonnal jár, másrészt mivel Magyarország nettó energiaimportőr,³⁷ így a megtakarított (fel nem használt) energia natív módon növeli az energiabiztonságot. Harmadrészt a megtakarított energia nem okoz környezeti terhelést sem, vagyis hozzájárul a nemzeti környezetvédelmi és klímacélok megvalósításához. A Magyar Honvédség béke idejű energia-gazdálkodásának összefoglaló céljai:

- csökkenteni az energia jellegű rezszi kiadásokat;
- növelni az energiabiztonságot;
- csökkenteni az emissziót és az egyéb káros környezeti hatásokat.

Persze ebben önmagában nincs semmi különleges, hiszen valamennyi költségvetési szervnél éppen ugyanezen a célok érdekében fontos az energia-hatékonyság növelése. Azért tartom mégis fontosnak ezt hangsúlyozni, mert az értekezésemben részleteiben is feldolgozni

³⁶ A rezsiköltségeket nem az egyes alakulatok fizetik önállóan, azokat a HM VGH aggregáltan kezeli

³⁷ Magyarország a primer energiahordozók többségét, kb. 85 %-át külföldről vásárolja, de villamos energia terén is behozatalra szorul [2]

kívánt terepi villamos energetikának is fontos eleme az energia-hatékonyság, de egészen más cél által vezérelve.

Feltételezve, hogy a Magyar Honvédség szárazföldi csapatai béke időszakban a villamosenergia-gazdálkodást tekintve nem különböznek lényegesen a költségvetési szféra bármelyik hasonló méretű szervezeti elemétől, e tevékenységük elsődleges célja a civil villamos infrastruktúrából vett felhasználás mérséklése olyan módon, hogy az a működést ne befolyásolja negatívan. E tekintetben az alábbi lehetőségeket találtam alkalmazhatónak:

- Az épületvillamosság, illetve a mindennapi működés érdekében használt villamos működtetésű berendezések korszerűsítése, felújítása vagy cseréje;
- A civil villamos távvezetékrendszertől független saját tulajdonú villamosenergia-termelő létesítmények üzembe helyezése és működtetése;
- A mindennapokban a nem kellően energiatudatos viselkedés ellen adminisztratív rendszabályok hozása és betartatása.

1.3.1. A villamos berendezések fogyasztásának csökkentése

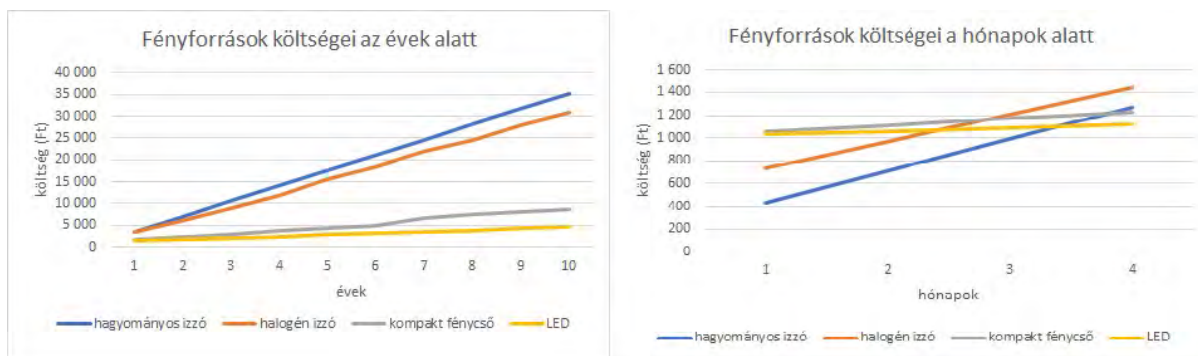
Az épületgépészet legnagyobb villamos fogyasztói a felvonók, a fűtés és klímarendszer villamos segédberendezései (esetleg bizonyos esetekben a villamos fűtés) és természetesen a világítás. A felvonók és a klímarendszer korszerűsítése igen költséges, előre tervezni szükséges lépés, amely taglalása túlnyúlik jelen értekezés keretein, de a fényforrások korszerűbbre történő cseréje viszonylag szerény költséget és gyors megtérülést jelent.

fényforrás típusa	villamos teljesítmény	fényáram	élettartam	ár ³⁸	1 éves (kb. 500 óra)	
					energia	ár ³⁹
hagyományos izzó	75 W	840 lm	1 000 óra	150 Ft	38 kWh	3 375 Ft
halogén izzó	63 W	820 lm	2 000 óra	500 Ft	32 kWh	2 835 Ft
kompakt fénycső	15 W	800 lm	6 000 óra	1 000 Ft	8 kWh	675 Ft
LED	8 W	850 lm	25 000 óra	1 000 Ft	4 kWh	360 Ft

4. táblázat: Különféle fényforrások éves költsége (saját szerkesztés az [53] alapján)

³⁸ Kiskereskedelmi forgalomban kapható E27-es foglalatba illeszkedő fényforrás

³⁹ 2022. év végi nem lakossági díjszabás szerinti 90 Ft/kWh-ával számolva.



7. ábra: Különbféle fényforrások akkumulált költségei (saját szerkesztés az [53] alapján)

Megállapítható, hogy egy hagyományos izzólámpa korszerűbb fényforrásra történő cseréje, a jelenlegi villamosenergia-árak mellett már a második hónapban megtérül. Ha nem csak a fényforrást, hanem a teljes lámpabúrát cserélni szükséges, akkor ez a megtérülési idő megnő, de valószínűleg így is csak hónapokban mérhető.

Jelentős villamos fogyasztónak tekinthetők még a klímaberendezések és általában a fűtő-hűtő, például konyhatechnikai készülékek. Ezek esetében részletes számítás nélkül elég annyit látni, hogy a pl. hűtőgépek esetében a „G” osztályú készülékek 2,5-3-szor annyi energiát igényelnek, mint az „A” osztályba tartozók, míg a klímaberendezések esetében a hasonló jelentésű EER⁴⁰ és COP⁴¹ mutatók esetében szintén hasonló eltérés tapasztalható a legjobb hatékonyságú és a kevésbé korszerű berendezések között [54].

1.3.2. A Magyar Honvédség saját tulajdonú stacioner villamosenergia-előállító képessége

A honvédelmi tárcánál a béke időszaki energia-hatékonysági tevékenység leginkább a HM Védelemgazdasági Hivatal munkájában testesül meg. Ez a szervezet kezeli és fizeti a honvédségi tulajdonú ingatlanok rezsiköltségeit és ennél a hivatalnál működik az ingatlanfejlesztésekkel foglalkozó szervezeti elem is. Az új építésű épületekre vonatkozó energia-hatékonysági követelmények betartásán túl a felújítások során is hangsúlyosan kezelik ezt a kérdést.

Ebben a pontban nem tárgyalom a kiemelt fontosságú objektumok szünetmentes áramellátási rendszeréhez tartozó aggregátorokat, mivel azokat jelen kontextusban nem tekintem saját energia előállító képességnek, ugyanis ezek teljesítménye az adott helyszínen

⁴⁰ Energy Efficiency Ratio – Energia-hatékonysági arány: a hűtőteljesítmény és az előállításhoz szükséges villamos teljesítmény hányadosa.

⁴¹ Coefficient of Performance – Fajlagos fűtőteljesítmény: mint az EER, csak fűtésnél számítva

üzemelő különleges, általában infokommunikációs eszközökhöz igazított, így rendkívül kicsi. Másrészt az üzemeltetésük még időszakosnak sem nevezhető, hiszen akár évek is eltelhetnek úgy, hogy nem kell őket beindítani. Fentiek okán rendszertechnikai szempontból inkább szükség- vagy kiegészítő áramforrásnak tekinthetők.

Csupán megjegyzem, hogy egyes, jellemzően nagyobb kiterjedésű országokhoz tartozó hadseregek üzemeltetnek sziget rendszerben nagyobb teljesítményű fix aggregátorokat is, amelyek rendszer-technikailag kiserőműként is értelmezhetők. Egyes flotta támaszpontokon még a vízenergia hasznosításával is folynak kísérletek [55], illetve szintén az ország adottságainak megfelelően használhatnak geotermikus energiát is. Ezek ugyanakkor még ritkaságszámba mennek és magyarországi viszonylatban nincs is relevanciájuk.

Nem jelent közvetlen energia-hatékonyságot, ugyanakkor hatását tekintve szintén elősegíti a költségcsökkentést és a klímasemlegességet a megújuló energiaforrások felhasználása. Jelen értekezés vonatkozásában is érdekes és nemzetközi összehasonlításban is büszkeségre okot adó tevékenység a honvédségi tulajdonú naperőművek létesítése. Az elmúlt 10 évben tucatnyi laktanyában létesült pályázati forrásból naperőmű, amelyek együttes kapacitása már meghaladja az 1,5 MW-ot.

A naperőművek egy része visszatermel a hálózatba, de egy részük technikai okok miatt nem képes erre. Ha a nem visszatermelő erőmű által egy pillanatban biztosított teljesítmény meghaladja az létesítmény saját fogyasztását, akkor a különbözet kárba vész, míg a visszatermelő típusnál a plusz teljesítményt felveszik a hálózat más, külső fogyasztói és azt később a létesítmény, mikor a saját termelése nem elégséges a belső igények kielégítésére, a hálózatból elszámolás alapján visszaveheti. Összességében a Magyar Honvédség által termelt villamos energia 2016-ban 572 MWh, míg 2020-ban már több, mint 1 GWh volt, ami a teljes felhasználás 1 %-a, figyelembe véve a naperőmű kapacitás bővülését, a 2022-es termelés valószínűleg már közel lehet a 2 GWh-hoz.

év	érintett katonai objektumok száma	névleges teljesítmény
2013	8	480 kWp
2018	14	402 kWp
2021	4	550 kWp
2022	3	96 kWp
2023 ⁴²	4	280 kWp
összesen	33	1808 kWp

5. táblázat: A Magyar Honvédség által 2013-2022 között üzembe helyezett napelemes rendszerek száma és teljesítménye (saját szerkesztés a HM VGH által szolgáltatott adatok alapján)



8. ábra: A balatonakarattyai Honvéd Üdülő 2021-ben átadott napelemei (Horváth Péter Zoltán felvétele)

A Védelemgazdasági Hivataltól kapott információk alapján a 2023-ban átadásra tervezett kapacitáson felül újabb beruházások előkészítése is folyik, és amennyiben a pályázati források továbbra is elérhetőek lesznek, akkor tovább folytatódik a naperőművek telepítése.

1.3.3. Adminisztratív energiagazdálkodási szabályok alkalmazása

A béke idejű energia-hatékonyság fokozása a védelmi szférában olyan fontos európai cél, amely mellett általában nem mehetünk el szó nélkül. Azt nehéz egzakt módon mérni, hogy mekkora megtakarítás érhető el adminisztratív szabályzással és/vagy az energiatudatos magatartás fokozásával, mindezzel együtt sok szervezet fűz ehhez komoly reményeket a

⁴² Kivitelezés alatt.

védelmi szférán belül is. Az ilyen jellegű energia megtakarítás érdekében külön képzés is folyik az EDA égisze alatt, amely során logisztikus beosztású tisztek kaphatnak 10 hónapos felkészítést. A Defence Energy Management Course (DEMC) tevékenysége 2019 után a Covid-járvány következtében megtorpant [56], de jelenleg is tervezik a folytatást. A korábbi években végzett hallgatók visszajelzései alapján a DEMC projekt-vezetője a fűtés terén 5-10 %, a villamos energia terén akár ezt meghaladó megtakarítást remél [57]. Hasonló képzések már szinte valamennyi korszerű haderőben folynak, az USA haditengerészete pl. évek óta folyamatosan indítja az ilyen irányú egy éves (Defense Energy Certificate) [58] posztgraduális képzését.

1.4. A Magyar Honvédség energiapolitikáját meghatározó dokumentumok

A Magyar Honvédségnek – bár személyesen 2015 óta minden lehetséges fórumon hangsúlyozom ennek fontosságát – jelenleg nincsen energiasztratégiája, és sem a Magyar Honvédségnek, sem a Honvédelmi Minisztériumnak nincs olyan szervezeti eleme, amely tárca szinten foglalkozna a kérdéssel. A fejlettebb államok haderőiben jellemzően a védelmi minisztériumban vagy önálló szervezetként, vagy legalábbis önálló tevékenységként létezik ez a központi irányító szerv, és egyebek mellett összeállítja a tárca (vagy haderőnem) energiasztratégiáját, vagy önálló formában, mint Franciaország esetében [59], vagy a klímasztratégia részeként, mint az Egyesült Államok hadserege esetében [60]. Magyarország helyzete az irányítás ilyen szempontú hiánya azért nem túl szerencsés, mert az egyébként a különböző honvédelmi szervezeteknél meglévő energia-hatékonysági vagy klímavédelmi törekvéseket nem fogja össze egy egységes tevékenységgé, így sikeres próbálkozások nem képesek elterjedni vagy felesleges redundanciák képződnek. Azt is megemlítem, hogy egy ilyen dokumentum pusztán létezése is pozitív üzenetet közvetít a társadalom felé.

Léteznek ugyanakkor olyan dokumentumok, amelyek tájékoztató pontként szolgálhatnak. Elsősorban kell említeni a Nemzeti Energiasztratégiát [61], amelynek első, 2030-ig szóló változatát még 2012-ben dolgozta ki a Nemzeti Fejlesztési Minisztérium, míg legutolsó, 2040-es kitekintéssel bővített változata 2020-ban íródott az Innovációs és Technológiai Minisztériumnál. Ez egy stratégiához képest szokatlanul bő, csaknem 100 oldalas dokumentum igen részletesen kifejti az energetikai tárgyú nemzeti törekvéseket, így iránymutatással szolgálhat a Magyar Honvédség részére is. Ehhez tartozik a csaknem 300 oldalas Nemzeti Energia- és Klímaterv is [62], amely tartalmazza azokat az Európai Unió

direktívákat, amelyeknek való megfelelés része a magyar uniós politikának. E fenti két dokumentumból kiolvasható egyebek mellett a megújuló energiaforrásokra, elsősorban napenergiára épülő villamos kapacitások bővítésének általános célja és a karbonlábnyom csökkentése, ami egy általános és közismert cél, de említésre kerül a European Defence Found (EDF), mint a kimondottan katonai célú projektek lehetséges finanszírozási forrása.

Igen előremutató Magyarország Nemzeti Biztonsági Stratégiája [63], amelynek 2020-as kiadása a korábbiaknál sokkal hangsúlyosabban tárgyalja az energiabiztonság kérdését, sőt még a 2021-ben kiadott és mindössze 16 oldalas Nemzeti Katonai Stratégia [64] is több helyen említ az energiával kapcsolatos feltörekvő technológiákat, úgymint energia-tárolást, alternatív energiaforrásokat (5.1) és irányított energiájú fegyvereket (a 21. század műveleti környezete), mint a közeli jövő katonai szempontból meghatározó tényezőit.

Amennyiben eltekintünk azoktól az EU-s irányelvektől és direktíváktól, amelyek a Nemzeti Energiastratégiát ihlették, vannak a nemzetközi térben további olyan dokumentumok, amelyeket mindenképpen figyelembe kell(ene) venni a Magyar Honvédség energiával kapcsolatos céljainak és konkrét tevékenységeinek meghatározásakor. Ezek közül messze a legfontosabb a NATO 2014-ben elindított Green Defence Framework⁴³-je, amely 2021-re Climate Change and Security Action Plan⁴⁴-ben csúcsonodott ki. A klímavédelem (annak összes energetikai aspektusával együtt) 2021-re annyira fontos témává vált a NATO-n belül, hogy egyes, elsősorban európai szakértők már jószerivel a klímaváltozást tekintették a NATO legfőbb ellenségének [65]. E tekintetben a 2022-ben kitört orosz-ukrán háború nyomán azután ismét „helyükre” kerültek a dolgok és a klímavédelem kissé háttérbe szorult a NATO napi cselekvési listáján, amit nagyon jól mutat a 2022-es madridi NATO-csúcs után kiadott nyilatkozat, ahol a háborús helyzetre való tekintettel már igen kevés szó esik az energiáról, ott is csak az energiaválság és energiabiztonság kontextusban [66].

Mindenesetre a klíma megváltozása jelen állás szerint már nem elkerülhető [67], annak lefolyásáról és mértékéről lehet vitatkozni csupán, de a hatásaival mindenképpen szembe kell nézzünk. E tekintetben a honvédelemnek nem csak a klíma változásának lassítását célzó teendői vannak, de a katonai műveletek végrehajtása során, azon belül az energia-ellátás biztosítása során is kiemelt fontosságú tényezővé válik a klíma, mivel az radikális hatással van a katonai infrastruktúrára és a logisztikára, így az alapvető hatásain túl még egy tényezőként keresztül befolyásolja a katonai alakulatok képességeit. Mindemellett a klímaváltozással

⁴³ Zöld Védelmi Keretrendszer.

⁴⁴ Klímaváltozás és Biztonsági Akcióterv.

kapcsolatosan megszorodó természeti katasztrófák, illetve az azzal összefüggésbe hozható modernkori népvándorlás is új feladatokat adnak a haderőnek [67].

Nem tartozik a kötelezően figyelembe veendő dokumentumok közé, de mindenképpen érdemes megemlíteni az EDA már korábban említett OSRA projektjét, amelynek célja az egyes CapTech-ek tevékenységi köréhez tartozó kulcsfontosságú technológiák összegyűjtése, osztályozása és résztechnológiákra bontása a későbbi implementálás érdekében. Az EDA égisze alatt működő E&E CapTech az OSRA-ban 10 olyan ún. technológiai építőkockát jelölt meg, amelyek a továbbiakban a témához kapcsolódó kutatás-fejlesztési projektek fókuszát jelentik majd. Ezek a következők [68]:

- Alternatív üzemanyagok és meghajtási rendszerek;
- Energia-tárolás (elektromos, elektromechanikus, mechanikus, strukturális és hő);
- Hatékony energia-disztribúciós technológiák;
- Innovatív energia-menedzsment;
- Napenergia hasznosítása (termikus és elektromos egyaránt);
- Víz és szennyvízkezelési technikák katonai implementációja;
- Csatolt energia-termelés;
- Szélenergia;
- Energetikai és környezetvédelmi technológiák integrációja;
- Hulladékkezelési technikák katonai implementációja.

Azt figyelembe kell venni, hogy az EDA a tagországok egyedi befizetéseinél nagyobb támogatást kap az Európai Uniótól, amely viszont az utóbbi időszakig a nem kimondottan katonai technológiák fejlesztését támogatta, hanem elsősorban az emissziós célok érdekében végzett technológia-transzfert a védelmi szférába, illetve „dual use”, azaz civil és katonai kettő felhasználású technológiákat. Viszont az elsősorban környezetvédelmi témáktól eltekintve a többi olyan irány, amelynek a kimondottan terepi alkalmazása is lehetséges, sőt kívánatos, illetve ezek mindegyikének igen hangsúlyosak a villamosenergetikai összefüggései.

Az orosz-ukrán háború kapcsán várható egy erőteljes súlypont eltolódás a ténylegesen katonai technológiák irányába, de igazából ennek csírái már a 2018-ban elindult PESCO⁴⁵ projektekből megjelentek, majd a 2021-es évben elindult EDF már több kimondottan katonai

⁴⁵ Permanent Structural Cooperation – Állandó Strukturális Együttműködése. Lényegében a majdani EDF inkubátor kezdeményezése.

(terepi) jellegű és villamosenergetikai projektet is tartalmaz. Ezek közül a francia vezetésű, és egy energiatfüggetlen telepíthető tábori infrastruktúrát (Energy Independent Deployable Camp) létrehozni szándékozó PESCO-EOF⁴⁶ projektben Magyarország is részt vesz, megelőző beosztásomban itt én képviseltem a Magyar Honvédség érdekeit.

1.5. Összegzés

Ebben a fejezetben bemutattam Magyarország és a Magyar Honvédség energiakosarát. Áttekintettem a védelemgazdaság energiapiaci szerepét és hatását, a béke idejében folytatott (villamos) energiagazdálkodási tevékenységet, valamint azokat a szabályozókat, amelyek e tevékenység céljait meghatározzák.

Megállapítottam, hogy a honvédelmi szervezetek energiakosara minden esetben kellően reprezentatív módon leképezi az adott ország energiakosarát, de béke idején nyilvánvalóan nem a védelmi érdekek határozzák meg az energiamix összetételét, hanem az ország gazdasági érdekei szabják meg a védelmi tevékenység energetikai tevékenységének határait. Ugyanakkor a meglévő struktúrán belül a védelmi szféra egy igen komoly energiapiaci szereplő, a védelemgazdasági tevékenységnek komoly hatása van az adott ország energiapiacára.

Megállapítottam továbbá, hogy a Magyar Honvédség villamos energia felhasználása mindössze a teljes energia-felhasználás 16,11 %-a vizsgált 2016-2020 időszak átlagát tekintve (az [1. számú melléklet](#) alapján), de ez tökéletesen megfelel a magyarországi villamosenergia-felhasználás 14,97 %-os nemzeti arányának a teljes primer felhasználásban. Ehhez képest az mind az USA, mind az USA haderő esetében 50 % körüli a villamos energia részaránya, de ez a szekunder energia, vagyis átlagosan 40 %-os erőművi hatásfokot feltételezve is legfeljebb csak 20 % körüli értékről beszélhetünk. Miután világviszonylatban a primer energiahordozók 30-40 %-át használjuk villamos energia előállítására, azt találtam, hogy a teljes energiakosáron belüli villamos energia részarányát tekintve a teljes energiamixben nem sokban maradunk el az USA-tól.

A makroadatokat elemezve megállapítottam továbbá, hogy a vizsgált 2016-2020-as időszak vonatkozásában a védelmi szektor teljes energiatfelhasználása alig változott, de míg az üzemanyagok és a földgáz, illetve az üzemanyagokon belül az egyes típusok részaránya elég nagy szórást mutat, addig a főbb hordozókon belül az utolsó, 2020-as évet kivéve, a

⁴⁶ Energy Operational Function.

villamosság aránya viszonylag állandónak volt tekinthető. Tehát a jelenlegi viszonyok között az energiakosár többi szereplőjéhez képest a villamosság kevésbé szezonális, az arra alkalmazott trendszámítások az éghajlati vagy koalíciós tevékenységekből származó anomáliákat kevésbé tartalmazzák, így leginkább ez alkalmas a haderő fejlettségének megjelenítésére.

Megállapítottam, hogy az energia pusztá biztosításán kívül a védelmi szférában a béke idejű energiagazdálkodás célja az energia-hatékonyság növelése. Ennek a nemzetgazdaság szempontjából hármas hatása van:

- csökkenti az energia jellegű rezsi kiadásokat;
- növeli az energiabiztonságot;
- csökkenti az emissziót és az egyéb káros környezeti hatásokat.

Megállapítottam, hogy a Magyar Honvédség szárazföldi csapatai béke időszakban a villamosenergia-gazdálkodást tekintve nem különböznek lényegesen a költségvetési szféra bármelyik hasonló méretű szervezeti elemétől, e tevékenységük elsődleges célja a civil villamos infrastruktúrából vett felhasználás mérséklése olyan módon, hogy az a működést ne befolyásolja negatívan. E tekintetben az alábbi lehetőségeket találtam alkalmazhatónak:

- Az épületvillamosság, illetve a mindennapi működés érdekében használt villamos működtetésű berendezések korszerűsítése, felújítása vagy cseréje;
- A civil villamos távvezetékrendszertől független saját tulajdonú villamosenergia-termelő létesítmények üzembe helyezése és működtetése;
- A mindennapokban a nem kellően energiatudatos viselkedés ellen adminisztratív rendszabályok hozása és betartatása.

Mindezekből az is következik, hogy a védelmi szféra béke idejű energia-hatékonysági lépései nem ágazat-specifikusak, hanem a nemzetgazdaság többi szereplőjével azonos technológián és módszereken alapulnak.

Ugyanakkor a szárazföldi csapatok műveleti tevékenysége is részben a béke idejű katonai infrastruktúra épül. A klasszikus mozgósítás esetén az állomány a béke kiképzési körletekbe vonul be, itt szerelik fel őket és innen indulnak a feladat végrehajtására kijelölt területre. A mozgósításhoz és a csapatok irányításához szükséges infokommunikációs rendszerek a korábban említettek szerint rendelkeznek a villamos hálózattól független energia-ellátással, de ebben az átmeneti időszakban a csapatok elhelyezése, ellátása és felszerelése (pl. a járművek üzemanyaggal történő feltöltése) továbbra is a béke infrastruktúrára épül.

Ennek értelmében fontos lenne, ha a béke idejű elhelyezési körletek rendelkeznének legalább a műveleti tevékenység megindításához szükséges kritikus fontosságú rendszerek üzemeltetéséhez szükséges önálló villamosenergia-ellátással. Ebben a kontextusban jelentősen megnő a katonai objektumokban üzemelő megújuló energiára épülő ellátási-rendszerek, Magyarországon jellemzően a napelemek jelentősége.

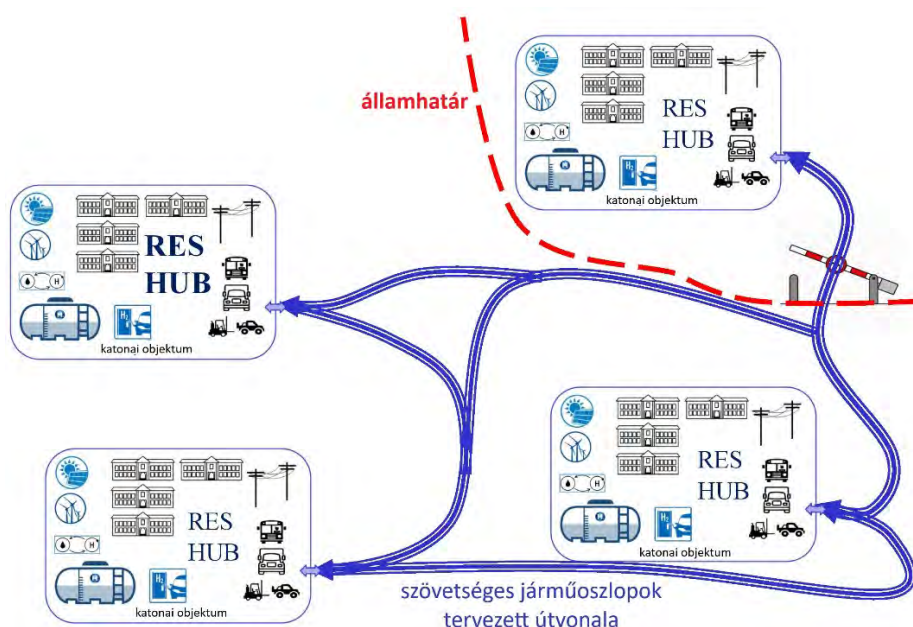
Ezek a kapacitások jelenleg csak az objektumok üzemeltetési költségeinek csökkentésében játszanak szerepet, de megfelelő tárolási kapacitás hozzáadásával bizonyos ideig villamosenergetikai szempontú autonómiát is képesek lennének biztosítani. Ennek jelenleg még igen nagyok a költségei, így a szárazföldi csapatok esetén, amelyek a műveleti tevékenység során jellemzően nem a saját elhelyezési körleteikben vannak, nem jellemző az ilyen rendszerek kialakítása. A légierő esetén más a helyzet, hiszen a repülőgépek üzemeltetéséhez szükséges infrastruktúra nem minden esetben telepíthető át, így sok esetben a bázis repülőterek szolgálnak a műveleti tevékenységek bázisául is. Természetesen ezt adott esetben az ellenség is tudja, de a harci gépek tevékenységének megakadályozására repülőtér direkt támadása jóval kockázatosabb, mintha csak a villamos hálózatot kellene kiiktatni. Ha ezt a műveleti előnyt összekötjük a béke idejű gazdasági előnyökkel, akkor már elgondolkodtató az adott objektum önálló villamosenergia-ellátási képességének kiépítése.



9. ábra: A Chania légibázis (Kréta, Görögország) autonóm működését biztosító naperőmű (saját felvétel)

Ezen a területen jelent egy új lehetőséget a RESHUB⁴⁷ projekt. A szlovén védelmi még minisztérium 2018-ban egy CF-SEDSS konferencián vetette fel projekt ötletét. Az elgondolás arra épül, hogy egyre több hibrid és tisztán villamos üzemű gépjármű kerül rendszeresítésre a közeli jövőben az európai haderőkben, és ezek töltésére a polgári hálózattól független katonai töltőpontokra lesz szükség. A töltésre használt energia elsősorban napelemekkel kerülne előállításra és hidrogén formájában tárolásra. Ugyanakkor a járművel töltéséhez zárolt mennyiségben felüli energia, felhasználásra kerülhetne a katonai objektum saját ellátására vagy akár a polgári hálózatba történő visszatáplálásra is.

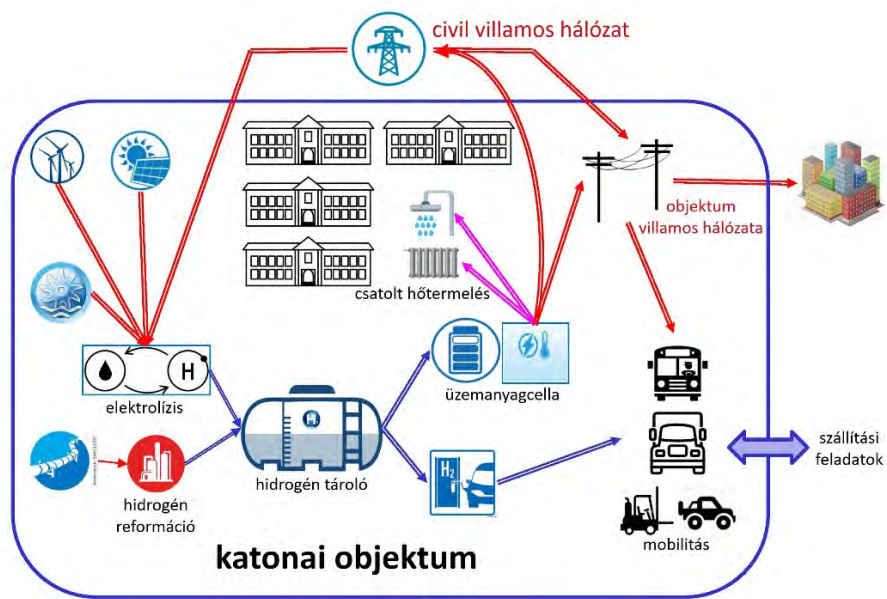
A kezdeményezéshez a vezető Szlovénián kívül csatlakozott Ausztria, Belgium, Németország, és személyem révén Magyarország is. Az öt állam az EDA adminisztratív támogatása mellett pályázatot nyújtott be az Európai Unió SRSP⁴⁸-jéhez és 310.000 eurót nyert a 2020-as évre. Ebből az összegből (a COVID pandémia miatt jelentős késéssel) elkészült 5 szlovén, illetve a többi ország tekintetében 1-1 helyszínrre vonatkozólag a megvalósíthatósági tanulmány. A tagországok jelenleg újabb uniós forrásra kívánnak pályázni, és az adott helyszíneken a hidrogénes tárolást és a csatlakozó infrastruktúrát egyfajta „pilot” projektként megvalósítani. A pilotprojekt sikere esetén és a további RESHUB-pontok kialakításakor Magyarország esetében jelentős előny lenne, a nagyszámú már jelenleg is üzemelő napelemes rendszer.



10. ábra: A RESHUB projekt koncepciója (Robert Sipeč, a Szlovén Védelmi Minisztérium ezredesének ábrája)

⁴⁷ Resilience Hub – “ellenálló képességi csomópont”

⁴⁸ Structural Reform Support Programme – európai Strukturális Reformokat Támogató Program



11. ábra: A RESHUB projekt egy objektumának energetikai vázlatja (Robert Sipeč, a Szlovén Védelmi Minisztérium ezredesének ábrája)

2. A szárazföldi csapatok terepi villamosenergia-ellátásának felépítése és alkalmazott eszközei

A szárazföldi csapatok műveleti területen történő tevékenységének az értekezés szempontjából lényeges jellemzője, hogy a laktanyáikat elhagyva, lakott területeken, vagy terepen, de mindenképpen a honos laktanya által nyújtott infrastruktúrát nélkülözve végzik feladatukat. Ez a villamos energia szempontjából (de általában az energia-ellátás szempontjából is) két igen fontos jellegzetességet hoz magával:

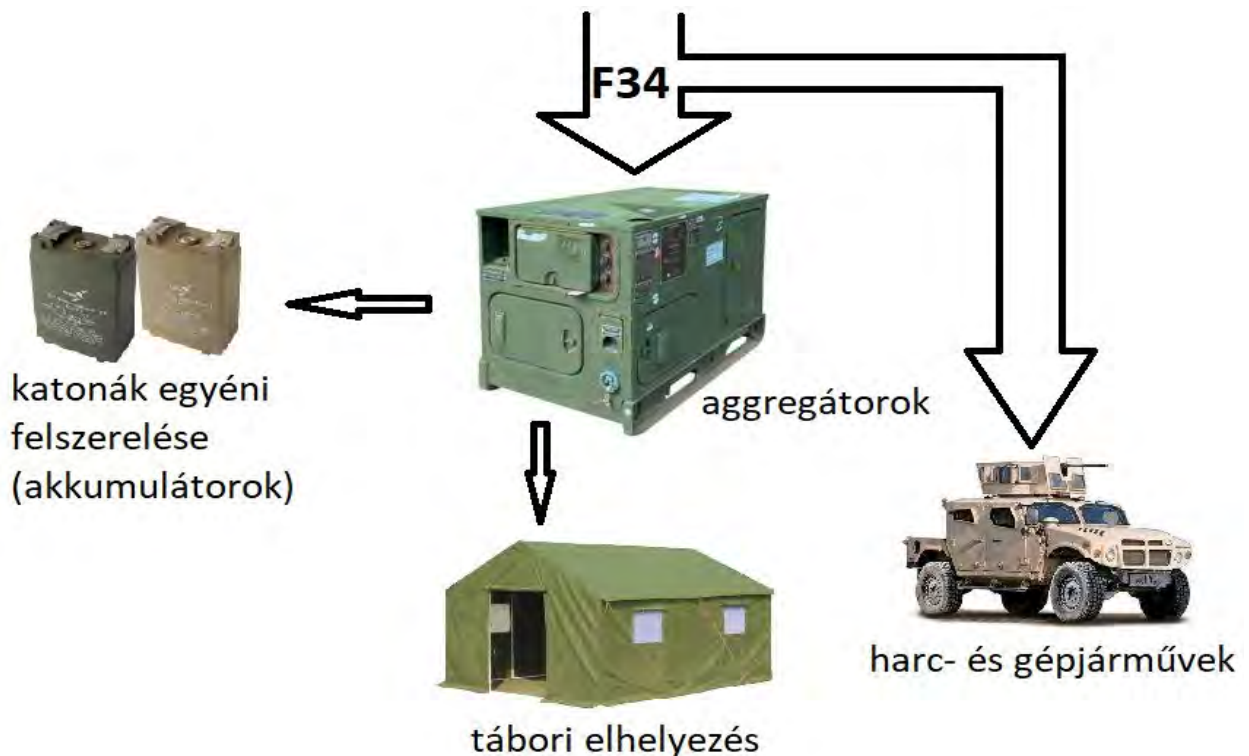
- Egyrészt a katonai szervezeteknek a működésükhöz szükséges villamos energiát saját maguknak kell előállítani, mivel a műveleti területen vagy egyáltalán nincs kiépítve villamos távvezeték, vagy ha mégis van, akkor az vagy már sérült, vagy nem tekinthető megbízhatónak;
- Másrészt a béke időszakban megszokott gazdasági-környezetvédelmi célkitűzéseket megelőzve a műveleti területen egészen mások lehetnek a villamosenergia-gazdálkodás céljai, prioritásai a művelet fajtájától függően:
 1. A parancsnok által elrendelt feladat végrehajtása;
 2. Saját erők kímélése;
 3. Civil lakosság kímélése, segítése;
 4. Infrastruktúra kímélése.

E fenti célkitűzések hangsúlyozottan nem negligálják a béke idejű energia-gazdálkodási törekvéseket, de adott esetben nagyobb prioritást kapnak. Példának okáért fegyveres konfliktus esetén a saját erők minimális veszteséggel történő kivonása egy veszélyzónából olyan cél, amely messze előtte van a klímacéloknak, és a villamosenergia-gazdálkodásnak is ezt a parancsnoki szándékot kell elősegítenie. Hasonlóképpen egy katasztrófa-elhárítási feladat végrehajtása közben sem lehet az energiatakarékosságot a zászlóra tűzve veszélyeztetni a polgári lakosság biztonságát.

Műveleti területen a civil villamos infrastruktúra nincs kiépítve, nem elégséges a kapacitása, sérült, vagy csak nem megbízható, tehát katonai művelet közben a szárazföldi csapatoknak maguknak kell a villamos energiát biztosítani. Erre jelenleg egyetlen általánosan alkalmazott eljárás létezik. Mivel a mobil eszközök közül kizárólag a belső égésű motorok⁴⁹ által meghajtott generátorok, vagyis az aggregátorok hatásfoka megfelelő, ezeket alkalmazzák

⁴⁹ Az esetek túlnyomó esetében dugattyús motor, ritkábban gázturbina.

a szükséges mennyiségben. A működtetésükhöz szükséges üzemanyagot a logisztikai erők szállítják a helyszínre. Ez önmagában nem jelent minőségileg új feladatot a logisztika számára, hiszen a harc- és gépjárművek üzemeltetéséhez szükséges üzemanyag biztosítása egyébként is az egyik legfontosabb feladata. Amennyiben az aggregátorok ugyanazt az üzemanyagot igénylik, mint a járművek, akkor ez pusztán mennyiségi kérdéssé redukálódik. A NATO-n belül kiküszöbölték ezt a problémát, így a jelenleg érvényes eljárásrend szerint műveleti területre a szárazföldi csapatok részére kizárólag egyfajta üzemanyagot az F-34 jelű kerozinfélét biztosítják [30]. Akár a tábori elhelyezést, akár a harc- és gépjárművek fedélzeti villamos berendezéseit, akár a katonák egyéni felszerelésének részét képező akkumulátorokat vizsgáljuk, minden terepi villamosságnak ez az alapja, hiszen az akkumulátorokat tábori körülmények között is tölteni kell.



12. ábra: A műveleti területen történő villamosenergia-ellátás vázlata (saját szerkesztés)

Az F-34 eredetileg egy repülőeszközök (jellemzően a szárazföldi haderőnem által is nagy számban használt helikopterek) részére kifejlesztett kerozin típus, amely megfelel a szárazföldi járművek és természetesen az aggregátorok dízelmotorjainak is. Ennek egyedülivé tétele a műveleti területen egy egészséges kompromisszum eredménye, hiszen a helikopterek számára némileg kedvezőbb lenne az F-44 jelű kerozin, míg a harcjárművek jellemzően az F-

54 jelű „hagyományos” gázolajat igényelnék⁵⁰ [30]. Ezt a kérdést az üzemanyag biztosítás biztonsága érdekében annyira komolyan veszik, hogy az eljárásrendnek saját rövidítése is van, az SFC⁵¹.

Ugyanakkor a villamos energia biztosítása során a szárazföldi csapatok továbbra is csak egy módon segíthetik a feladat végrehajtását, ha mérséklik az üzemanyag felhasználást, és így csökkentik a logisztikai támogatási rendszerre nehezedő nyomást. Ez nem csupán azért fontos, mert a ténylegesen harcoló katonák számát többszörösen is meghaladja a logisztikai támogató erők létszáma, hanem azért is, mert az ókor óta ismert, hogy a hadseregek Achilles-ina az utánpótlási vonal. Erre újra rá kellett döbbernünk a orosz-ukrán háború kapcsán is [69], de különösen igaz a napjainkra jellemző aszimmetrikus hadviselésre, ahol a gerilla harcmodort követő félnek esze ágában sincs a jól kiképzett, jól felszerelt és harca kész első vonalas katonákkal megküzdeni, ha ehelyett rajtaüthet a könnyű célpontot jelentő üzemanyag szállító járműoszlopokon [70].



13. ábra: Amerikai katonai üzemanyagszállító teherautó-oszlop Sahl Sinjar (Irak) közelében 2008. novemberében [71]

⁵⁰ Ebből máris megállapítható, hogy a Magyar Honvédség által nemrégiben nagy számban vásárolt Suzuki személygépkocsik nem csak a kétkerék-meghajtásból származó csekély terepjáróképesség hiányában nem alkalmasak a katonai műveletekben való alkalmazásra.

⁵¹ Single Fuel Concept – az egyetlen üzemanyag politikája.

A terepei villamosenergia-ellátás működésének átfogó megismerése érdekében azt önkényesen kisebb kategóriákra bontottam, mert a nagy egészen belül ezek olyan sajátosságokkal bírnak, amit érdemes külön is vizsgálni. Ezek a kategóriák:

- Katonák egyéni felszerelése;
- Harcjárművek;
- Tábori elhelyezés.

A továbbiakban minden felmerülő kérdést és problémát e három csoport mentén vizsgálom majd.

2.1. A generátorok

A bolygón megtermelt villamos energia, több mint 95 %-át a generátorok állítják elő [2]. Ezek a viszonylag egyszerű forgó gépek rendkívül jó, 90 % feletti hatásfokkal konvertálják a mechanikus (forgó) energiát villamos energiává [21]. Ha az erőművi termelést vizsgáljuk, a szél-erőművek direkt forgó mozgást közvetítenek a generátorok felé, míg a víz-erőművek a lezúduló vizet vezetik a generátorokkal közös tengelyen lévő turbinákra, az összes többi esetben (szén, olaj és gáztüzelésű hőerőmű, nukleáris erőmű) a hőenergiával előállított magas nyomású vízgőzt vezetik a generátorokkal közös tengelyen elhelyezkedő turbinákra. Egyedül a naperőművek azok, amelyek mechanikus mozgás nélkül állítanak elő említésre méltó mennyiségben villamos energiát [24].

A vezetékes villamos hálózattól távol szintén generátorok szolgáltatják a villamos energia túlnyomó részét, az áramfejlesztők, vagyis az aggregátorok tulajdonképpen motor-generátorok⁵². A harc- és gépjárművek fedélzeti villamos berendezéseit alapvetően az akkumulátorok látják el villamossággal, ám ezek újratöltés nélkül erre csak rövid ideig lennének képesek, ezért azokat menet közben folyamatosan töltik a dugattyús motor által forgatott generátorok.

Ennél a résznél fontos hangsúlyozni, hogy a magyar terminológia szerinti generátorok váltakozó áramot szolgáltatnak, amely közel másfél évszázada tökéletesen megfelel az igényeinknek. Ennek oka az, hogy a távvezetékes továbbítás veszteségét csak magas

⁵² Az angolszász irodalomban nem ismerik az aggregátor szót, csak generátorról beszélnek. Ha hangsúlyozni szeretnék, hogy nem csak a mechanikus energiát villamosságra konvertáló forgógépről, hanem egy belsőégésű motorral meghajtott generátorról van szó, akkor erre pl. a „diesel-generator” kifejezéssel utalnak. Gyakran használják az „AC generator” kifejezés helyett „alternator”-t, amely könnyen félreérthető, hiszen váltakozó áramú villamos forgógépet jelöl igazából.

feszültség alkalmazásával lehet csökkenteni. Csupán a közelmúltban jelentek meg a nagy egyenfeszültségű villamos távvezetékek⁵³, azelőtt kizárólag transzformátorokkal tudtunk nagy feszültségeket előállítani, márpedig a transzformátorok a nyugalmi indukció törvényeinek megfelelően csak váltakozó árammal működnek.

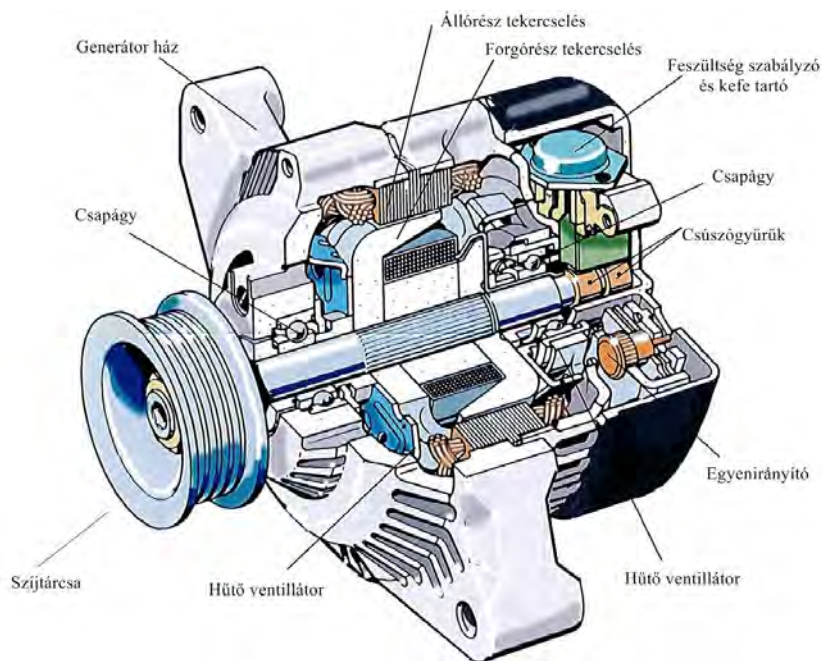
Léteznek egyenáramot szolgáltató villamos forgógépek is, a magyar terminológia szerinti dinamók⁵⁴. Ezek ugyanakkor felépítésükből adódóan olyan kopó alkatrészt is (szénkefe) tartalmaznak, ami miatt sokkal karbantartás-igényesebbek, mint váltakozó áramú társaik, ráadásul a hatásfokuk is gyengébb, jellemzően 90 % alatti [21]. A közúti járművek és a velük szoros rokonságban álló harcjárművek fedélzeti villamos rendszere egyenáramú, az elmúlt 50 évben mégsem alkalmaznak bennük dinamókat. A gépjárművek generátorai valóban generátorok, vagyis váltakozó áramot szolgáltatnak, de már a burkolaton belül egyenirányítják azt, mert a generátorok hatásfoka annyival jobb, hogy még ennek az AC-DC konverzióknak a veszteségét is ki tudják egyenlíteni, ráadásul az esetek többségében a motor teljes élettartamát leszolgálják említésre méltó karbantartás nélkül [72].

Jelen értekezés szempontjából nincs nagy jelentősége, de a kisebb generátorok, mint pl. a gépjárművek generátorainak többsége és a kisebb terepi áramfejlesztők állórésze általában egyetlen tekercset tartalmaz, vagyis ezek egyfázisú generátorok. Az erőművi és a távvezetékes technológiában a teljesítmény elosztása érdekében három⁵⁵ független tekercselést alkalmaznak, ezek a közismert háromfázisú rendszerek. A teljesítmény elosztásának érdekében a nagyobb teljesítményű terepi áramfejlesztők is három fázist alkalmaznak.

⁵³ HVDC – High Voltage Direct Current.

⁵⁴ Ez a kifejezés is ismeretlen az angolszász terminológiában, helyette a „DC generator” használatos.

⁵⁵ Elvben akárhány fázis létrehozható, de a gyakorlatban a három terjedt el.



14. ábra: Gépjárművekben alkalmazott egyszerű egyfázisú generátor felépítése [73]

2.1.1. A katonai aggregátorok története

A civil életben a villamosság elterjedését a világítás hozta el. Az embereket lenyűgözte, hogy mindenféle tüzelőanyag és nyílt láng felhasználása nélkül, egy kapcsolóval világosságot teremthettek az épületekben. A villanyvilágítás megjelent a védelmi szféra állandó létesítményeiben is, de a terepen a hadseregek egyáltalán nem igényelték ezt a fajta kényelmet. Az elemes működésű zseblámpák ekkor már széles körben elterjedtek, és természetesen a gép- és harcjárművek sem működhetek a fedélzeti villamosság nélkül, de az igazság, hogy a tábori világítás még a második világháborút követően is elsősorban a petróleumlámpára épült, mivel annak kiforrott logisztikája volt.

Az áramfejlesztőkre az elkerülhetetlen igényt a rádió-távközlés hozta el. A sérülékeny és drága, ráadásul helyhez kötött telefonálás után a rádió végre hosszú évszázadok után biztosította az azonnali és mobil kommunikáció lehetőségét a parancsnokok és alárendeltjeik között, illetve a különféle haderőnemek (pl. szárazföldi csapatok és a légierő) között. Ez olyan vezetési előnyt jelentett, hogy a rádió a két világháború között minden hadseregben rendkívül gyorsan terjedt. Viszont a rádiók kizárólag árammal működtek, így ebben az időben a katonai rádióberendezések és a hozzá tartozó áramfejlesztő berendezések technológiája együtt fejlődött [74].

A két világháború közötti időszak hadseregeinek általános jellemzője volt az alacsony gépesítettség. A meglévő járműipari kapacitással elsősorban a harckocsizó alakulatokat

szerelték fel. Bár itt a fedélzeti generátor biztosította a szükséges villamosságot, de a kezdeti rádiók mérete és tömege miatt igazából a második világháború kezdetén még a harckocsik többsége sem volt felszerelve rádióval, a harcjárművek irányítása a harctéren gyakorta még zászlójelekkel történt [75].

Eleinte a rádiók, nagy méretük és tömegük miatt csak a magasabb egységeknél kerültek rendszeresítésre, és akárcsak a felszerelés túlnyomó részét, ezeket is fogatolva szállították. Ezt követően a technológia fejlődésével a kisebb alakulatok, zászlóaljok, ezredek is kaptak rádiót, de egyedül az USA volt képes a háború végére miniatürizált elektroncsövekkel hátizsák méretű rádiók tömeggyártására, amivel már akár századok, sőt szakaszok is kaphattak önálló rádióösszeköttetést. Összességében elmondható, hogy a húszas évektől, a rádiók megjelenésétől kezdve egészen az ötvenes évek végéig, vagyis a kommunikációs komplexumok elterjedéséig, a legáltalánosabban használt rádiók fogatolva, ritkábban gépjárművel szállított, de mindenképp önálló berendezések voltak, amelyek minden mástól független, önálló áramforrással voltak felszerelve. Ez lehetett szárazelem is, de ez a fajta tápellátás csak rövid üzemidőt tett lehetővé, és a nagy tömegű telepekkel történő utánpótlás jelentős szállítókapacitást igényelt. Kezdetben gyakorta használtak pedálos áramfejlesztőket is, mert ehhez nem csak üzemanyag nem kellett, de alkalmazása azzal az előnnyel is járt, hogy nem igényelt járműipari kapacitást [74].



15. ábra: TM5 típusú 2. világháborús német pedál-generátor [74].

A járműipari kapacitás a későbbiekben is fontos maradt, mert azután az aggregátorokba épített kisebb űrtartalmú motorok lényegében megegyeztek azokkal, mint amiket az akkoriban a mainál sokkal szélesebb körben alkalmazott motorkerékpárokba is szereltek. A pedálos áramfejlesztők végül nem is azért tűntek el, mert a használatuk fárasztó volt a kezelők számára, egyszerűen a rádiók egy bizonyos teljesítményszintje felett már nem volt elégséges a fizikai erő a megfelelő teljesítményű generátor meghajtására [74]. Ugyanis egy ember átlagosan 100 W fizikai teljesítményre képes, miközben a rádiók akkoriban elég rossz hatásfokkal üzemeltek, jóval 1 % alatt. Tehát emberi táplálással maximum egy 1 W rádiófrekvenciás teljesítményre képes rádióadó volt üzemeltethető.

Az első rádióberendezésekhez mellékelt aggregátorok szinte minden esetben egy egyszerű hegesztett csőváza épültek, ami máig változatlan, mivel minimális tömeg mellett biztosítja a kellő mechanikai szilárdságot. Ez a második világháború idején különösen fontos szempont volt, mivel a rádióállomások, és természetesen az áramfejlesztők telepítése is kézi erővel történt. Az erőforrás akkoriban minden esetben léghűtéses benzinmotor volt, mert azok jóval egyszerűbbek és igénytelenebbek voltak a dízeleknél, noha a hatásfokuk gyengébb. Gyakori volt az alacsony rezonanciát eredményező fekvő henger-elrendezés (Boxer-motor), amely manapság már ritkaságszámba megy. Általános volt, hogy generátor helyett egy dinamót alkalmaztak, ugyanis a rádiók egyenáramot igényeltek, tehát ha generátort építenek be, akkor annak kimenetét még egyenirányítani kellett volna, és a korabeli kuprox és szelén egyenirányítók a mai félvezetőkkel szemben, igen nagy veszteséget okoztak volna, miközben méretük és tömegük is jelentős volt.



16. ábra: Amerikai General Electric 12-G és német Gleichstrom Erzeuger 400 typ B benzines aggregátorok a 2. világháborúból [74].

Ez manapság már elképzelhetetlen lenne, de az akkori igények és lehetőségek között nagyon is ésszerű választás volt. Mivel az elektroncsöves rádiók energia-felvételének 90%-át adó fűtés készenléti üzemben is működött, a rádió-berendezések lényegében csaknem konstans áramfelvételt jelentettek, így megfelelő áttételezés mellett nem volt jelentősége annak, hogy a generátorok szélesebb fordulatszám-tartományban képesek nagy hatékonysággal működni, mint a dinamók. Bár a kommutátor karbantartás igénye nagy volt, a korabeli gyártástechnológia mellett határozott előnyt jelentett az egyszerűbb tekercselés is. A fenti okok miatt egyébként jó ideig még a gépjárművekben is dinamót alkalmaztak és csak a 80-as évekre adták át teljesen a helyüket a generátoroknak [76].

A 2. világháborút követően már nem csak komplex mobil vezetési pontok jöttek létre, ahol számos rádió és egyéb elektronikus készülék üzemelt, hanem az igen nagy villamos igényű rádiólokátor berendezések is mobillá váltak. Ezzel együtt a harcok és harcjárművek frontján is lezajlott egy jelentős evolúciós folyamat, amelynek eredményeképpen a benzinmotorok szinte teljesen eltűntek a katonai járművekből [77]. A dízelmotorok nemcsak kevésbé voltak tűzveszélyesek, de a 36 % körüli energetikai hatásfokuk is meghaladta a benzinmotorok által nyújtott 24 % körüli értéket, így nagyobb hatótávolságot biztosított a páncélosoknak és egyéb járműveknek. Miután a katonai járműiparban ez az átállás bekövetkezett és egyidejűleg a tábori haditechnikai eszközök villamosenergia-igénye is megnőtt, logikus volt az áttérés az aggregátorok meghajtásánál is a dízelmotorok alkalmazására. Ezzel egyidejűleg akár csak a gépkocsiknál, itt is megnyílt az út a generátorok előtt is, mert a 40-es évektől megjelentek az elektroncsöves, majd a 60-as évek végétől a félvezetős diódák, amelyek csak minimális veszteséget okoztak az AC-DC konverzió során. Mivel a generátorok kisebbek, strapabíróbbak is, mint az ugyanolyan teljesítményű dinamók, azok a 80-as évekre néhány nagyon speciális alkalmazástól eltekintve teljesen eltűntek a villamos iparból.

A dinamók korszakának leköszöntére jellemző, hogy pl. a Magyar Néphadsereg még évtizedekig alkalmazott „Csonka” aggregátorokat a 2. világháború után (a Csonka-gépgyár 1950-től a rendszerváltásig Kismotor és Gépgyár néven működött), sőt még ma is felbukkan egy-egy példány a használtcikk börzéken, de teljesen eredeti példányt egyet sem találni, mert a szívós boxermotorok mellől a problémás dinamókat mindben lecserélték generátorra [74].



17. ábra: Szovjet gyártmányú ESD 50 kW-os dízelaggregátor vontatmány [78]

2.1.2. A katonai tábori aggregátorok jelene

Tehát a 80-as évekre kiteljesedett az a folyamat, ami máig is általános a terepi villamosenergia-ellátás terén. A csaknem egyedül használt villamosenergia-termelő eszköz a dízelmotorral hajtott generátor, vagyis az aggregátor. Ezek a 10 kW-os határig többnyire egyfázisúak, de e felett szinte mindig háromfázisúak. Mivel a fogyasztók a civil életben is használt eszközök, pl. világító berendezések, illetve a stacioner használatú katonai eszközök is a polgári villamos infrastruktúrához illeszkednek, az alkalmazott villamos paraméterekre és interfészekre vonatkozó előírások megegyeznek a nemzeti szabvánnyal. A Magyar Honvédség szárazföldi csapatai által alkalmazott aggregátorok minden esetben 50 Hz frekvenciájú 230/400 V feszültséget biztosítanak, az egyfázisú csatlakozáshoz legfeljebb 16 A-es „F” típusú aljzatot⁵⁶ kínálnak.

Bár az aggregátorok a rádiótechnikai eszközök tartozékaiként kerültek a hadseregek alkalmazásába, miután a hétköznapiakban is egyre több villamos berendezés lett az emberek életének része, azokat a katonák is szerették volna használni, akár terepi körülmények között is. Ennek az igénynek a kielégítésére és a meglévő dízelaggregátorokra alapozva létrehozták a tábori villamos hálózatokat. Ez már csak azért sem ördögtől való, mert bizonyított, hogy a katonák harckészültségére és moráljára a jó elhelyezési körülmények kedvezően hatnak [79].

⁵⁶ Gyakran említik „schukó”-nak is, a német „schutzkontakt”, vagyis védőérintkező alapján, amely megkülönbözteti pl. a francia „E” szabványú hüvelyes földcsatlakozástól.



18. ábra: Előkészített tábori villamos hálózat részlete a CL15 nemzetközi logisztikai gyakorlaton Várpalotán (saját fotó). A konténertől balra található a sárga dízelaggregátor (jelen esetben egy civil típus), tőle jobbra a (zöld) villamos elosztó szekrény. Bal oldalt az előtérben látható az ún. „bálvány”, ahová a fogyasztókat lehet csatlakoztatni

A folyamat vége, hogy sokkal egyszerűbb a sok kisebb teljesítményű és lokális fogyasztókat kiszolgáló aggregátor telepítése és üzemeltetése helyett egyetlen nagy, akár 2-300 kW-os vontatott vagy önjáró (esetleg konténeres kialakítású) aggregátort telepíteni, és ahhoz egy tábori villamos elosztó hálózatot kiépíteni. Ez számos előnnyel jár, hiszen a nagyobb aggregátoroknak általában jobb a hatásfoka [21], illetve a több fogyasztó statisztikusan is jobb terheléseloszlást jelent, ami további jótékony hatással van a fogyasztásra, illetve az aggregátor élettartamára. Lényegesen gyorsabb a kiépítés, hiszen nem kell a kisebb aggregátorokat mozgatni, elég egy targonca a nagy aggregátor helyére emeléséhez, illetve önjáró vagy vontatmány kivitelnél még ez sem szükséges. Az elosztó hálózat eszközei többnyire kézzel is telepíthetőek. Az is előnyös, hogy az üzemanyag-ellátást csak egyetlen helyen kell biztosítani, és a folyamatos üzemeltetéshez is kevesebb szakemberre van szükség. Ugyanakkor a nagy és drága aggregátorokból csak ritkán képeznek melegtartalékot, ezért, ha nincs szünetmentes ellátás, akkor a logisztikának nincs manőverezési lehetősége, így egyetlen meghibásodás vagy célzott támadás, szabotázs a teljes települt katonai alakulatra súlyos csapást mérhet.

A disztribúciónak nagy a strukturális jelentősége, de az energetikai mérleg szempontjából minimális a szerepe. Amennyiben a villamos energiát néhány 100 métert meghaladó távolságra kell eljuttatni, akkor a törpe vagy alacsony feszültségű (12-400 V-os) szakaszokon már jelentős az energiaveszteség. A kiépített villamos hálózatok esetén ilyenkor kézenfekvő megoldás lenne a feszültség növelése, de az ehhez szükséges berendezések (és a szükséges

villamosenergetikai ismeretek) nincsenek meg a tábori felszerelések között, így ilyen esetekben a lehetőségek függvényében inkább egy másik aggregátort helyeznek üzembe.

2.1.3. Gép- és harcjárművek generátorai

A gép- és harcjárművek generátorai működési elvüket tekintve teljesen azonosak az aggregátorokban alkalmazottakkal. Az egyenáramú generátorok (dinamók) alkalmazása a múlt század 80-as éveire teljesen kikopott a gépjárműtechnikából, de speciális alkalmazásokban még előfordul. A T-72A harckocsi esetében például a generátor ugyanaz a villamos forgógép, ami egyben az indítómotor szerepét is betölti, amire jellegéből adódóan csak egyenáramú forgógép alkalmas. Napjainkban a jobb hatásfok érdekében a katonai gépjárművekben és a harcjárművekben is váltóáramú generátorokat alkalmaznak. A létrehozott váltakozó áramot ezután egyenirányítják, mert a fedélzeti villamos eszközök álló helyzeti energia-ellátásához és nem mellékesen a motor indításához szükséges villamos energia csak egyenáramú formában, akkumulátorokban tárolható. A generátor az egyszerűség okán így nem is közvetlenül látja el a fogyasztókat, hanem ún. puffer-üzemben, az akkumulátor(ok)on keresztül.

Ennek az architektúrának megfelelően a harcjárművek és a katonai gépjárművek valamennyi fedélzeti villamos berendezését úgy alakítják ki, hogy az alkalmas legyen a jellemzően 24 V-os egyenáramú táplálásról történő üzemeltetésre, mert így nem szükséges külön energiahálózat kiépítése, elég csupán arra ügyelni, hogy a generátor és az akkumulátor méretezése megfelelő legyen. Ennek az egészen a közelmúltig általános szabálynak némileg ellentmondanak a Honvédelmi és Haderőfejlesztési Program keretében beszerzett korszerű eszközök. Mind a Gidrán, mind a Lynx, mind az A7-es Leopard2 esetében a korábbinál nagyobb számú és bonyolultabb elektronikus rendszerek okán a működésbiztonságot szem előtt tartva részben vagy egészben elkülönítették a fegyverzet/torony akkumulátorokat a harcjármű hajtásláncának működtetésében is részt vevő akkumulátoroktól. Ugyanakkor ezek töltéséről továbbra is a fedélzeti generátor gondoskodik.

Új elem a 2010-es évektől, hogy egyre több olyan jelentős villamos fogyasztást jelentő eszköz jelenik meg a harcjárművek fedélzeti berendezései között, amelyek üzemeltetésére álló helyzetben is szükség van. Ilyenkor nyilvánvalóan nem lehet sokáig a fedélzeti akkumulátorokra támaszkodni, de a főhajtómű üzemeltetése sem tűnik célszerűnek annak jelentős tüzelőanyag-fogyasztása, illetve a szintén jelentős hang- és hőhatás miatt sem. Így az új magyar eszközöknél (pl. Gidrán, Leopard 2A7, Pzh2000, Lynx) vagy a jelentős

korszerűsítésen áteső eszközöknél (külföldön a Challenger Mk3, az M1A2 Abrams SEP3⁵⁷) minden esetben beépítésre került egy a fő tüzelőanyagtartályról üzemelő kisméretű, így kedvező fogyasztású segédaggregátor is⁵⁸. Ezek technológiai értelemben nem képviselnek újdonságot, csak strukturálisan jelentenek egy további rendszert ezekben az egyébként is komplex eszközökben.



19. ábra: A Leopard 2A7 páncéltestének jobb hátsó részén található egy kis teljesítményű Steyr dízelaggregátor (ilyen nem volt még az A6-ban sem), míg a Gidránon külső függesztményként került elhelyezésre a Kubota APU (saját felvételek)

2.1.4. A katonák személyi felszerelésének villamosenergia-ellátása

Napjainkban a „gyalogos” katonák is nagy és növekvő számú villamos berendezést visznek magukkal a műveleti területen, és ezek ellátására szinte kizárólag akkumulátorokat alkalmaznak. Az akkumulátorok töltésére ugyan léteznek kisméretű, hordozható aggregátorok, de ezek katonai alkalmazása marginális. Jellemzően ott lenne rájuk szükség, ahol az adott katonai egységnek hosszabb ideig kell autonóm módon ténykednie. Tipikusan ilyenek a különleges erők, de az árulkodó hang és hőhatás, illetve az üzemanyag-ellátási nehézségek miatt inkább tartalék akkumulátorokat málháznak, még akkor is, ha ez jelentős tömegnövekedést eredményez.

Jelenleg az ilyen katonai egységeknél három napos autonóm, vagyis utánpótlás nélküli alkalmazás képessége az elvárt, mert még egy jó fizikumú és felkészített katona teherbírása is

⁵⁷ System Enhancement Program – Élettartam Kiterjesztő Program. Magyar értelemben egy ipari nagyjavítás során elvégzett korszerűsítés.

⁵⁸ Angolszász irodalomban „APU”, azaz Auxiliary Power Unit.

limitált. A málhában ilyenkor három napra a következőket kell magával vinnie minden embernek:

- Öltözet, ruházati kiegészítők (hátizsák, málhamellény, hálósák);
- Élelmiszer, víz (vagy víztisztító készlet) és kapcsolódó eszközök;
- Egyéni fegyverzet, lőszer;
- Ballisztikai védelem (mellény, sisak), esetleg ABV védelem;
- Kommunikációs, navigációs és informatikai eszközök (taktikai rádió, GPS);
- Egyéb eszközök (távcső, elsősegély felszerelés stb.);
- Nem egyéni (kollektív) felszerelések és eszközök.

Ezek tömege a katonai alakulattól és a végrehajtandó feladattól függően 30-50 kg között változhat [80], így a további növekedés már a harcképesség radikális mértékű romlását vonná maga után. Ennek az így sem csekély tömegnek, megint csak feladattól függően, akár a 20-40 %-a is akkumulátor lehet [81], így a katonák felszerelésének korszerűsítése során ezért kiemelt fejlesztési feladat ezek energia-sűrűségének növelése.

2.2. Akkumulátorok

A villamos energia műveleti területen történő biztosítása szempontjából mindenképpen külön pontot érdemelnek az akkumulátorok. Ezek előfordulnak tábori berendezések, jellemzően infokommunikációs eszközök szünetmentes energiaellátó rendszereiben is, de igazán kiemelt a szerepük a harc- és gépjárművek, illetve a katonák személyi felszerelésének villamos ellátása szempontjából. Akkumulátorok nélkül elképzelhetetlen a korszerű haditechnika harctéri mobilitásának biztosítása.

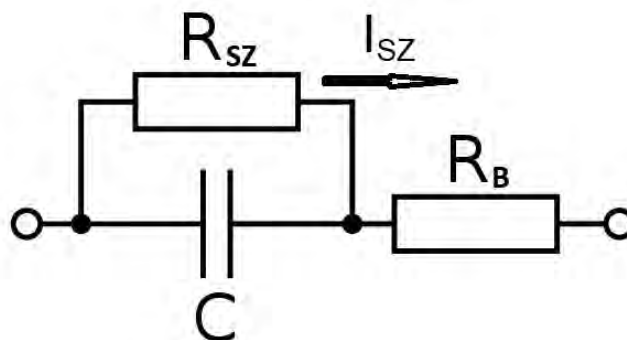
2.2.1. Az akkumulátorok működése, jellemzői

A közhiedelemmel ellentétben az akkumulátorok nem villamos, hanem vegyi energiát tárolnak. Feltöltéskor az akkumulátort alkotó vegyi anyagok kémiai szerkezete átalakul, magasabb energiájú anyagok jönnek létre. Kisütéskor a leadott villamos teljesítménnyel arányos mértékben visszaalakulnak az eredeti kémiai elemek. A viszonylag elterjedt szárazelemektől eltérően az akkumulátorok esetében ez a kémiai folyamat reverzibilis, azaz a

töltés-kisütés ciklus többször is megismételhető, erre utal az angolszász „secondary battery” kifejezés is⁵⁹.

Az alkalmazott kémiai anyagok meghatározzák az elemi cella feszültségét és az egységnyi tömegben vagy térfogatban eltárolható energia mennyiségét, az energia-sűrűséget. Hasonlóképpen meghatározható mind a tömeg, mind a térfogat relációjában a teljesítménysűrűség, vagyis az egységnyi tömegből/térfogatból kinyerhető maximális teljesítmény, amely szintén részben anyagi jellemző. Magát a kémiai/elektromos energia-átalakulást a belső ellenállással reprezentálhatjuk (R_B). Ezt kell leküzdeni mind a töltő, mind a kisütő áramnak. Minél nagyobb árammal töltjük, vagy sütjük ki az akkumulátort, a veszteség négyzetes arányban nő, amely hődisszipáció formájában jelentkezik [17].

Az akkumulátorok jellemzője, hogy használat nélkül maguktól is kisülnek, azaz lemerülnek. Ennek az ún. önkisülésnek a mértékét a szivárgási ellenállással (R_{SZ}) lehet reprezentálni. Amennyiben ez nagy, az önkisülés csekély. További fontos tulajdonsága a kémiai energia-tárolásnak, hogy sem a feltöltéskor, sem a kisütéskor végbemenő kémiai átalakulások nem tökéletesek, azaz az alkotóelemek egy része mássá alakul, mint kívánatos. Ezzel a továbbiakban átalakítható anyagok mennyisége csökken, azaz az akkumulátor kapacitása (C) csökken. Amennyiben egy akkumulátor tényleges kapacitása a névleges érték 80 %-a alá esik, azt általános szabály szerint a továbbiakban üzemképtelennek tekintjük. Az eddig eltelt töltési/kisütési ciklusok száma az akkumulátor élettartama [17].



20. ábra: A modellben egy kémiai folyamatoktól mentes energiatároló kapacitás (C) egy ideális akkumulátort reprezentál. A valós működés során fellépő veszteségeket két fix ellenállással vettem figyelembe (a valóságban ezek is sok minden, pl. a hőmérséklet függvényében változnak - saját szerkesztés)

Az akkumulátorok működését meghatározó kémiai reakciók az alkalmazott anyagoktól függően eltérő mértékben, de minden esetben erősen függenek a hőmérséklettől, amelyet a

⁵⁹ Az angolban az elektrokémiai cellákat általában battery-nek, a nem újratölthetőket (a magyar terminológiában elemek) primary battery-nek nevezik. Ha hangsúlyozni kívánják az újratölthetőséget, akkor használják a secondary battery vagy rechargeable battery kifejezést.

belső ellenállás változásával jellemezhetünk. Alacsony hőmérsékleten a kémiai anyagok kevésbé reakcióképesek, az ezt reprezentáló nagyobb belső ellenállás okán megnő a veszteség, vagyis az akkumulátor csak kisebb árammal tölthető (azaz tovább tart a töltés) és a teljesítmény-sűrűség is csökken. Bizonyos hőmérséklet alatt sem a töltés, sem a kisütés nem lehetséges. Hidegben az energia-sűrűség is csökken, és előfordulhat, hogy adott hőmérsékleten az akkumulátorból egyáltalán nem nyerhető ki energia, de ha felmelegítjük ismét működőképessé válik [17].

2.2.2. Az alkalmazott akkumulátorok típusai

Bizonyos rendkívül kis fogyasztású eszközöknél (pl. vöröspontos irányzék) alkalmaznak egyszer használatos alkáli elemeket is, de a villamos működésű mobil katonai eszközök túlnyomó többsége akkumulátorról üzemel. A gépjárműtechnikában még általánosan alkalmazzák a jó 100 éve változatlan formában jelen lévő, 2 V elemi cellafeszültségű ólomsavas akkumulátorokat [17]. Ezeknek csekély mind az energia, mind a teljesítmény-sűrűsége, és viszonylag érzékenyek a hőmérséklet változására is. Ugyanakkor olcsóak, rendkívül érzéketlenek a mechanikus igénybevételre és a rendszertelen terhelésre/töltésre, valamint a teljes felújításuk is olcsón megoldható.

Az ezredfordulón használatos és egyébként a leginkább környezetkárosító Nikkel-Cadmium (NiCd) és Nikkel fémhidrid (NiMH) akkumulátorok a személyi használatú eszközökben voltak használatosak, de mára szinte teljesen eltűntek. Energia-sűrűségük jobb volt az ólomsavas akkumulátoroknál, de szinte minden más szempontból rosszabbak voltak azoknál. Rendkívül gondosan kellett velük bánni, hogy ne alakuljon ki az ún. memória-effektus, vagyis az, hogy a nem teljesen feltöltött akkumulátor a kisütés után, már nem volt feltölthető a névleges kapacitásra, csak arra, amin a kisütés előtt volt [17].

A kisebb mobil eszközökben mára egyeduralkodó a lítiumos technológia. A lítium-ion (Li-ion), illetve az attól csak minimálisan eltérő lítium-polimer (LiPO) akkumulátorok elemi cellafeszültsége 3,7 V. Energia-sűrűségük a legnagyobb a jelenleg kereskedelmi forgalomban elérhető akkumulátor technológiák közül. Kevésbé érzékenyek a memória-effektusra, de igen nagy a hőmérséklet-függőségük és érzékenyek a mechanikus behatásokra is [18]. Napjainkban terjednek a lítium ferfoszfát (LiFePO₄) akkumulátorok. Jól tűrik az extrém hőmérsékleti viszonyokat, nagyobb az élettartamuk és minden szempontból strapabíróbbak a lítium ionos technológiával, de kisebb az energia-sűrűségük. Bizonyos kültéri alkalmazásokban a lítium ferfoszfát technológiánál jobbnak ítélik, ha a lítium ionos

akkumulátorok hőmérsékletfüggését úgy kompenzálják, hogy azokat a saját energiájukkal fűtik [82].

Természetesen az elektromos energia kémiai formában tárolására alkalmas (ún. elektrokémiai) eszközöknek még számos típusa van, itt azonban csak azokkal foglalkozom, amelyek a katonai alkalmazás szempontjából relevánsak. Nem tárgyalom a méretük és tömegük miatt csak fix telepítésű ipari felhasználású technológiákat, illetve a még csak a fejlesztés különféle fázisaiban lévő eljárásokat.

anyag/technológia		energia-sűrűség		teljesítmény-sűrűség (W/kg)	hőmérséklet függőség	élettartam (ciklus)	önkisülés
		Wh/kg	Wh/l				
alkáli elemek		150	100	50	közepes	1	csekély
akkumulátor	ólomsavas	25	40	180	jelentős	1000	közepes
	nikkel-kadmium	100	150	180	jelentős	500	közepes
	nikkel fémhidrid	150	300	500	jelentős	800	közepes
	lítium-ion	250	650	250	jelentős	1500	közepes
	lítium polimer	250	700	250	jelentős	2000	közepes
	lítium ferfoszfát	150	250	500	közepes	3000	közepes
fosszilis	tűzifa	3.000	700	-	-	1	-
	fekete kőszén	6.500	9.000	-	-	1	-
	cseppfolyós földgáz	12.000	7.000	-	-	1	-
	benzin	12.000	9.500	-	-	1	-
	gázolaj	13.500	10.500	-	-	1	-
hidrogén		39.000	2.500	500*	csekély*	1	csekély*
urán 235-ös izotóp		$2,5 \cdot 10^{10}$	$4,7 \cdot 10^{12}$	-	-	1	-
szuperkondenzátor		15	250	15	csekély	100000	igen nagy

6. táblázat: Különböző anyagok és technológiák jellemző energetikai paraméterei (* PEM cellát alkalmazva, saját szerkesztés)

2.2.3. Szuperkondenzátorok

A szuperkondenzátor teljesen más elven működik, mint az akkumulátor, ugyanakkor jelenleg terjed a katonai alkalmazása, ahol elsősorban az akkumulátorok kiegészítőjeként használatos. Amíg az akkumulátorok a villamos energiát vegyi formában tárolják, addig a kondenzátorok magukat az elektromos töltéseket raktározzák, így sem a töltéskor, sem a kisütéskor nem kell vegyi folyamatoknak lejátszódnia. Ez a korábbi modell alapján úgy tekinthető, hogy a szuperkondenzátorok belső ellenállása elhanyagolható, az energia letárolása és felszabadítása is rendkívül gyorsan és minimális hőveszteséggel zajlik le [16, 11. o.]. További előny, míg az akkumulátorok energia- és teljesítmény-sűrűsége nagy hidegben extrém módon romlik, addig a vegyi folyamatok hiánya miatt a szuperkondenzátorok

működése alig függ a külső hőmérséklettől, ráadásul a kondenzátor (a pszeudo-kondenzátorok kivételével)⁶⁰ nem is degradálódik [83], így élettartama a gyakorlatban végtelen.

Sajnálatos módon a szuperkondenzátoroknak két jelentős hátránya is van. Bár a teljesítmény-sűrűségük százszorosa az akkumulátorokénak (100 kW/kg), addig az energia-sűrűségük (vagyis a kapacitásuk) mindössze azok ezredrésze (0,1-0,3 Wh/kg). Igen nagy probléma a jelentős szivárgási áram (önkisülés) is, ami okán a teljesen feltöltött szuperkondenzátor is órák, legjobb esetben napok alatt teljesen lemerül [20, 20. o.]. Ezen tulajdonságok miatt önállóan tartós energia-tárolásra teljesen alkalmatlan ez a technológia, de hasznos lehet, ahol impulzus-szerűen kell nagy villamos teljesítményt biztosítani (pl. lokátortechnika) vagy ahol az akkumulátorok hőmérsékletfüggése kritikus [84, 43. o.].

Ez utóbbira tipikus példa a belső égésű motorok hidegindítása. Nagy hidegben az egyébként teljesen feltöltött akkumulátorok teljesítmény-sűrűsége extrém módon leromlik, és a névleges indítóáramuknak csak töredékét képesek szolgáltatni, ami egy olyan jelentős tehetetlenséggel rendelkező motor esetén, mint amilyen a páncélozott eszközökben van, komoly probléma. Viszont, ha az akkumulátorral párhuzamosan szuperkapacitásokat is elhelyezünk, azok képesek lassan feltöltődni az akkumulátorok energiájából, majd azt gyorsan az indítómotorra továbbítani. Ez a megoldás igen hasznos, így az utóbbi években főleg a nehézgépjárművek esetében elkezdtek terjedni az olyan hibrid akkumulátorok, amelyek szuperkondenzátort is tartalmaznak. A technológiát alkalmazzák a haditechnikában is, a Leopard 2 harckocsicsalád motorindító áramkörében két nagy teljesítményű diszkrét szuperkondenzátor is helyet kapott az akkumulátorok mellett [85, 22. o.].

⁶⁰ A pszeudo-kondenzátorok már részben elektrokémiai eszközök, mert a kondenzátor fegyverzetein aktív redoxidációs folyamatok is zajlanak [20].

2.3. Az infokommunikáció

Amint az korábban említésre került, a rádiók révén az infokommunikáció hívta életre a terepi villamosság iránti igényt a szárazföldi csapatoknál és a mai napig az egyik legfontosabb felhasználási területe annak. Arról sehol semmilyen információt nem találtam, hogy a terepen előállított villamos energia mekkora részét használjuk fel az infokommunikációs eszközökben, ez nemzettől, haderőnemtől függően egyébként is igen nagy szórást mutathat, de jellemzően a korszerűbb haderők nagyobb mértékben használnak infokommunikációs eszközöket.

2.3.1. Információs műveletek

Szun-Ce óta ismert, hogy a hadviselésnek csupán egy része zajlik a kinetikus térben, egy jelentős része az ún. információs térben bonyolódik [8, 192. o.]. Az ellenség csata nélkül is legyőzhető, vagy mint a vietnami háború is bizonyítja, az egyik fél úgy is elveszíthet egy háborút, hogy közben lényegében minden ütközetet megnyert. A győzelem biztos receptje, ha uraljuk az információkat, az információs teret. Mi magunk minél több és pontosabb információval rendelkezünk:

- a saját csapatok elhelyezkedéséről, erejéről, moráljáról;
- az ellenséges csapatok elhelyezkedéséről, erejéről, moráljáról;
- a civilek elhelyezkedéséről, számáról, viselkedéséről;
- a várható időjárásról;
- a terület földrajzáról, infrastruktúrájáról;
- a geopolitikai helyzetről;
- stb.

Az ellenfél pedig kevés információval rendelkezzen, vagy ha mégis rendelkezésére áll információ, akkor az legyen pontatlan, esetleg az általunk közölt dezinformáció. Ha elértük ezt az információs fölényt, akkor azt könnyen vezetési fölényé alakíthatjuk, ami magában hordozza a műveleti fölényt, vagyis lényegében a győzelmet [86, 212. o.]. Tehát az információs fölény birtokában egy számbeli és a fegyverzet tekintetében is minőségi fölényben lévő ellenség ellen is kivívható a győzelem. Ha eltekintünk a háborútól, missziós tevékenység, katasztrófa- vagy válsághelyzet közepette is egyszerűbben, gyorsabban és kisebb erők bevonásával meg lehet oldani az elrendelt feladatot, ha uraljuk az információs teret és ezáltal pl. élvezzük a lakosság támogatását.

Ennek az információs fölénynek a kivívása érdekében zajlanak az úgynevezett információs műveletek, amelyek az alábbiak lehetnek [8, 183. o.]:

- pszichológiai műveletek (PSYOPS);
- megjelenés, viselkedés, arculat (PPP);
- műveleti biztonság (OPSEC);
- információbiztonság (INFOSEC);
- megtévesztés;
- elektronikai hadviselés (EW);
- fizikai pusztítás (amennyiben az információs eszköz ellen irányul);
- kulcsfontosságú vezetők kezelése (KLE);
- számítógép-hálózati műveletek (CNO);
- civil-katonai együttműködés (CIMIC).

Az elektronikai hadviselés egyértelmű módon a rádióspektrumban zajlik, míg a számítógépes műveletek az elektronikus berendezések által létrehozott kibertérben, amely jelentőségét mi sem bizonyítja jobban, minthogy 2016 óta a szárazföld, az óceán és a légtér után a NATO hivatalosan is önálló „domain”-nek azaz hadműveleti dimenzióknak tekinti azt [87, 5., 70. és 122. pont]⁶¹. Mindemellett a többi műveletnek is egy igen jelentős része elektronikus rendszerekhez kötődik, gondoljunk csak a PSYOPS-ra és a PPP-re, ami napjainkban leginkább az internetet és a közösségi médiát jelenti.

Szomorú aktualitást ad az értekezésnek, az orosz-ukrán háború. A teljesség igénye nélkül említtem meg a háború 2022 őszi időszakát, amikor a nyilvánvalóan minden téren gyengébben felszerelt (bár akkor még létszámfőlényben lévő) ukrán erők a 2022 február 24 óta Oroszország által megszállt ukrán területek mintegy 40 %-át foglalták vissza viszonylag csekély veszteségek mellett. Ez csakis úgy történhetett, hogy az ukrán erők pontosan ismerték a szembenálló csapatok helyzetét és erejét, amit egyébként nyilvánvalóan nem saját felderítési adataik, hanem elsősorban az USA műholdas megfigyelései alapján térképeztek fel [88].

A háború a fizikai tértől függetlenül is folyamatosan zajlott az információs térben, már jóval 2022 február 24-t megelőzően, sőt már jóval a Krím 2014-es megszállását megelőzően is. A „nyugat” szemszögéből nézve ezen a területen Ukrajna igen jól teljesít, a világnak ezen a felén a valós történéseknek jobbára csak az ukrán narratívája ismert, amihez természetesen az is hozzájárul, hogy az orosz internetes portálokat az amerikai tech-óriások mindvégig

⁶¹ A jelenleg kanonizált NATO doktrína 2019-ben a világűr domain-ként történő elismerésével vált teljessé.

hatékonyan blokkolták, de miközben a hazai, illetve az úgynevezett „globális dél” államainak⁶² közvéleményre koncentráló orosz vezetés ugyanezt tette a nyugati internetes médiával [89].

2.3.2. Az információs műveletek és az infokommunikáció összefüggései

Az információs fölényből adódó vezetési fölény azonban már nem csak a stratégiai és hadműveleti szinten jelenik meg, hanem a taktikai szinten is. A 2. világháború elején a német harckocsis csapatok sem mennyiségi, sem minőségi fölényben nem voltak a szovjet csapatokkal szemben. Az 1941 elején legkorszerűbbnek számító német Panzer IV-eshez képest a harckocsik klasszikus harcértékét megjelenítő tűzerő-védettség-mozgékonyosság hármast tekintve [77, 9. o.] a szovjet T-34 legalábbis egyenrangú ellenfélnek számított. Ennek ellenére ebben az időszakban a Wehrmacht lényegesen több szovjet harckocsit semmisített meg, mint amit pusztán az erőviszonyok indokoltak volna. Ennek a szovjet csapatok gyengébb kiképzettsége és a hibás alkalmazási koncepció mellett az is volt az oka, hogy a német harckocsik mind fel voltak szerelve rádióval, míg a szovjetek még legtöbbször a már említett zászlójelekkel próbálták a saját manővereiket koordinálni [75, 116. o.].

Annyi bizonyos, hogy jelenleg az információk tárolására, feldolgozására és továbbítására mára csaknem kizárólag elektronikus eszközök használatosak és maguk az információk is egyre nagyobb részben származnak elektronikus forrásból. A több információ megszerzése, tárolása és továbbítása ugyanakkor az információ mennyiségével együtt növeli a szükséges (villamos) energia mennyiségét is [90].

Az angolszász katonai terminológiában az infokommunikációt általában csak C4-nek rövidítik, ami a Command, Control, Communications and Computers-ből, azaz vezetés, irányítás, kommunikáció és számítógépekből adódik. Ez jól mutatja, hogy az egykor esetleg elkülönülő funkcionális elemek mára egyetlen egységes elektronikus és digitális rendszer elemeivé váltak.

2.3.3. Az infokommunikációs berendezések terepi villamos ellátása

A katonai infokommunikációs eszközök a polgáriakhoz hasonlóan lényegében mind villamos energia felhasználásával működnek. A félvezető alapú elektronikus eszközöknek a működési sebessége, valamint a tárolókapacitása más technológiára alapozva jelenleg meg

⁶² A „nyugati” média ezt a megnevezést használja a nem „nyugati” államokra, amiket a kétpólusú világrend idején előszeretettel hívtak „harmadik világ”-nak.

sem közelíthető. Az alkalmazott berendezések a feladatuk vagy az alkalmazás helye szerint rendkívül sokfélék lehetnek, de azok néhány ritka kivételtől eltekintve a félvezetős technika miatt, natív módon mind törpe egyenfeszültséget (6-48 V) igényelnek.

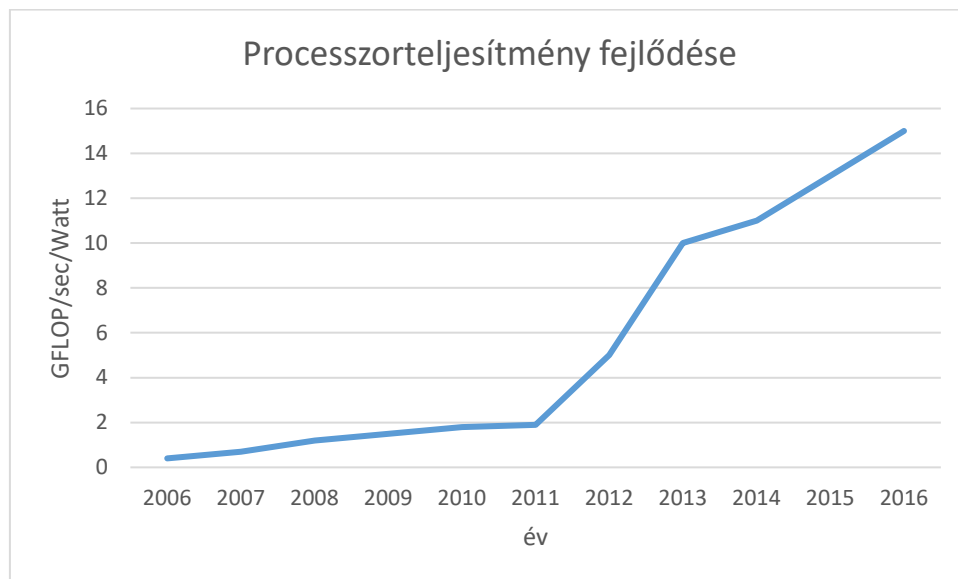
A személyi felszerelés részeként alkalmazott infokommunikációs eszközök jelenleg még jellemzően saját akkumulátorról üzemelnek, amelyek feszültsége az alkalmazott technológia függvényében az adott cellafeszültség egész számú többszöröse. A járműfedélzeti eszközök természetesen illeszkednek az adott jármű fedélzeti villamos rendszeréhez, ami a katonai (jellemzően nehéz) technikák esetében 24 V, ritkábban, személygépkocsik esetében 12 V. A különféle törpe egyenfeszültségek közötti konverzió a legkorszerűbb félvezetős szabályozó-áramkörökkel minimális, 10 % alatti veszteséggel megoldható [91].

A csak tábori elhelyezésben működő infokommunikációs eszközök táplálása az adott nemzet szabványosított kiefeszültségű hálózatának megfelelő váltakozó feszültséggel történik, amely Magyarországon 230 V, 50 Hz. Az alkalmazható (nem csak infokommunikációs) eszközök, berendezések kompatibilitása érdekében ez megegyezik a polgári infrastruktúra hálózati feszültségével. Természetesen ez direktben nem alkalmas az infokommunikációs berendezések működtetésére, csak egyenirányítás és feszültségcsökkentés után. Az ehhez szükséges tápegység néha be van építve a készülékbe (pl. asztali PC), néha külön adapter formájában (pl. laptop) mellékelik. Ezek vesztesége a régebbi, transzformátort és analóg elektronikát alkalmazó eszközöknél 5-10 %, a legkorszerűbb kapcsolóüzemű tápegységeknél mindössze 2-3 % [92].

A korszerű katonai eszközök, pl. a rádióberendezések többsége családellen fejlesztett, azaz bizonyos elemeik csereszabatosak a különféle alkalmazásokban. Ilyen például a Magyar Honvédségnél is alkalmazott Kongsberg rádió, amelynek személyi és járműfedélzeti változata ugyanazt az adóvevőt használja, csak a járműfedélzeti kiegészült egy nagyobb teljesítményű rádiófrekvenciás végfokozattal.

A nehéz meghatározni a félvezető eszközök hatékonyságát, de mivel mára csaknem minden esetben digitális működésű eszközökről beszélhetünk jó kiindulási alap lehet a processzorok által 1 Watt felhasználása mellett elvégzett elemi műveletek, ún. flop-ok száma. Ez néhány az elmúlt időszakban kibocsátott processzor adatlapja alapján tíz év alatt több, mint egy teljes nagyságrendet javult. Ugyanakkor az infokommunikációs eszközök fogyasztása ezáltal egyáltalán nem csökkent, mert ahogy nincs „elégéses páncélvédelem” úgy nincs „elégendő számítási teljesítmény” sem. Az újabb és újabb processzorok magasabb számítási képességeit a növekvő mennyiségű információ, illetve az egyre szofisztikáltabb

feldolgozási algoritmusok lényegében azonnal „felszívják”, így a berendezéseink villamos fogyasztása jó közelítéssel konstansnak, vagy enyhén növekvőnek tekinthető [93].



21. ábra: A processzorok teljesítményének fejlődése (saját szerkesztés a [94] alapján)

A rádiófrekvenciás kisugárzáson alapuló berendezések esetében a korszerű félvezető eszközök hatásfoka erősen függ az alkalmazott frekvenciától, illetve modulációs módoktól is, de általánosságban a vevő berendezések esetében igen jónak tekinthető, mintegy 40-50 % [95]. Az adó berendezések esetében ugyanez már sokkal erősebben függ a teljesítménytől is, kis teljesítményű eszközöknél 50 %, ami fokozatosan leromlik akár 20 % alá is. Mivel a legkorszerűbb rádióeszközök már nem az olyan konvencionális rádiótechnikai elemekből épülnek fel, mint a modulátor vagy keverő, hanem ezeket a funkciókat egy számítógép valósítja meg egy matematikai algoritmus mentén (SDR⁶³), a jelfeldolgozás hatásfoka a számítógépekéhez hasonló, de semmiképp sem függ a berendezés RF teljesítményétől. Így a kisebb teljesítményű eszközöknél a teljes villamos teljesítményfelvétel kb. 50 % a tápegység vesztesége, az aktív hűtés és az RF fokozat teljesítményfelvétele [96] és 50 %-ot tesz ki a jelfeldolgozás, az interfész funkciók és az eszközmenedzsment. Nagy teljesítményű berendezéseknél ez az arány erőteljesen eltolódik az első rész javára.

⁶³ Software Defined Radio.

2.4. Egyéb villamos fogyasztók

Bár a villamos energia alkalmazása a hadszíntereken az infokommunikációs eszközök miatt vált elkerülhetetlenné, természetesen mára a civil mindennapokhoz hasonlóan a katonai alakulatok is számtalan egyéb villamos eszközt használnak. Ezeket a felhasználás jellege szerint önkényesen csoportosítom és áttekintem főbb energetikai paramétereiket.

2.4.1. Világítás

Érdekesnek hathat, hogy bár a második világháború idején a gépjárművek világító berendezései már 100 %-ban villamos működésűek voltak és a személyi felszerelés részeként természetesen már létezett telepes kézi lámpa is, addig a tábori elhelyezésben még ekkoriban is ragaszkodtak a petróleum-lámpákhoz.

Ennek főbb okai, hogy egyrészt a hadseregek sok esetben elég konzervatívan viseltetnek bizonyos újdonságokkal szemben, és ha az nem nyújt egyértelmű és azonnali előnyt, akkor nem szívesen cserélik le a már bevált megoldásokat. Márpedig a petróleumlámpa hiába volt kellemetlen szagú és tűzveszélyes, nagyon megbízhatónak bizonyult és a petróleum is viszonylag könnyen hozzáférhető volt. Másfelől akkoriban az aggregátorok szigorúan a rádióberendezések tartozékai voltak és nem rendelkeztek az effajta „kényelmi” funkciók megvalósításához elegendő plusz teljesítménnyel, illetve nem voltak hozzájuk rendszeresítve a szükséges szerelvények sem.

A világháború után azonban a haderő szakított a petróleummal. Egyrészt mivel a civil világítási infrastruktúra minden fejlett államban elektromossá vált, egyre nehezkesebbé vált a beszerzése, másrészt kiváltásával eltűnhetett egy anyag a hadsereg egyébként is bonyolult logisztikai rendszeréből. Mindezzel együtt a több rádió különálló aggregátorai helyett egyre inkább egy nagyobb teljesítményű, így jobb hatásfokú egységet alkalmaztak, amelynek már volt elegendő kapacitása a világítás üzemeltetéséhez is.

E tekintetben a 2000-es évek elejéig nem volt változás, de az azóta eltelt időszakban a hagyományos izzókat a tábori eszközökben csaknem teljesen kiszorították a LED-es fényforrások. Ez az evolúció viszonylag gyorsan lezajlott az aránylag olcsó, de az akkumulátoros élettartam szempontjából kritikus a személyi felszerelési eszközöknél, illetve lassabban, de folyik a járművek esetében is.

2.4.2. Hűtés-fűtés

Ez a fajta tevékenység villamos szempontból a személyi felszerelések esetében (még) nem értelmezhető. Bár már léteznek villamosan fűthető ruhadarabok, a katonaság még inkább a jó minőségű, hagyományos rétegelt ruházatot preferálja. A járművek és különösen a harcjárművek esetében a küzdőtér megfelelő hőmérséklete és páratartama viszont nem kényelmi funkció. Arra azért van szükség, hogy a katonák harckészültsége tovább fenntartható legyen, illetve a korszerű elektronikával felszerelt eszközök, mint amilyen a Leopard 2A7 vagy a Lynx, a fedélzeti berendezései is megkövetelik azt. A klíma működtetése korábban mechanikus volt, így szükséges volt a főhajtómű üzemeltetése, de a korszerűbb típusoknál az állóhelyzeti áramellátás céljából szinte minden esetben beépítenek segédaggregátorokat, azok álló helyzetben is működtethetik a klímaberendezéseket.

A tábori elhelyezés során szintén nem kényelmi funkció a körletek klimatizálása, márpedig a rosszul vagy sehogy sem hőszigetelt sátrakban nem egyszerű az állomány regenerációjához szükséges pihenés biztosítása. Személyes tapasztalat, hogy itt is sokáig ragaszkodtunk a hagyományos dobkályhához, bár az ahhoz szükséges szén vagy tűzifát nem mindig tudta megfelelő mennyiségben biztosítani a logisztika.

Mára akár sátras, akár konténeres a személyi állomány elhelyezése, a klíma kötelező kiegészítőnek számít, de a berendezések működtetéséhez szükséges energia átvitele sem mechanikus, sem pneumatikus vagy hidraulikus úton nem célszerű, a legegyszerűbb a villamos áram.

Amennyiben az elhelyezési körletben működik tábori konyha, ott is egyszerűbb a jég logisztikai úton történő biztosításánál a hűtőgépekhez szükséges villamos áram elérhetővé tétele.

A hosszabb időre létesült táborok esetében a használati melegvíz előállításához, a meleg ételek készítéséhez, esetleg fűtéshez terepi körülmények között is kézenfekvő megoldásnak tűnik a PB-gáz használata, olyannyira, hogy nemrégiben még a Magyar Honvédség is vásárolt ilyen üzemű gulyáságyúkat [97, 110. o.]. Sajnos azonban a gázpalackok harctéri körülmények között történő biztosítása a NATO elvek szerint működő logisztikának nem feladata. A logisztika ilyenkor csak F-34 jelű kerozint és azon keresztül villamos energiát biztosít.

2.4.3. További villamos üzemű tábori eszközök

Az infokommunikáción és a világításon kívül még viszonylag kevés azon villamos eszközök száma, amik a katonák személyi felszerelését gazdagítaná, de már előfordulnak olyan rendszerek, amiket nehéz ezekbe a kategóriákba besorítani. Ilyenek az éjjellátó berendezések, a felderítő, megfigyelő és célmegjelölő eszközök esetleg kézi indítású fegyverrendszerek elektronikus rendszerei. Ezek csaknem minden esetben a saját akkumulátoraikkal működnek, ezek biztosítása a logisztikai támogatás feladata.

Ezek az eszközök többnyire megtalálhatók a harcjárművek felszerelésében is, sőt ez még kiegészülhet a távirányított fegyverrendszerek vezérlésével, és az aktív rádiókisugárzással működő, így jelentős villamos fogyasztást generáló aktív védelmi rendszerekkel és az improvizált robbanóeszközök működését megakadályozó zavarókkal (jammer). Egyre gyakoribb, hogy szintén az álló helyzeti működés, illetve tűzvédelmi okokból a torony és a lövegcső mozgatását végző hidraulikus rendszert is villamos berendezésekkel cserélik le. A megnövekedett és álló helyzetben is biztosítani szükséges villamos energia előállítására a legújabb harcjárműveknek már alaptartozéka a kiegészítő áramforrás.⁶⁴ A HHP keretében beszerzett eszközök esetében ilyenekkel rendelkezik a Gidrán, a Leopard 2A7, a Pzh2000 illetve bizonyos fokig a Lynx is [85, 24. o.]. Ugyanakkor ebben a kontextusban nem tekintem katonai eszköznek a gépjárművek generátorait, indítómotorjait és a motorelektronikát sem.

A tábori elhelyezés az a színtér, ahol a fentebb említetteken túl már most is számottevő mennyiségű és energiaigényű villamos berendezés üzemel, ugyanakkor ezek közül a legtöbb jelenléte nem nyilvánvaló. Minden táborban üzemelnek szivattyúk, amelyek a vízellátást és az üzemanyagfeltöltést végzik. Ezek utóbbiak kézi működtetése szükség esetén megoldható, de ilyenkor a járművek feltöltése lényegesen lassabb. Elvileg megoldható lenne külön motoros szivattyúk alkalmazása is, esetleg hidraulikus vagy pneumatikus erőátvitel, de bármelyiknél kisebb és könnyebb egy villamos motoros szivattyú, amelynek energia-ellátásához egy vékony kábel is elég.

Minden legalább dandár szintű szervezethez tartoznak tábori elhelyezésben is települő javító alegységek. A kompresszorok, az emelők és nem utolsósorban a hegesztő berendezések működtetése manapság már terepi viszonyok között sem elképzelhető villamos energia nélkül.

A hosszabb időre létesülő katonai táborok már olyan elemekkel is kiegészülnek, mint a tábori mosoda, vagy gyengélkedő/orvosi rendelő, amelyek jellemzően szintén villamos

⁶⁴ Auxiliary Power Unit – APU.

berendezéseket működtetnek [97, 105. o.]. A tartós tábori elhelyezésben pedig a katonák részéről is felmerül, hogy saját villamos üzemű higiéniai, kényelmi vagy szórakoztató eszközeiket használhassák, amely villamos igényt szintén ki kell szolgálnia a tábori hálózatnak.



22. ábra: LED-es táborvilágító eszközök próbája a CL15 nemzetközi gyakorlaton (saját felvétel)

2.5. Összegzés

Ebben a fejezetben áttekintettem a műveleti területen tartózkodó szárazföldi csapatok tevékenysége szempontjából meghatározó villamos energetikai eszközöket, illetve az energia-ellátás struktúráját.

Az ellátás szempontjából arra a megállapításra jutottam, hogy jelenleg a szárazföldi csapatok műveleti területen történő villamosenergetikai ellátása szinte teljes egészében a tüzelőanyag, NATO-művelet esetében az F-34 jelölésű kerozin biztosítottságán alapul. Ezt használják a harc- és gépjárművek, vagyis a fedélzeti generátor által előállított villamos energiának is ez a forrása, illetve ezzel üzemelnek az aggregátorok is. Ez egyrészt nagyban leegyszerűsíti a logisztikai tevékenységet, hiszen csak egyfajta üzemanyag szállítását és elosztását kell megoldani, ugyanakkor nem ad lehetőséget a manőverezésre, ezáltal sérülékennyé is teszi ezt a fajta architektúrát.

Ez a fajta függőség azt is jelenti, hogy a szárazföldi csapatok autonóm tevékenységi idejének egyik limitáló tényezője az üzemanyag-ellátás. A megszűnő vagy nem elégséges utánpótlási kapacitás esetén a modern gépesített alakulatok természetesen nem lesznek

képesek harctevékenységre, de ha hasonló okokból megszűnik a villamosenergia-ellátás, az alakulat harcérintkezés nélkül is dezintegrálódik, mivel nem lesz képes a saját létszükségeit biztosítani, illetve a kommunikációs lehetőségei is megszűnnek, így képtelen lesz a saját vezetési-irányítási rendszerét fenntartani.

Természetesen ez az állapot a logisztikai támogatás megszűnésével mindenképpen bekövetkezik, de figyelembe kell venni, hogy az ellátás egyes elemeinek elvesztése milyen időn belül fejti ki hatását. Az alkatrészek és karbantartási anyagok vagy az egészségügyi biztosítás anyagainak elvesztése-elfogyása esetén csökken az adott alakulat harcértéke, mind a személyi, mind a technikai veszteségei megnőnek, de ez nem jelenti önmagában a teljes megsemmisülést. Az élelmiszer vagy az ivóvíz hiánya mellett az évszaktól, időjárástól és a földrajzi helyzettől függően néhány napig még egyben lehet tartani az alakulatot, de ha nincs villamos energia, akkor megszűnik (vagy legalábbis radikálisan lelassul és sebezhetővé válik) a kommunikáció, ami órák alatt azt eredményezi, hogy az alakulat kisebb önálló csoportokra esik szét és megszűnik az eredeti alakulatként létezni.

A villamosenergia-ellátás megszűnésekor bekövetkező „vezetelenség”-en kívül a villamosság más szempontokból is fontos része a szárazföldi csapatok harckészültségének. A csapatok saját közvetlen taktikai felderítési információinak feldolgozására is elektronikus eszközök szolgálnak, míg a tábori elhelyezésnél említett villamos működésű eszközök gyorsabbá teszik a csapatok logisztikai kiszolgálását, illetve hozzájárulnak a csapatok moráljának a fenntartásához. Trópusi vagy sivatagos környezetben a gyakran pusztán kényelmi eszköznek tekintett klímaberendezések a szűkös villamosenergia-ellátás miatt történő kikapcsolása hosszabb távon már komolyan veszélyezteti az állomány morálját és egészségét, ami nyilvánvalóan negatív hatással van a harckészültségre.



23. ábra: A szárazföldi csapatok villamosenergia-szükségletének Maslow-piramisa (saját szerkesztés)

További probléma, hogy bár az aggregátorok elég megbízható eszközök egy meghibásodás (vagy esetleg szabotázs) lehetőségét nem lehet kizárni. Mivel a nagy teljesítményű aggregátorokból meleg tartalékot általában nem képeznek, a centralizált struktúra miatt egy meghibásodás a teljes fogyasztói kör azonnali ellátatlanságát jelenti, nincs lehetőség az átszervezésre.

Az egyéni felszereléshez tartozó eszközök villamosenergia-ellátása teljes egészében az akkumulátorokra támaszkodik. Az ezekben tárolt energia mennyisége, így a málházott akkumulátorok mennyisége így limitálja a nem gépesített katonai csoportok autonóm működési idejét. Az akkumulátorok töltésére a műveleti területen nincs mód, legfeljebb a táborhelyeken, ami viszont ugyancsak az üzemanyag ellátásra támaszkodik. Ennek megfelelően a nem gépesített csoportok, alegységek lényegében az utolsó akkumulátor lemerülését követően azonnal elvesznek az alakulat szempontjából. A katonák a környezet függvényében még jó ideig képesek lehetnek az önfenntartásra, illetve, ha megmarad az alegységen belüli hierarchia, akár még harctevékenységet is folytathatnak, de az már nem lesz a felső vezetés által kontrollált. Erre a legextrémebb példa Hiroo Onodáé. A japán katona csak 1974-ben adta meg magát, mert a Fülöp-szigetek dzsungelébe egész egyszerűen nem jutottak el hozzá a fegyverletételről szóló parancsok [98].

A szárazföldi csapatok által fogyasztóként alkalmazott villamos eszközök vizsgálatát követően arra jutottam, hogy azok használata törvényszerű. Bizonyos tevékenységeket, mint például a nagy mennyiségű adat feldolgozása és tárolása egyáltalán nem lehet más típusú berendezésekkel elvégezni, csak elektromos gépekkel. A világítást, a fűtést, vagy akár egy hegesztő készülék üzemeltetését elvben meg lehetne oldani más energiaforrásra támaszkodva, de ez a 21. században már nyilvánvalóan irracionális lenne. A más energiaforráson alapuló megoldások vagy nem elégítik ki a modern műveletek dinamikája által támasztott követelményeket, vagy lényegesen gyengébb az energetikai hatásfokuk, vagy nehezen megoldható logisztikai problémát jelentené az egyébként is bonyolult ellátási rendszernek.

funkció/feladat	alternatív energiaforrás		
	típus	előnyök	hátrányok
infokommunikáció	-	-	-
világítás	petróleum, olaj, karbid	-	gyengébb hatásfok, plusz logisztika
fűtés (melegvíz, lakótér, főzés)	tűzifa, szén, PB-gáz	jobb energetikai hatásfok	bonyolult infrastruktúra, plusz logisztika
hűtés	jég vagy belsőégésű motoros kompresszor	motoros kompresszornál jobb energetikai hatásfok	
motorok, szivattyúk	benzin, dízel, F34	jobb energetikai hatásfok	

7. táblázat: Egyes villamos energián alapuló funkciók kiválthatósága más energián alapuló eszközökkel (saját szerkesztés)

Tábori körülmények között a villamos energia disztribúciója is meglehetősen statikus. Gazdaságossági okokból törekednek a minél nagyobb aggregátorok használatára mivel ezek hatásfoka eleve jobb a kisebb teljesítményű változatoknál, illetve a sok felhasználó egyfajta statisztikus multiplexet is megvalósít, vagyis időben egyenletesebbé teszik az aggregátor terhelését. Tulajdonképpen ettől a logikától csak a létfontosságú infokommunikációs rendszerek energia-ellátásának tervezésekor tekintenek el, ahol szünetmentes ellátó berendezések közbeiktatásával igyekeznek az „általános” tábori hálózattól elszeparálni ezeket az eszközöket, vagy eleve a kevésbé gazdaságos, de biztonságosabb sziget üzemben telepítik őket.

Nagyobb katonai alakulatoknál azok pusztán méretéből adódóan nem elég egy aggregátor, illetve vannak olyan egységek (pl. üzemanyag-ellátás), amelyek biztonsági okokból távolabb települnek, így nagyobb távolságok okozta veszteségek (és a kábelek fektetésének) elkerülése miatt további aggregátorok üzembe állítása is szükséges lehet, de ezek egymáshoz képest sziget módban üzemelnek, nincs közöttük kábeles kapcsolat, mint ahogyan az adott települési helyen esetlegesen elérhető és még működőképes polgári távvezeték hálózathoz sem képesek alakulatok a saját logisztikájuk tehermentesítése érdekében csatlakozni.

A fenti struktúrának köszönhetően műveleti területen a katonai alakulatok a villamos energiával csak igen korlátozottan képesek a helyzet változásaira reagálni. A legegyszerűbb a helyzet a gyalogos katonák esetében, ahol a málházott akkumulátorokban tárolt energiával sincs lehetőség manőverezni, ugyanis az esetek többségében az egyes villamos berendezések akkumulátorai nem kompatibilisek egymással. Tulajdonképpen a nagy gyártók piacpolitikai okoktól vezérelve eddig sikeresen akadályozták meg, hogy a katonai akkumulátorokat szabványosítsák. Létezik néhány típus, amelyek olyan gyakoriak, hogy más gyártók is alkalmazni kezdték őket, így egyfajta kvázi szabvánnyá váltak, ilyen a BB-2590/U lítium-ion

típus [99]. Kiseb gyártók sokszor építenek rá, mert tudják, hogy ez előnyös lehet a termékük elbírálásakor, de semmiképpen sem kötelező az alkalmazása. Vagyis a gyalogos katona esetében előfordulhat, hogy bőven van még villamos energia egyes nála lévő eszközök akkumulátorában, miközben más eszközöket már nem tud bekapcsolni.

Némileg szerencsésebb a helyzet a gép- és harcjárművek, illetve a tábori aggregátorok hálózatában, hiszen itt minden berendezés vagy natív módon, vagy adapterrel, de ugyanarra a 24 V-os egyenfeszültségű, vagy (Magyarországon) a 230 V-os váltakozó feszültségű hálózati üzemre van felkészítve. Ebből adódóan lehetőség van egyes, kevésbé fontos fogyasztók lekapcsolására, amivel az adott hálózat üzemideje kitolható, de már csak bizonyos funkciók elvesztése árán. Egy ideiglenes katonai tábor esetén, ha két napig nem üzemel a tábori konyha és csak hideg élelmet szolgálnak fel, az némileg csökkenti a katonák komfortját, de ez még nem okoz jelentős harcérték-csökkenést. Vagyis amennyiben ezen az áron kihúzza a tábor a következő üzemanyag-szállítmány érkezéséig, akkor ez egy fontos képesség. A harcjárművekben nincsenek kizárólag a komfort érdekében beszerelt készülékek, így bármelyik lekapcsolása azonnal a harcérték romlását vonja maga után. Példának okáért az IED⁶⁵ zavaró kikapcsolásával a harcjármű védtelenné válik az improvizált aknák ellen, míg a klíma kikapcsolásával a személyzet válik fáradékonyabbá, így figyelmetlenebbé.

Az egyes villamosenergetikai szigetek vagy a járművek között villamos energia átadására nincs mód, legfeljebb az üzemanyag-készletek csoportosíthatóak át. Azt is figyelembe kell venni, hogy ezeknek az eljárásoknak minimális a hatása, alkalmazásukkal az autonóm működési idő egy tábor esetében egy-két nappal, jármű esetében legfeljebb néhány órával tolató ki.

Összességében megállapítottam, hogy a szárazföldi csapatok villamosenergia-ellátásának jelenleg általánosan alkalmazott módszerei jelentős kockázatot hordoznak magukban. Az ellátás struktúrája merev, direkt villamosenergetikai manőverezésre nincs mód, erre kizárólag az üzemanyag átcsoportosításával, illetve restrikiók életbe léptetésével nyílik lehetőség. Mivel a hadseregek mára csaknem ugyanolyan mértékben függenek a villamos energiától, mint a civil társadalom, ez egy olyan terület, ahol bőven van még tennivaló. Közhely, hogy a villamos energia elérhetősége a modern társadalmak számára annyira alapvető, mint a levegő. Sajnos, ezt a szemléletmódot tapasztalom a haderő részéről is, kevés törekvést látok arra nézve, hogy ezt a függőséget csökkentsük, vagy legalább felmérjük a függésből fakadó kockázatot és felkészülünk ennek kezelésére.

⁶⁵ Improvised Explosive Device – Improvizált Robbanóeszköz.

3. A terepi villamosenergia-fogyasztás mértéke és várható trendjei

Bár ezt mindvégig terveztem, sajnos nem állt módomban hazai méréseket végezni azzal kapcsolatban, hogy mekkora egy katona, vagy egy alegység villamosenergia-igénye tábori elhelyezési körülmények között. Az általam ismert gyakorlatok egyikén sem volt a gyakorlat része a tábori villamosenergia-ellátással kapcsolatos tevékenység, a műveleti területen elvégzendő feladatok begyakorlása. Mivel Magyarországon valamennyi katonai objektum, így a gyakorlóterek is be vannak kötve a civil villamos hálózatba, a katonák egyszerűen bedugták a villamos berendezéseiket az ott kiépített hálózati szekrények dugaljaiba és abban a hónapban az adott objektum villanyszámlája kicsit magasabb a szokásosnál, de a gyakorlat alatt elfogyasztott villamos energia nem állapítható meg. A már hivatkozott 2015-ben Magyarországon végrehajtott CL15 gyakorlat annyival volt bonyolultabb, hogy az ott települt résztvevő állomány által generált villamos igény meghaladta a várpalotai objektum transzformátorának teljesítményét, ezért külső (!) szolgáltatótól kerültek aggregátorok bérlésre.

Mindenesetre ez a tény is azt bizonyítja számomra, hogy jelenleg a Magyar Honvédség alakulatainak többsége nem rendelkezik saját eszközökkel arra az esetre, ha egy kitelepüléssel járó katonai művelet során el kellene látnia energiával a saját villamos működésű eszközeit. 2016-ban a Magyar Honvédség vásárolt két készlet nagy teljesítményű, 350 kW-os, és néhány kisebb, 4 kW-os aggregátort [97, 114. o.], de ezekkel legfeljebb egy zászlóalj-harccsoport kitelepülése látható el. Ennek megfelelően ezeket nem is rendelték egyik harcoló alakulat állományába se, hanem azokat az MH Logisztikai Központ tárolja, és igény alapján üzemelteti.

Azt gondoltam, hogy külföldi irodalmat majd találok ebben a témában, de sajnos ez a terület még nemzetközi kitekintésben sem tekinthető feldolgozottnak, mindössze kettő olyan forrást sikerült felfedeznem, amely hiteles és releváns adatokkal segítette a kutatásomat. Az egyik az amerikai hadsereg táborok tervezését megkönnyítő logisztikai kiadványa [34], míg a másik az EDA E&E CapTech egy adatösszesítéséből származik [67, 146. o.].

3.1. A tábori elhelyezésben biztosítandó villamos teljesítmény

A tábori elhelyezés során a katonák által igényelt villamosenergia-mennyiség meghatározása egyáltalán nem könnyű, mivel ilyen jellegű hazai mérések egyáltalán nem készültek, míg a külföldiek – ha voltak ilyenek egyáltalán – nem publikusak. Az egyetlen

amerikai ATP kivételével sem a jelen időszakra, sem a korábbiakra nem találtam olyan szabályzókat, amik iránymutatást adhatnának, így azt hasonlítottam össze kettő, egyébként tapasztalati úton meghatározott ajánlással.

A kutatásaim során több alkalommal is megpróbáltam a tábori elhelyezés villamosenergia-igényével kapcsolatos direkt adatgyűjtéssel, de mindig kudarcot vallottam. A hazai gyakorlatokon semmilyen mérési lehetőség nincs, sem mérőeszközök, sem mérési pontok nem állnak rendelkezésre, ráadásul a korábban említett „költséghatékonysági” okokból a valóságban szinte sosem része a gyakorlatnak a villamos energia helyszíni előállítása. A már szintén említett CL15 gyakorlaton néhány esetben volt mód a fogyasztási adatok rögzítésére, de mivel ott elsődlegesen a berendezések működőképességének igazolása volt a cél, ezek az adatok nem bírnak relevanciával⁶⁶.

Az egyetlen általam fellelt magyar cikk az írója tapasztalataira építve azt állítja, hogy egy 500 fős tábor (ez egy megerősített zászlóalj, vagy zászlóalj-harccsoport létszáma) villamos ellátásához 4 db 350 kW-os aggregátor telepítése szükséges [97, 114. o.]. A szövegből az is kiderül, hogy pusztán a fogyasztási adatok alapján a rendelkezésre álló 1,4 MW összteljesítmény általában nincs kihasználva, viszont az ellátást nyilvánvalóan az előforduló legnagyobb terheléshez kell méretezni, ami egy főre vetítve 2,8 kW-os villamos teljesítményt jelent. Magyarországon egy átlagos négyfős háztartás igényeinek kielégítéséhez elegendő egyetlen fázison egy 32 Amperes csatlakozás a villamos hálózathoz, ami 1,8 kW-os teljesítményt jelent fejenként [100], vagyis tábori elhelyezés tervezésekor a logisztika jelenleg a civil felhasználást jóval meghaladó villamos teljesítmény-igénnyel számol. Ugyanakkor ez csak a hazai energia-felhasználással összevetve igaz, a háztartásokban egy fő által igényelt villamos teljesítmény-érték nemzetközi kitekintésben már igen nagy szórást mutat. Az egy főre vetített háztartási villamos energia fogyasztás terén Izland a rekorder a magyar érték tízszeresével [101].

A fenti 2,8 kW-os teljesítményigénnyel összhangban vannak a két külföldi forrás által meghatározott igények. Az EDA E&E CapTech-je komoly kutatást végzett a tábori elhelyezésben felmerülő infrastrukturális igényekről és ebben egy főre 3,6 kW villamos teljesítmény-tartalékot irányoz elő [67]. Ennél részletesebben foglalkozik a témával az amerikai ATP 3.37-10. Ebben a tábor tervezett fennállási idejének függvényében már különböző értékek szerepelnek. A csak rövid időtartamra (legfeljebb 2 hónap) létesített

⁶⁶ Egy mérési lehetőséggel rendelkező mikrogrid szolgálta pl. ki a katonai rendész zászlóalj műveleti helyiségeit, de az elhelyezés, az étkeztetés, stb. villamosenergia-igénye másik, nem mérhető rendszerből került biztosításra.

táborok esetében mindössze 1,5 kW villamos teljesítménnyel számol fejenként, hiszen itt valószínűleg mozgásban lévő csapatokról van szó, ahol sem igény, sem lehetőség nincs azoknak a részben kényelmi szolgáltatásoknak a kiépítésére, mint ami például egy békefenntartó művelet részeként több év időtartamra létesített tábor esetében szükséges. Ez a forrás az ilyen, hosszabb időre létesített táborok esetében egyébként 3,5 kW-ot jelöl meg a fejenként igényelt villamos teljesítményre, ami lényegében megegyezik az EDA által javasolt értékkel. Érdekesség, hogy az amerikai forrás a 2 évet meghaladó tervezett kitelepülések esetére már nem is tábori elhelyezést javasol, hanem állandó stacioner épületekből álló körletek kialakítását.

Valamennyi forrás átlagos értéket ad meg, a valóban szükséges villamosenergia-igény az évszaknak és a földrajzi elhelyezkedésnek függvényében ettől jelentősen eltérhet, de a civil felhasználásra jó összehasonlítási alapként tekintem a moderált klímájú Kárpát-medencét. Az a tény, hogy a (magyar) háztartásokban fejenként kisebb energiaigénnyel számolhatunk, mint a tábori elhelyezésben lévő katonák esetében, továbbá, hogy a két évet meghaladó kitelepülés esetére már nem javasolt ideiglenes tábor létesítése, is árulkodó. Egyrészt feltételezhetjük, hogy a tábori elhelyezés eszközei kevésbé energia-hatékonyak, mint az állandó elhelyezés eszközei, másrészt a felhasználás jellege is eltérő, ha nem is gyökeresen más. Az könnyen belátható, hogy a sátrak, konténerek hőszigetelése nagyságrendileg rosszabb, mint egy épített lakóépületé, így az energiaigény jelentős részéért felelős klimatizálás az előbbieket esetében sokkal több energiát igényel. Mindemellett azt is figyelembe kell venni, hogy a háztartások teljes energiaigényének egy jelentős része más módon – földgáz, távhő – kerül kielégítésre, így azok nem jelennek meg a villamos energiában, míg a korszerű tábori elhelyezésben ma már többnyire csak villamos eszközök állnak rendelkezésre.

forrás:	Erdódi	EDA	ATP 3.37-10		
a tábori elhelyezés ideje:	n/a ⁶⁷		<60 nap	<180 nap	<2 év
villamos teljesítmény (kW):	2,8	3,6	1,5	2,5	3,5
víz (liter):	95-110	180	40-50	115	190

8. táblázat: A különféle források által tábori elhelyezés idejére javasolt egy főre létesítendő villamos teljesítmény és (az összehasonlítás kedvéért) vízigény (saját szerkesztés a [97], [67] és [34] alapján)

3.2. A személyi felszerelés villamosenergia-igénye

A személyi felszerelés villamos működtetésű eszközeinek energiafelhasználását sem könnyű meghatározni. Annyi bizonyos, hogy ez a fogalom 40-50 éve még értelmezhető sem volt, hiszen legfeljebb egy elemes lámpa képviselte ezt a kategóriát egy egyszerű lövészkatona esetében. A különleges alakulatok már ekkoriban is rendelkeztek ilyen eszközökkel, de ezek többsége, mint például egy lézeres célmegjelölő, vagy egy műholdas rádióberendezés nem volt a csapat alapfelszerelések része, azokat a végrehajtandó feladat függvényében egyedileg igényelték és kapták.

A villamosítás zászlóvivője itt is a rádiókommunikáció volt. A második világháborút követően még csak elektroncsövek álltak rendelkezésre, de ezek miniatürizálásával már tudtak olyan rádióberendezéseket gyártani, amelyeket (és a hozzájuk tartozó áramforrásokat) egy katona képes volt hordozni. Ezekkel az eszközökkel a korszak tömeghadseregei is század, majd szakasz szinten is el lettek látva mobil kommunikációs eszközökkel, amik révén az ilyen csapatok alkalmazhatósága (a korszak viszonyaihoz mérten) jelentősen megnőtt. A hetvenes évektől elterjedő félvezető technika egyaránt jó hatással volt az ilyen eszközök méretére és tömegére, illetve a fogyasztására is, így a rádió a szakaszok szintjén kötelező elemmé vált, és lassan a lövészrajok is fel lettek szerelve rádiókkal. Napjainkra a korszerű hadseregek már minden katona esetében feltételezik a személyes rádiókommunikáció lehetőségét.

⁶⁷ Az Erdódi-féle forrás megkülönböztet eltérő időre létesített táborokat, de nem specifikál rájuk eltérő teljesítményigényt.



24. ábra: A hidegháborús korszak jellemző képviselője az R-107 rádió adó-vevő [102]. A szovjet gyártmányú készülék csak egyszerű beszédkommunikációt tett lehetővé, miközben valamennyi tartozékával 40 kg-nál is nehezebb volt és több, mint 30 W-ot fogyasztott [103]

Ennek oka egyrészt, hogy a korszerű hadviselés már nem tömeghadseregekben gondolkodik, hanem kisebb létszámú, de jól kiképzett, professzionális katonai erőkben⁶⁸. Másfelől az önálló alkatrészként működő tranzistorok lassan áramköri lapkákra, majd chipre költöztek, ami még tovább növelte a miniaturizálás lehetőségeit és csökkentette az energiaigényt. Jelenleg a haditechnikában már csak az SDR eszközök tekinthetők korszerűnek. Ezekben egy kisméretű célszámítógép egy program alapján emulálja a korábban különálló áramkörök funkcióit, így csak a rádiófrekvenciás egységek igényelnek nagyobb teljesítményt.

A kommunikációs eszközök fejlődésével párhuzamosan a katonák személyi felszerelésének egyéb eszközei is fejlődtek, de egyes eszközök lassan elérik a fejleszthetőség fizikai (anyagtechnológiai) határait. Tipikusan ilyen az egyéni lőfegyver. A fegyverfejlesztés iskolapéldája a USA-ban általánosan használt kézi lőfegyver története. A vietnami-háborúban már használt M16-os gépkarabély⁶⁹ főbb tulajdonságait, ballisztikáját tekintve megegyezik a jelenleg is használatos M4-essel [104], értelemszerűen ugyanazt a lőszeret használja. Az M4-esnek az elődhöz képest viszont a műanyagok széleskörű alkalmazásának köszönhetően

⁶⁸ Bár ennek az elvnek ellentmond a 2022-ben kitört orosz-ukrán háború.

⁶⁹ Az angolszász terminológia szerint Assault Rifle, azaz rohampuska.

kisebbs lett a tömege, az ergonomikus válltámasz és a rövidebb cső könnyíti a használatát (bár ez utóbbi miatt kisebb a torkolati energia) de ami talán a legfontosabb, moduláris sínek kerültek rá. Ennek oka, hogy a fegyver alapvető tulajdonságain (tűzgyorsaság, lőtávolság) már alig lehet javítani, így az alkalmazó csapatok képességeit olyan módon javítják, hogy a fegyverre (sok esetben villamos működésű) kiegészítőket lehet csatlakoztatni. A vörösponos vagy holografikus irányzékok viszonylag alacsony fogyasztásúak, de az éjszakai harcot is lehetővé tevő fényerősítéses, illetve a passzív infravörös irányzékok már számottevő villamos energiát igényelnek.

fegyver típus:	M16A1	M4A1	Ak-47
használatba vétel éve:	1960	1997	1949
lőszer:	5,56 x 45 mm		7,62 x 39 mm
működési elv:	gázelveteles, automata		
reteszelés:	forgózár		
tömeg (kg):	2,97	2,68	3,6
elméleti tűzgyorsaság:	800 lövés/perc		600 lövés/perc
csőhossz/teljes hossz:	508/1006 mm	368/838 mm	415/870 mm
lövédék kezdősebesség (m/s):	935	884	715

9. táblázat: A világ leggyakrabban használt kézi lőfegyvereinek főbb adatai (saját szerkesztés a [104] és [105] alapján)

Hasonló elvek alapján szerelik fel a lövészkatonákat egyre gyakrabban legalább raj szinten egy tartalék, jellemzően műholdas rádiókészülékkel, műholdas helymeghatározóval és sisakkamerával. Napjaink jellemző törekvése a Magyarországon csak „Digitális katona”-ként ismert koncepció [106] megvalósítása. Itt a harctéren minden és mindenki, ideértve az egyszerű lövészkatonát is, egy informatikai csomópontként viselkedik. A katona valós időben szolgáltat audiovizuális és GPS információt, ami kiegészülhet további környezeti (pl. hőmérséklet, légnyomás, szél) és egyéni (biológiai és felszerelésre, pl. lőszerkészletre vonatkozó) információkkal. Ezeket folyamatosan küldi a hadszíntéri „felhő” felé és onnan kap parancsokat, taktikai (pl. térképes) információkat. Mindezek megvalósításához villamos árammal működő szenzorok tömege, informatikai eszközök és megfelelő kapacitású rádiókapcsolat szükséges.

A katonáknál lévő villamos eszközök energiaigényét szinte lehetetlen egzakt módon megadni, mivel azok a digitális katona rendszert, esetleg a hagyományos taktikai rádiót kivéve még harc helyzetben is csak időszakosan vannak bekapcsolva, ráadásul a pillanatnyi

teljesítmény-felvételük szélsőséges határok között mozoghat⁷⁰. Ennek megfelelően a logisztikai támogatás gyakorlatában nem is a kWh-kat számolják, hanem az akkumulátorokat. Jellemzően annyi akkumulátort kapnak a katonák, amik a tervezett feladat végrehajtásához szükséges időtartamban képesek legyenek működtetni az adott eszközöket. Természetesen ez korántsem pontos számítás és az akkumulátorok nagy tömege miatt kicsi a tartalék-képzés lehetősége is, így könnyen előfordulhat, hogy egy-egy eszköz már nem lesz működőképes a küldetés végére. E tekintetben a digitális katona koncepció megvalósítása hozhat változást, mivel az nem különálló, hanem rendszerben működő villamos eszközöket feltételez, ami a centralizált energia-ellátást is logikusan hozza magával.

A fentieknek megfelelően a katonák személyi felszerelésének részét képező villamos működésű eszközök energiaigényére alig találni hiteles forrást. Az EDA tanulmánya ad meg a tábori elhelyezés esetére az előző fejezetben említett 3,6 kW-os aggregátor-teljesítmény mellé még további fejenként 2 kg-nyi akkumulátort [67, 143. o.] is, ám semmilyen számítást nem találtam, ami ezt az adatot alátámasztaná. Annyi bizonyos, hogy egy lövészkatona személyi felszerelésén belül a villamos energia fogyasztás kb. 90 %-át az infokommunikációs eszközök teszik ki [107].

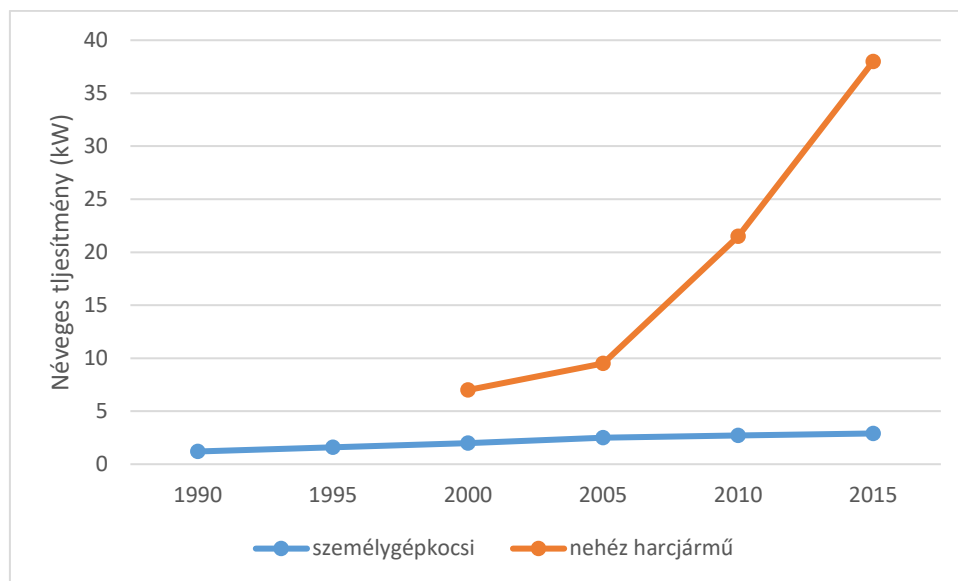
3.3. A katonai gép- és harcjárművek villamosenergia-fogyasztása

Ebben az esetben az egyéni felszereléshez hasonló problémák nehezítik a számítást, amelyet még számos körülmény nehezít. A katonai gép- és harcjárművek villamosenergia-igényét a fedélzeten elhelyezett berendezések határozzák meg, amelyekből sokkal többféle szerelhető fel egy járműre, és amelyek közül számos csak itt jelentkezik (pl. toronymozgatás, APS⁷¹). Jellemzően ezek is csak időszakosan kerülnek működtetésre, és akkor is tág határok között mozoghat a pillanatnyi teljesítményigény. A járművek villamos működésű fedélzeti eszközei alapesetben sosem „merülnek le”, hiszen a fedélzeti villamos rendszerben az akkumulátor puffer módban működik, a folyamatos ellátásról a jármű generátora gondoskodik. Természetesen az akkumulátor ennek megfelelően van méretezve, vagyis az a motor bármilyen okból bekövetkező leállása után általában mindössze néhány percig képes kiszolgálni a villamos fogyasztókat.

⁷⁰ Egy korszerű SDR rádió készenléti üzemmódú, illetve szélessávú adás üzemmódjainak teljesítményigénye között akár két nagyságrend eltérés is lehet.

⁷¹ Active Protection System – Aktív Védelmi Rendszer

Igazából a katonai gép- és harcjárművek villamosenergia igényével kapcsolatban egyedül a generátorok teljesítménye szolgálhat támpontul mivel az limitálja a fedélzeten elhelyezhető berendezések maximális fogyasztását. A tendenciákkal kapcsolatban mindenesetre az önmagában is árulkodó, hogy az elmúlt 40 évben egy átlagos személygépkocsi generátorának teljesítménye 500 W-ról, 2,5-3 kW-ra nőtt [108, 2. o.], és ehhez jönnek még a polgári felhasználású gépjárművekben nem alkalmazott villamos rendszerek, aminek eredményeként az Egyesült Államokban rendszeresített nehéz harcjárművek generátorainak átlagos mérete csak az elmúlt 20 évben a négyszeresére, 12 kW-ról 40 kW-ra nőtt [109].



25. ábra: A járműfedélzeti generátorok teljesítményének változása (saját szerkesztés a [108] és [109] alapján)

Az egyes harcjárművek generátorainak technikai adatai általában nehezen felderíthetőek, ezért a fenti adatok igazolására a Magyarországon rendszeresített eszközöket hasonlítottam össze, ahol a kiképzési dokumentáció számomra is hozzáférhető volt, valamint két jól dokumentált, de más generációt képviselő amerikai típust is meg tudtam vizsgálni:

Típus	T-72	Leopard 2A7	BTR-80	Gidrán	PzH 2000
villamos rendszer feszültsége (V):	24 (28) ⁷²				
jármű tömege (t):	44,5	66,5	13,6	14	55,8
akkumulátorok kapacitása (Ah):	280	400	190	120+70	400
generátor teljesítménye (kW):	10	20	3	5,5	22,4
fajlagos villamos teljesítmény (kW/t):	0,225	0,301	0,221	0,393	0,401
APU teljesítménye:	-	20	-	3,3	22,4

10. táblázat: A Magyar Honvédségnél rendszeresített harcjárművek fedélzeti villamos rendszerének paraméterei (saját szerkesztés a járművek kiképzési dokumentációja alapján – a Lynx adatai még nem publikusak)

Típus	HMMWV (Humvee)	JLTV
villamos rendszer feszültsége (V):	24 (28)	
jármű tömege (t):	3,4	10,2
generátor teljesítménye (kW):	3,3	14,6
fajlagos villamos teljesítmény (kW/t):	0,97	1,43

11. táblázat: Az amerikai HMMWV (Humvee) és a váltótípus JLTV (Joint Light Tactical Vehicle – Általános Könnyű Taktikai Jármű) fedélzeti villamos rendszerének főbb paraméterei (saját szerkesztés a [110], [111], [112], [113] alapján)

Jól látható, hogy azonos kategórián belül az újabb eszközök minden esetben nagyobb generátorral, illetve nagyobb akkumulátor-kapacitással is rendelkeznek, illetve a jármű tömegéhez viszonyítva is erősebb az újabb típusok fedélzeti villamos rendszere. Az is jól látható, hogy az újabb eszközök fel vannak készítve a fedélzeti villamos eszközeik tartós, álló helyzetben történő üzemeltetésére is, hiszen valamennyi rendelkezik APU-val. A generátorok teljesítménye mindkét amerikai eszköz esetében kiemelkedően nagy a jármű tömegéhez képest, különösen a JLTV generátora tűnik túltervezettnek. Ennek az az oka, hogy mint univerzális bázisjármű, több különleges rendszernek lehet alapja, így példának okáért akár a fedélzeti villamos hálózat átalakítása nélkül is telepíthető rá akár egy lokátoros tűzérségi felderítő rendszer is.

⁷² Főleg az angolszász irodalomban szokás jelölni a generátor töltőfeszültségét, ami az akkumulátor belső ellenállása miatt a névleges feszültségnél 20 %-al magasabb.

3.4. A katonák személyi felszerelésének részét képező villamos eszközök fogyasztásának trendjei

Amint az már most is látható, a katonák jövőbeni személyi felszerelésében egyre több villamos üzemű eszköz fog szerepelni. Ezek egy része a katonák által műveleti területen végzett tevékenységek során csaknem mindig üzemelni fognak (jellemzően az infokommunikációs berendezések), egyes eszközök részei lesznek a katonák mindenkori felszerelésének, de csak alkalmanként kerülnek használatra (pl. világítóeszközök), egyes eszközöket pedig csak bizonyos típusú feladatokra visznek magukkal (kiegészítő kommunikációs eszközök, felderítő- és célmegjelölő eszközök). A legtöbb, főleg az állandóan üzemelő, ezért a málházott energia-mennyiség szempontjából kritikus eszköz pillanatnyi teljesítmény-felvétele továbbra is nagy ingadozást mutathat.

3.4.1. A digitális katona koncepció hatása a személyi felszerelés villamos eszközeire

A katonák felszerelésének hagyományos részeit (fegyverzet, öltözet, ballisztikus védelem) is folyamatosan fejleszti minden haderő, ám azok többségében már csak viszonylag kevés fejlesztési potenciál maradt. A már korábban is említett kézi lőfegyverek mellett folyamatosan fennáll az alkalmazói igény a katonák jobb védelmi képességű, de kisebb tömegű testpáncéljaira, de az ott jelenleg alkalmazott anyagok (kevlár, kerámia) tulajdonságai magas költségek mellett is csak minimális mértékben javíthatók tovább. Az régóta ismert, hogy egy háború vagy hadművelet kimenetelére döntő hatással bír az információs küzdelem, de ez a tendencia egyre inkább érvényesül a taktikai szinten is. A hagyományos fejlesztési irányok beszűkülése miatt a haditechnikai fejlesztés fókuszja jelenleg az információs fölény taktikai szintű biztosítására került [114]. Ennek része a harctér digitalizálása, amely magában foglalja a katonák digitalizálását⁷³ is [115]. Ennek a koncepciónak a jegyében a katonák gyorsabban és pontosabb információkat kapnak a harc hatékonyabb megvívásához, de eközben maguk is informatikai csomópontok lesznek, illetve maguk is információt biztosítanak a többi saját harcoló felé, amihez számtalan szenzor kerül elhelyezésre a felszerelésben [114]. Ezeket én az alábbi csoportokba soroltam:

⁷³ A nemzetközi irodalomban is általánosan használt digitalizáció szó arra utal, hogy a korszerű infokommunikációs eszközök kivétel nélkül digitálisak. A változás valódi jellegére jobban utal a hadszíntér „hálózatossítása” – combat network.

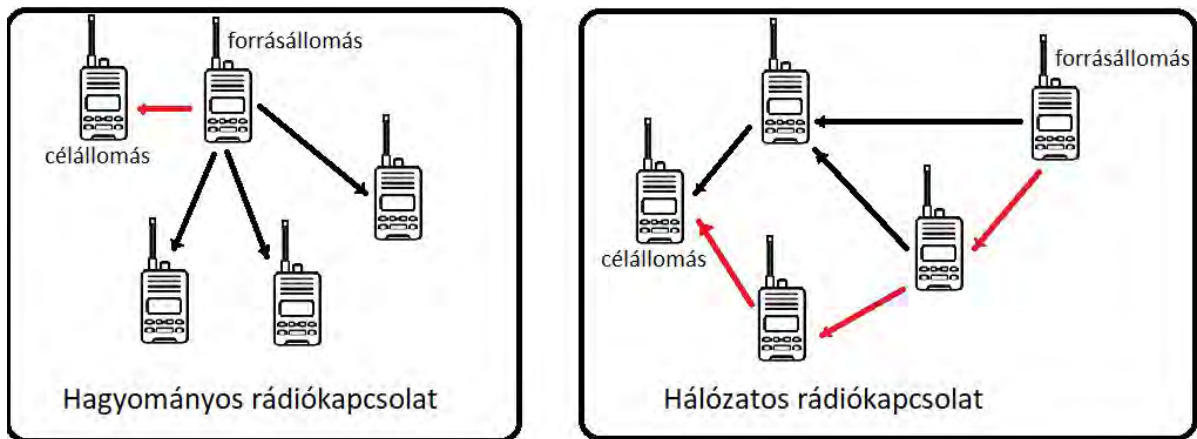
- Általános környezeti szenzorok (audiovizuális információ, GPS információ, külső hőmérséklet, páratartalom);
- Felderítési információkat biztosító szenzorok (drónkamera képe, infravörös megfigyelőműszer képe);
- Orvosbiológiai szenzorok (testhőmérséklet, pulzus);
- Felszerelési szenzorok (lövésszámláló, akkumulátorok energia-tartaléka).

Ezek a szenzorok az információt a taktikai rádióhálózaton keresztül küldik a hadszíntéri „felhőbe”, ahol azok feldolgozásra kerülnek és ezen a hálózaton keresztül fogadják a számukra küldött információt. A szenzorok többsége (a felderítési információt szolgáltatókat kivéve) folyamatosan üzemel a műveleti területen, csak pihenés közben kapcsolják ki azokat, így az folyamatos tápellátást igényel. A működéshez szükséges energia-mennyiség az egyes szenzorok esetében csekély, de összességében egy már egy érzékelhető mértékű állandó terhelést jelent.

Az egyes szenzorok önálló tápellátásának nincs értelme, hiszen a saját akkumulátoraikkal eltérő üzemidőt biztosítanak, így azokat érdemes centralizálni. Erre kínálkozik a digitális adatfolyamokat a rádió felé közvetítő informatikai eszköz, a router, ahol az adatkapcsolatot biztosító vezetékeken keresztül megoldható azok tápellátása is. A számos kábel biztonságos és ergonomikus elhelyezése a ruházatban és felszerelésben nem egyszerű, de a vezeték nélküli adatkapcsolat a különálló akkumulátor és nem utolsósorban a kiberbiztonsági kérdések miatt kerülendő [115]. Mivel a teljes rendszer a taktikai adatrádióval biztosítja csak a várt funkcionalitást, azt is érdemes ugyanarról az energiaforrásról üzemeltetni.

Az is hatással van a villamosenergia-felhasználásra, hogy a taktikai rádió működése a műveleti tér digitalizációjával alapvetően megváltozik. A hagyományos beszédrádióknál a „készenlét” csupán egy minimális fogyasztású bekapcsolt vevőegységet jelent. Amennyiben egy másik rádió forgalmaz, akkor a rádió „vétel” üzembe kerül és bekapcsolja az adatfeldolgozó és hangerősítő modulját is. „Adás” üzemmódban az adatfeldolgozó egységen kívül bekapcsol a legnagyobb fogyasztást jelentő RF végfokozat is. Elvben elképzelhető, hogy az adat- és beszédkommunikációra külön rádióberendezést használjunk, de észszerűbb, ha csak egyetlen rádió van a katonánál, és az alapvető beszédkommunikációt QoS⁷⁴ alkalmazásával biztosítjuk. Amennyiben azonban a taktikai rádió szolgálja ki a hadszíntéri felhőt, az alapvetően megváltoztatja annak működési modelljét.

⁷⁴ Quality of Service – informatikai eljárás, ahol a különféle adatforrások prioritizálásra kerülnek, így a fontosabb szolgáltatások csökkenő rendelkezésre álló sávszélesség esetén is működhetnek.



26. ábra: A hagyományos és a hálózatos rádiókapcsolat modellje. Ez utóbbinál a pirossal jelölt útvonal egyetlen adatsomagra vonatkozik (saját szerkesztés)

A hadszíntéri felhő tulajdonképpen egy informatikai hálózat, amely működését tekintve sokban hasonlít az internethez. Az egyes csomópontok közötti kommunikáció kicsi adatsomagok formájában zajlik, ahol az egyetlen adatfolyamhoz tartozó csomagok akár eltérő útvonalon is közlekedhetnek. A hadszíntéri alkalmazás még annyiban bonyolítja a helyzetet, hogy itt az egyes csomópontok nem stacionerek, azok a feladat függvényében össze-vissza mozoghatnak a területen, vagyis a hálózat struktúrája folyamatosan változik, egy ún. „mesh” hálózati architektúrát hozva létre. A szolgáltatás fenntartásának érdekében a rádiók a szenzorok által biztosított adatfolyamtól függetlenül, a kapcsolatok fenntartása érdekében folyamatosan kommunikálnak egymással. Egyes rádiók akár egyszerű „átjászóként” is üzemelhetnek, amikor saját maguk nem biztosítanak taktikai információt, csak két olyan pontot kötnek össze egymással, amelyek a távolság vagy a terület jellege miatt nem képesek direkt módon kommunikálni. Ennek ellenére az esetek egy jelentős részében a taktikai adatrádiók sem jelentenek konstans energiaigényt, hiszen az adó egységek a rádióelektronikai felderítés megnehezítése érdekében a vételi viszonyok függvényében változtathatják a teljesítményüket.

Készült egy tanulmány, amely részletesen vizsgálta az Egyesült Államokban rendszeresített hálózatos infokommunikációs rendszer, a „Nett Warrior” egy alapszintű kiépítése mellett, a különféle 72 órás katonai tevékenységekhez tartozó szakasz-szintű villamosenergia-fogyasztást, amely számol az egyes egységek időleges lekapcsolásával például a pihenők alatt. A tanulmány alapjául szolgáló tevékenységek során vizsgáltak egyes alternatív energiaforrásokat is, de itt most csak az alapfelszerelést tüntetem. fel Ennek részei:

- Thales PRC-154 „kézi”⁷⁵ rádió (Rifleman Radio);
- Samsung Galaxy Note 2 mobiltelefon, mint taktikai rendszer terminál⁷⁶;
- 1600811-1 AA3 jelű, a PRC-154 rádió akkumulátora.

Az akkumulátor 6 db 18650-es szabvány cellát tartalmaz. Feszültsége: 10,8 V, kapacitása: 63 Wh, tömege: 400 g.

tevékenység	felhasznált energia (Wh):	a szükséges akkumulátorok	
		száma (db):	tömege (kg):
várható harcérintkezésben végrehajtott menet	2.546	57	20,8
helység zárása és átvizsgálása	2.607	60	21,6
ellenőrzőpont felállítása és működtetése	2.478	57	20,8
helikopter leszállóhely megtisztítása és őrzése	2.801	64	23

12. táblázat: Egy szakasz katona „Nett Warrior” rendszerhez kapcsolódó villamosenergia-fogyasztása különböző 72 órás tevékenységek során (saját szerkesztés a [107] alapján)

A tanulmányból látható, hogy a különféle, meglehetősen eltérő jellegű tevékenységek során felhasznált villamosenergia-mennyisége alig változik, azt alapvetően a rádióeszközök száma határozza meg.

3.4.2. A személyi felszerelés alkalmi használatú villamos eszközei

Szinte végtelen azon villamos működésű eszközök listája, amelyek egy-egy küldetés során a katonák kezébe adható. Ezek közül a legáltalánosabbak a különféle világítóeszközök (kézi-, sisak- vagy fegyverlámpa), a taktikai számítógép vagy tablet, az éjszakai felderítő távcső és/vagy éjszakai irányzék, és a tartalék (többnyire műholdas) rádió⁷⁷. Ezek többsége csak alkalomszerűen kerül használatra, így különálló akkumulátorral rendelkeznek. Ezek közül kivételt jelenthetnek a kis kézi felderítő eszközök, amelyek mindenképpen a hadszíntéri felhőn keresztül küldik az információikat, így adatkapcsolati szempontból, ha csak ideiglenesen is, de részét képezik a katona személyi hálózatának, vagyis akár a tápellátást is kaphatják onnan.

Ugyanakkor egy hordozható, de telepítést igénylő multispektrális felderítő rendszer például már mindenképpen önálló tápellátást igényel, akárcsak – értelemszerűen – egy drón. Ezek a tápellátásuktól függetlenül kapcsolódhatnak a hadszíntéri felhőhöz egy-egy katona

⁷⁵ A „Nett Warrior” részeként a rádiót háton hordják a katonák, a vezérlése az EUD-t használják.

⁷⁶ EUD – End User Device.

⁷⁷ A GPS szinte minden esetben része a digitális katona alapfelszerelésnek, többnyire be van építve a rádióba.

adatrádióján keresztül, vagy akár saját adatrádióval is felszerelhetők, így hálózati szempontból önálló csomópontot képezhetnek. Ahol a terepviszonyok kedvezőtlenek, a megfelelő összeköttetés biztosítására a drónok akár szenzor nélküli adatrádiók hordozására is használhatóak [115].

Szót kell még ejteni azokról az elektromos eszközökről, amelyek jelenleg még nem, vagy csak nagyon ritkán szerepelnek a katonák felszerelésében, de a jövőben várhatóan sok helyen találkozhatunk majd velük. Ha a sci-fi irodalomtól eltekintünk és csak azokat az eszközöket vesszük figyelembe, amelyeknek tesztpéldányait már tesztelték katonai környezetben, akkor ezek az alábbiak lehetnek:

- Felderítő vagy kamikaze taktikai UAV⁷⁸-k (drónok, a jelenleginél nagyobb számban);
- Felderítő, logisztikai, mentő vagy távirányított fegyverplatform UGV⁷⁹-k;
- Exoskeletonok⁸⁰;
- Irányított energiájú, ún. nem halálos (non-lethal) fegyverek, amik elsősorban missziós feladatok során alkalmazhatók;
- UAV-k ellen alkalmazható elektromágneses fegyverek (drónpuskák).

Mind az UAV-k, mind az UGV-k esetében csak erősen korlátozott autonómiájú eszközökről lehet szó. Egyrészt a teljesen autonóm rendszerek még csak a fejlesztés igen korai fázisában vannak, másrészt ezek, ha meg is valósulnak, már nem képezhetik a katona személyi felszerelését, hiszen „önállóak”. Ugyanakkor érdekes kérdés, hogy a későbbiekben a felderítő UAV tartalék akkumulátorát a katona viszi-e magával, vagy egy szintén akkumulátorral üzemelő logisztikai UGV szállítja.

⁷⁸ Unmanned Aerial Vehicle – Pilótánélküli repülőeszköz.

⁷⁹ Unmanned Ground Vehicle – Vezető nélküli szárazföldi jármű.

⁸⁰ Villanymotoros mozgató külső vázszerkezet, ami megnöveli a hordozó katona testi erejét.



27. ábra: Magyar fejlesztésű MIMO technológiás adatrádió oktokofterre⁸¹ szerelve, mint harctéri átjátszó, egy 2018-as bemutatón (saját felvétel)

3.4.3. Egyedi villamos eszközök a katonák felszerelésében

A szakcsapatok és a különleges erők egységei számos speciális elektromos energiával működő eszközt vihetnek magukkal, ezek a teljesség igénye nélkül:

- Multispektrális felderítő eszközök;
- Rádióelektronikai felderítő eszközök;
- Vegyi- és sugárfelderítő eszközök;
- Zavaróberendezések;
- Lézeres célmegjelölők;
- Robbantó eszközök;
- Átjátszó berendezések;
- Mobil légiirányító, leszállás irányító rendszerek;
- CIMIC eszközök.

Mivel többségük alkalmazása kapcsolódik valamilyen információs művelethez [86], a számuk és jelentőségük valószínűleg nőni fog a közeli jövőben.

⁸¹ Nyolcrotoros VTOL repülőeszköz.

3.5. A katonai gép- és harcjárművek fedélzeti villamos eszközeinek fogyasztási tendenciája

Miután a katonai járművek is részei a hadszíntér digitalizációjának, a személyi felszerelésnél tárgyalt digitalizáció hatásai (szenzorok növekvő száma, nagyobb mértékű rádióforgalom) itt is igazak, de a villamos rendszerre rótt plusz terhelés itt szignifikánsabb, mivel a harcjárművek nagyobb teljesítményű, így a hálózat szempontjából fontosabb rádióeszközöket is képesek hordozni. A felhőbe kerülő rendkívül nagy mennyiségű információból a taktikai célúakat nem célszerű a hadszíntér és egy távoli adatközpont között utaztatni, így a taktikai számítógépes rendszerek egyes rendszerelemei (szerverek) is célszerűen egy harcjárműre kerülnek telepítésre.

3.5.1. A járműspecifikus villamos berendezések katonai alkalmazása

Napjaink gépjárműfejlesztéseinek központi eleme az elektromosság és az elektronika. A 80-as évektől fennálló és egyre erősödő tendencia, hogy az újabb technológiák, pl. a 3D nyomtatás ellenére a mechanikus fejleszthetőségük határát súroló dugattyús motorok hatásfokát elektronikus eszközökkel javítják. Mára egy korszerű motorban már vezérlő számítógép, továbbá annyi szenzor, illetve aktuátor⁸² található, hogy azok egyedi kábelezése már nem is megoldható, ezért egy speciális számítógépes adatbuszra, a CAN⁸³-buszra fűzik föl őket. A fedélzeti számítógép feladatköre idővel kiegészült az ABS és ASR rendszerek egyes funkcióival, az aktív felfüggesztés vezérlésével, a vezetéstámogató rendszerek vezérlésével és számos kényelmi berendezés (klíma, infotainment, elektromos mozgatású ablakok, ajtók és ülések) vezérlésével is.

Nemcsak a járműtechnikában, hanem általában igaz a tendencia, hogy a villamos rendszerek és a mechatronika fejlődésével egyre több tisztán mechanikus, pneumatikus vagy hidraulikus rendszert váltanak ki részben vagy egészben elektromos működtetésű berendezésekkel. Példának okáért a teherjárművek esetében még a nagy nyomaték leadására képes hidraulikus szervó-rendszer az általános, de a személygépkocsikban egyre inkább az elektromos kormány-rásegítés terjed el.

Mivel a katonai járműfejlesztések csaknem teljesen a polgári járműfejlesztésen alapulnak, valamint még a speciális lánctalpas harcjárművek motorjai sem egyedi fejlesztések, hanem valamilyen általános célú erőgép adaptációi, a CAN-busz és az arra illeszkedő elektronikus

⁸² Beavatkozó eszköz. Villamos mozgatású szivattyú, szelep, motor.

⁸³ Controller Area Network – általános ipari szabvány.

egységek törvényszerűen megjelentek a katonai eszközökben is. A katonai járművek sajátosságai, mint amilyen a korlátozott kilátás, számos, a civil gépjárműtechnikában kényelmi szolgáltatásnak tekintett megoldás is rendkívül hasznos, mint amilyen a fűthető visszapillantó-tükör, esetleg a tolató-, vagy panorámakamera. Ezek a funkciók többségében egyenként kis energiaigénnyel bírnak, illetve a használatuk is időszakos, de a jelenlegi tendenciák alapján a számuk folyamatosan nőni fog a közeljövőben.

3.5.2. *A katonai járművek speciális fedélzeti villamos berendezései*

A katonai gépjárművekben és harcjárművekben számos olyan villamos működésű eszköz létezik, amelyek a polgári gépjárműtechnikában egyáltalán nem, vagy csak nagyon speciális esetekben találhatók meg. Ezek közül a legismertebbek:

- Torony- és fegyvermozgatás;
- Ballisztikai számítógép
- Távvezérelt fegyverrendszerek;
- Taktikai rádióberendezések és számítógépek;
- Belső beszélgető rendszer (interkom);
- Speciális szenzorok (pl. UV vagy ABC⁸⁴);
- ABC védelem és klíma;
- Tűzoltórendszerek, fenékvízszivattyúk;
- Elektronoptikai felderítő eszközök és irányzékok;
- Panorámakamera;
- Aktív védelmi rendszerek (APS);
- Improvizált robbanóeszközök elleni védelem (C-RCIED⁸⁵).

Villamosenergetikai szempontból különösen a két utolsó tétel fontos, mert mind a két berendezés működésének alapja a jelentős teljesítményt igénylő aktív rádiófrekvenciás kisugárzás. Az C-RCIED tulajdonképpen egy szélessávú rádiózavaró eszköz, amely menet közben megakadályozza, hogy az út mellett elhelyezett improvizált bombákat rádiós távirányítással aktiválják. Tulajdonképpen úgy akadályozza meg a bombák robbantását, hogy elnyomja a rádiótávirányítók (esetleg mobiltelefonok) jelét. Ez technológiailag nem túl

⁸⁴ Atomic-, Biological- and Chemical – Atom-, Biológiai és Kémiai.

⁸⁵ Counter – Radio Controlled Improvised Explosive Device – Rádiótávirányított improvizált robbanóeszközök elleni védelem.

szofisztikált, viszont teljesítmény-igényes, az eszköz által oltalmazott terület nagysága arányos a kisugárzott teljesítménnyel. Az APS ezzel szemben igen komplex eszköz, ami egy rádiolokátorral észleli a jármű felé tartó lövedékeket, majd jellemzően irányított repeszfelhő robbantásával semmisíti meg azokat. Ugyanakkor a rendszerhez még számos további szenzor és egy nagyteljesítményű számítógép is tartozik, így annak összes teljesítmény-felvétele meghaladja az 1 kW-ot [116].

A páncélzat okozta korlátozott kilátási lehetőség miatt a korszerű harcjárműveket már számos kamerával felszerelik, amelyek lényegesen jobb tájékozódási lehetőséget nyújtanak a kezelőszemélyzetnek, mint a hagyományos periszkópos kémlelőnyílások. A megoldás további előnye, hogy egy kamera optikája jóval kisebb, mint egy klasszikus kémlelőnyílás, így a „vakítás” néven ismert harcjárművek ellen alkalmazott gyalogsági harcjelzés is kevésbé hatékony.

A korszerű hadseregekben már a lövészkatona is nagy számban fel vannak szerelve éjszakai irányzékkel, ami viszont a harcjárművek esetében napjainkban már kötelező tartozék. A fényerősítési műszerek teljesítmény-felvétele viszonylag moderált, de a jobban alkalmazható passzív infravörös eszközök kicsit komplexebbek. A katonai eszközökben általában egy mikrobolométer az infravörös szenzor, amely egy lövészirányzékban alkalmazva legfeljebb néhány száz méterig hatékony. A harcjárművek fedélzeti fegyvereinek ettől lényegesen nagyobb a hatótávolsága, így az infravörös érzékelést is célszerű javítani. Ezt a mikrobolométer hűtésével lehet megvalósítani, de az ehhez alkalmazott Peltier-elem (ritkább esetben Stirling-motor) már érzékelhető plusz energiát igényel, főleg mivel a harcjárművekben jellemzően legkevesebb három független éjszakai látást biztosító eszközt kell alkalmazni (harcjármű-vezető, parancsnok, irányzó).

A haditechnikai eszközök esetében is tetten érhető az a tendencia, hogy egyre több mindent villamosítanak. Ennek ékes példája a Leopard 2 harckocsi-család. A Magyarországon is rendszeresített 2A4-es variáns (és még a 2A6-os is) hidraulikus toronymozgatást és lövegcső-emelést alkalmaz, amely kellő nyomatékot biztosít, de működéséhez egy villanymotor által forgatott hidraulikaszivattyú szolgáltatja a megfelelő hidraulika-nyomást. Ez annyit tesz, hogy ha leállítják a motort, akkor a szükség esetén a harckocsiágyú irányzása csak kézzel lehetséges, ami viszont rendkívül időigényes. Mindezekon túl az alkalmazott hidraulika-folyadék rendkívül tűzveszélyes, ami egy találat esetén negatívan befolyásolja a túlélőképességet, és végül, de nem utolsósorban fokozottan egészség- és környezetkárosító is. A HHP keretében beszerzendő legkorszerűbb 2A7 variáns viszont már direkt villanymotoros

toronymozgatással rendelkezik, így az a harckocsi álló helyzetében is működik, és a többi kockázatot is kizárták általa.

3.5.3. *Alternatív hajtásláncok a katonai gép- és harcjárművekben*

Napjaink egyik legismertebb célkitűzése az elektromobilitás megvalósítása. A polgári életben már most is számos tisztán villamos gépkocsi közlekedik, és szinte valamennyi modell elérhető hibrid meghajtással is. A katonai járművek életciklusa hosszabb a civil járművéknél, illetve mivel a haditechnika esetében sokkal hangsúlyosabb a megbízhatóság, a hadseregek elég konzervatíván kezelik az alternatív hajtásláncok kérdését. Ezzel együtt nem lehet kétségünk afelől, hogy ez a technológia is meg fog jelenni és el is fog terjedni a katonai alkalmazásban. A részben vagy egészben elektromos hajtásláncok szélesebb körű elterjedésének a jelenlegi legnagyobb korlátja az akkumulátorok szerény energia-sűrűsége.

A villanymotor önmagában nézve az ideális erőforrás csaknem minden szárazföldi jármű számára. Akár 90 %-ot meghaladó hatásfokkal képes a villamos energiát mozgási energiává alakítani, miközben a korszerű benzinmotorok átlagos hatásfoka 24 %, a dízeleké pedig 36 %. A villanymotornak lényegesen kedvezőbb a fajlagos tömegarányos teljesítménye, mint a dugattyús motorok bármelyikének, átlagosan 5 kW/kg [117], míg ez utóbbiak 0,5 – 2,5 közötti értékre képesek csupán. A villanymotor nyomatéka már álló helyzetben is jelentkezik és a fordulatszámától függetlenül csaknem konstans, míg a dugattyús motorok 5-700 fordulat/perc alatt nem is képesek működni, és a teljesítmény, illetve nyomaték karakterisztikájuk is egyenetlen. Végül, de nem utolsósorban a villanymotor szerkezetileg jóval egyszerűbb még a legegyszerűbb benzinmotornál is, így olcsón gyártható, alig igényel karbantartást, mégis igen megbízható, az MTBF⁸⁶ értéke típustól függően jellemzően több ezer óra [21]. Ez utóbbiak különösen vonzóvá teszik a villanymotorokat a katonai alkalmazás szempontjából.

Mindezek ellenére az akkumulátoros energia-tárolás rendkívül gyenge energia-sűrűségének és az ebből fakadó korlátozott hatótávolságnak köszönhetően a tisztán villamos hajtásláncú gépjárművek csak igen lassan terjednek a közutakon, míg ilyen típusú kimondottan katonai járművet még egyáltalán nem rendszeresítettek. Mindeközben a különféle hibrid megoldások a fénykorukat élik. Bár a villanymotor beiktatása a dugattyús motor hajtásláncába tovább komplikálja a szerkezetet és így növeli a meghibásodás esélyét,

⁸⁶ Mean Time Between Failures – Két meghibásodás között eltelt átlagos idő.

mégis számos kedvező tulajdonsággal bír. Mivel a villanymotor képes azokban a fordulatszám-tartományokban plusz nyomatékot biztosítani, ahol a dugattyús motor erőtlen, nagyban javítja a jármű dinamikáját és csökkenti a tüzelőanyag-felhasználást, átvitt értelemben a károsanyag-kibocsátást [118, 73. o.].

A katonai járművek várható elektrifikációja szempontjából első fecskének tekinthetők a tisztán villamos hajtású motorkerékpárok. Ilyenből néhány típus már átesett a csapatpróbákon és valószínűleg hamarosan rendszeresítik őket a különleges erőknél [119]. Az elektromos motorral közlekedő katonák terepen is gyorsan, de jelentős hang és hőhatás nélkül, így nehezen észrevehetően tudnak megközelíteni ellenséges célpontokat, majd onnan ugyanígy távozni. Ezzel az elektromos motorkerékpár ideális eszköze a beszivárgásnak, a szabotázsakcióknak és a gerilla harcmodorú rajtaütéseknek. Bár az ukrán hadsereg hivatalosan nem rendszeresített ilyeneket, de az orosz-ukrán háború kezdetén a gyakorlatban is több alkalommal, dokumentáltan sikeresen alkalmaztak elektromos motorkerékpárokat az orosz páncélosok ellen [120].



28. ábra: Ukrán katonák egy ukrán gyártmányú Delfast típusú elektromos crossmotorral és amerikai Javelin rakétavetővel felfegyverkezve 2022 májusában [120]

Ugyan ez utóbbi nem elsődleges szempont a katonai járműveknél, de a hibrid meghajtás dinamikája okán is terjed ez a megoldás. A francia hadsereg egy nagyívű program keretében 10 éven belül a katonai tehergépjármű-flottájának nagyobbik részét hibriddé tervezi átalakítani [121], de már harcjármű is akad hibrid hajtáslánccal. Az Egyesült Államok a jelenlegi M1 Abrams harckocsik utódjaként egyelőre csak fejleszti az AbramsX néven, a következő évtizedek amerikai MBT⁸⁷-jét. A számos fejlesztés mellett elhagyták a korábban sok kritikát kapott gázturbinát és helyette egy dízel-elektromos hibrid meghajtást alkalmaztak [122].



29. ábra: A hibrid hajtáslánccal szerelt AbramsX harckocsi prototípusa [122]

Látható, hogy miként az élet legtöbb területén, a járműfejlesztés és még hangsúlyosabban a harcjármű fejlesztések során egyre több villamos berendezés kerül beépítésre, ami további terhet ró a fedélzeti elektromos energia ellátó rendszerekre. Az elektromos motorok is egyre inkább szerephez jutnak a katonai járművek hajtásláncában, ami újabb lökést adhat a fedélzeti villamos rendszerek teljesítményének bővítése felé.

⁸⁷ Main Battle Tank – jelentése fő harckocsi, de mivel más harckocsi kategória jelenleg egyébként sincs alkalmazásban, tartalmilag helyesebb az alapharckocsi kifejezés.

3.6. A tábori elhelyezés terén várható villamosenergia-igény változása

A vizsgált területek közül a tábori elhelyezés során jelentkező villamosenergia-igény terén várható a legkisebb változás a közeli jövőben. Itt az alkalmazott eszközök, berendezések szinte minden esetben katonai használatba vett hagyományos polgári eszközök, vagy háztartási, ipari eszközök katonai környezetre adaptált változatai. Márpedig a háztartási eszközök, a fűtés és a melegvíz előállítás kivételével mind villamos működésűek, ennek megfelelően a korszerű tábori elhelyezési eszközök területén is már szinte minden más energiaforrást kiszorítottak a villamos berendezések, sőt itt még a fűtés és melegvíz előállítás is jelentős mértékben támaszkodik a villamos energiára. A fentieknek megfelelően új típusú elhelyezési eszközök megjelenése és elterjedése nem valószínűsíthető néhány éves időtávlatban.

Az információs hadviselés jelentőségének növekedésével párhuzamosan a hadseregek részéről folyamatosan jelen lesz az igény az egyre nagyobb teljesítményű infokommunikációs eszközök iránt. Ugyanakkor mivel a kisugárzással működő eszközöknél az elektronikus hadviselés elvárásainak megfelelően a fejlesztők törekednek a mindenkori minimálisan elégséges rádiófrekvenciás teljesítmény létrehozására, nem várható, hogy radikálisan nőne az alkalmazott eszközök üzemi villamos teljesítmény-felvétele. Az információt tároló és feldolgozó számítástechnikai eszközök teljesítménye is nőni fog a belátható jövőben, de az alkalmazott új technológiák (például a processzoroknál használt csíkszélesség csökkenése, vagy a HDD helyett alkalmazott SSD-k) miatt a villamos teljesítményigény itt sem fog szignifikáns növekedést hozni.

Ha viszont egy kicsit jobban előre tekintve próbáljuk a katonai táborok villamosenergia-igényét megbecsülni, akkor jelentős növekedést hozhatnak az alábbiak:

- Drónok szélesebb körű elterjedése, új típusú, pl. logisztikai drónok megjelenése;
- UGV-k megjelenése;
- MI megjelenése a taktikai C4I rendszerekben;
- Terepi 3D nyomtatók megjelenése.

A kisméretű taktikai UAV-k és UGV-k a feladatuktól függetlenül többnyire elektromos hajtásúak és azok is maradnak belátható ideig, mert a dugattyús motoros, és még inkább a gázturbinás eszközök nem szakcsapatok, hanem átlagos szárazföldi alakulatok által történő üzemeltetése nem lehetséges azok komplexitása miatt. A villamos meghajtású eszközök viszont jelentős mennyiségű villamos energiát igényelnek, tömeges elterjedésük esetén az akkumulátoraik feltöltése már érezhető terhelést fog jelenteni a tábori villamos hálózatokra.

Szintén triviális, hogy a különféle MI rendszerek elterjednek a hadviselés minden szintjén, és még a taktikai eszközökben is megjelennek. Viszont egy MI futtatására is alkalmas számítógép értelemszerűen nagy teljesítményű és nagy fogyasztású is [123]. Az MI megjelenése az infokommunikációban, a fegyverrendszerekben, vagy akár a hadszíntéri energetikai területén szintén érzékelhető módon meg fogja emelni az adott eszköz áramfelvételét.

Valamennyi haderőnek, továbbá az EDA-nak és a NATO STO-nak is kutatás-fejlesztési fókuszterülete a hadszíntéri 3D nyomtatás [124]. A technológia által lehetségessé válhatna bizonyos alkatrészek műveleti területen történő előállítás, így nem kellene azokat hatalmas logisztikai költséggel adott esetben egy másik kontinensről odaszállítani. Az eljárás egyik árnyoldala, hogy a fémnyomtatás (a katonai eszközök többségében a nagy terhelésnek kitett elemek szinte kivétel nélkül fémből vannak) a fémpor (vagy filament alapanyag) nagy energiával (többnyire lézerrel) történő megolvasztására épül.

Megvizsgáltam egy az iparban igen elterjedt EOS gyártmányú porágyas technológiát alkalmazó nyomtatócsalád paramétereit. A sorozat legkisebb tagja, az M 100-as mindössze 10 cm-es tárgyak előállítására képes, és a működés közbeni villamos teljesítmény-felvétele 0,6-1,7 kW [125]. A legnagyobb M 400, még mindig csak 40 cm-es tárgyakat képes legyártani, de ez már 16-50 kW közötti fogyasztást produkál. Ehhez képest a nyomtatás ideje órákban mérhető, így egy nagyobb alkatrész előállítása akár több 100 kWh energiát is felemészthet.

Minden fentebb sorolt eszköz esetében lehetséges megoldás, hogy azok tábori üzemeltetéséhez egy külön dedikált aggregátort telepítenek, de ez nyilvánvalóan további nem kívánatos terhelést okozna az üzemanyag-ellátás rendszerében, illetve nagy mértékben csökkentené a csapatok autonóm tevékenységi idejét.

3.7. Összegzés

Ebben a fejezetben áttekintettem a műveleti terület három szegmensében – az egyéni felszerelés részeként, a gép- és harcjárművek fedélzeti rendszereként és a tábori elhelyezés biztosítása érdekében használt villamos eszközök, berendezések teljesítményigényét, amely alapján meghatározhatóak bizonyos sarokszámok és tendenciák.

A tábori elhelyezés során több eltérő és empirikus forrás is csaknem azonos mennyiségű, személyenként 2,8 - 3,6 kW villamos teljesítmény biztosítását javasolja, így a tendenciák figyelembevételével a 3,6 kW/fő értéket tekintem a továbbiakban irányadónak.

A táborok villamos hálózatának méretezéskor azonban figyelembe kell venni, hogy ez a teljesítmény csupán a személyi állomány elhelyezésére, azok harckészültségének fenntartására elég. A táborokban telepített infokommunikációs infrastruktúra általában saját energia-ellátással rendelkezik, de lehetnek olyan rendszerek (például tartós település esetében kiépített tábori távbeszélő szolgáltatás), amelyek mégis az általános „elhelyezési” villamos hálózatról kapják az energiát. A 3,6 kW/fő érték egyébként is csak a műveleti területen elsődlegesen ténykedő, „harcoló” alakulatok katonáira vonatkozik. Különleges rendeltetésű alegységek, például a nyomtatókkal és stúdióeszközökkel tevékenykedő PSYOPS vagy a speciális műszereket, szerszámokat használó kiszolgáló-javító alegységek ettől lényegesen nagyobb fogyasztást is produkálhatnak, amelyhez nem minden esetben telepítenek saját villamosenergia-ellátó rendszert.

Az elmúlt néhány évtizedben a tábori elhelyezés a korábbi javarészt fosszilis üzemanyagokra épülő technológiája szinte teljes egészében áttért a könnyebben kezelhető és egységes NATO forrásra épülő villamos technikára. Ugyanakkor éppen azért, mert a tábori elhelyezés infrastruktúrája terén lényegében 100 %-os a villamosítás, az elmúlt időszak jelentős növekménye után csak lassú növekedés várható. A polgári élet energetikai trendjei [2], illetve az éghajlat változása nyomán [67, 9-17. o.] a jelenlegi technológiai szinten is várható egy lassú növekedés, viszont UAV-k, UGV, az MI és a 3D nyomtatás olyan technológiák, amelyek megjelenésekor nem az a kérdés, hogy bekövetkezik-e, hanem az, hogy mikor, mind fokozottan energiaigényesek. Ezek a változások tehát a jelenlegi trendek alapján szinte egészen biztosan bekövetkeznek, aminek köszönhetően jelentős mértékben nőni fog a szárazföldi csapatok villamosenergia-igénye és újra kell gondolni a villamos ellátás eszközrendszerét, eljárásrendjét és a logisztikai támogatást.

A katonai gép- és harcjárművek fedélzeti rendszereinek villamos teljesítményigényéről nincsenek megbízható és kellően részletes források, így egyedül a villamos ellátó rendszer, elsősorban a generátorok teljesítményéből indulhattam ki. Sajnos a járművek villamos teljesítményigénye kapcsán nem határozható meg egy arányos (például tömegarányos) érték, mert a fogyasztó eszközök és rendszerek általában nem változnak a tömeggel arányosan. A motorvezérlő elektronika teljesítményigénye pl. alig függ a motor méretétől, azt elsősorban a vezérlőelemek száma határozza meg, tehát egy személygépkocsi motorelektronikája a komplexitástól függően akár több energiát is igényelhet, mint egy harcjármű. Hasonló módon, egységes rádióhálót feltételezve, egy taktikai rádió fogyasztása is független attól, hogy azt egy 15 tonnás lövészpáncélosba, vagy egy 60 tonnás harckocsiba építik be.

A tendencia ezzel szemben egyértelműen meghatározható. Hiteles mérési adatok hiányában az indukció módszerét alkalmaztam, azaz egyes konkrét járműveket vizsgáltam, és a megegyező eredmények révén általánosítottam az ott tapasztaltakat. Ezek alapján általános fejlesztési irány, hogy a katonai gép- és harcjárművek egyre több villamos berendezést hordoznak, illetve számos már meglévő, korábban nem villamos rendszer kerül villamosításra. Ennek nyomán itt is bizonyítottnak látom, hogy a katonai gép- és harcjárművek esetében a fedélzeti villamosenergia-igény a belátható időben folyamatosan nőni fog. Ugyanakkor tény, hogy a villamos rendszerek tömege még egy személygépkocsi esetében is csak néhány százalék, míg az erősen páncélozott eszközök esetében ez arányában még sokkal kisebb, így nincs jelentős technikai akadály annak, hogy további villamos eszközök kerüljenek integrálásra és a fedélzeti villamos rendszerek teljesítménye is növekedjen.

Ennek kicsit ellentmond, hogy a fedélzeti villamos rendszerek energiaigényét nagyban befolyásolja a jármű funkciója is. Egy-egy rendszer beépítése így önmagában is jelentősen megemelheti a jármű teljes villamosenergia-igényét. Például a missziós feladatokra korábban Magyarországon átalakított BTR-80 harcjárművek esetében az új eszközök, elsősorban az esszenciálisan szükséges C-RCIED zavaró beépítése annyira megterhelte a fedélzeti elektromos rendszert, hogy egy további akkumulátor beépítése vált szükségessé [126]. Szerencsére az akkumulátor töltéséhez nem kellett cserélni a generátort, mivel az – a BTR-80 bázisjármű jellege miatt – már eleve túlméretezett.

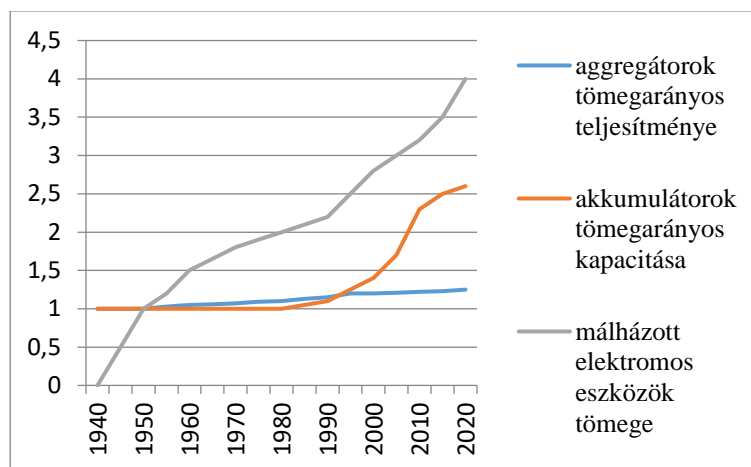
A személyi felszerelés esetében sincs megalapozottsága annak, hogy egyetlen számadattal reprezentáljuk az ott szükséges villamosenergia-mennyiséget. Ez jelenleg is igen erősen függ az adott haderőtől és az aktuális feladattól [80]. Az bizonyos, hogy a felszerelés tömegének már most is jelentős részét képezik a katona által hordozott elektromos működésű eszközök és különösképpen az azokhoz málházott akkumulátorok. Ennek tömegét a különféle források, a NATO-ban alapvetően elvárt 72 órás autonóm ténykedés során 2-10 kg [81], [127], [128] között adják meg, a leggyakrabban 6-8 kg-al számolnak. A legszélsőségesebb dokumentált eset, egy brit lövészegységhez kapcsolódik, amikor a mindössze 36 órás járőr feladatra 12,3 kg akkumulátort málháztak [127] személyenként.

Jelenleg az elsődleges villamosenergia-fogyasztó a taktikai rádió, amely a kisugárzáson alapuló működés okán a pillanatnyi teljesítményigény terén is az első, illetve mivel egy művelet alatt csaknem állandóan bekapcsolt állapotban van, a misszió során összesen elhasznált energia tekintetében is messze megelőzi a többi eszközt. Amennyiben – részben vagy egészben – megvalósul a digitális katona koncepciója, az a rádió megváltozott működési

mechanizmusa és a kapcsolt szenzorok áramfelvétele révén azonnali jelentős – csaknem kétszeres – átlagos teljesítményigény növekedést fog eredményezni. Ez azért súlyos probléma, mert a katona teherbírása erősen limitált. A jelentős súlyú felszerelés lassítja a katonát, ami által annak harcértéke csökken, ráadásul az akár 30-40 kg felszerelés hosszabb távon történő cipelése még egy egészséges fiatal férfi szervezetét is megviseli.

Mínt hogy a villamos berendezések növekvő tömege összességében elhanyagolható hatással jár az adott eszköz menetteljesítményére és harcértékére, de ha egy katonának az infokommunikációs berendezés meghatározott ideig tartó üzemeltetéséhez akár csak 1-2 kg-al több akkumulátort kell málháznia, mint korábban, az már számottevő plusz terhet jelent. Ez mindenképpen a katona harcértékének csökkenésével jár, hiszen a nagyobb teher miatt csökken a mozgékonyasága, és ezt a felszerelés több elemének tömegcsökkenésével sem lehet kompenzálni, hiszen az már így is a végletekig van optimalizálva. A fejlesztési tendenciák mindenesetre azt mutatják, hogy a magasabb fokú hálózatos hadviselés iránti igény, akár az 5-10 %-os málházott tehernövekedést is elfogadhatónak tekinti, vagyis azzal számolnak, hogy a hálózatos működés hatékonysága kompenzálni képes a felszerelés tömegének növekedését.

A 24. ábra jól szemlélteti, hogy az elmúlt fél évszázadban, miután áttértek a nagy teljesítményű dízelmotorokra, az aggregátorok hatékonysága (tömegarányos teljesítménye) semmit sem változott. Az akkumulátorok tömegarányos energia-sűrűségében az ólomsavas technológia után a nikkal alapú technológiák komoly fejlődést, majd a lítiumos technológiák is jelentős felívelést hoztak, de még ez sem tarthat lépést a hálózatos taktikai rádiók és általában a digitalizáció jelentette megnövekedett infokommunikációs igények támasztotta, a felszerelésben bekövetkező tömegnövekedéssel.



30. ábra: Az aggregátorok, az akkumulátorok és a személyi felszerelésként málházott eszközök tömegének normalizált változása (saját szerkesztés)

3.7.1. A pilóta nélküli eszközök hatása

Külön részt érdemelnek a drónok, amelyek akár egy katona vagy egy harcjármű felszerelésének is részét képezhetik, de lehetnek a tábori kiszolgálás eszközei is. Az orosz-ukrán háború egyik legnagyobb tanulsága éppen az, hogy a pilóta nélküli repülőeszközök már nem csak a stratégiai felderítés és a precíziós csapások eszközei, hanem azok a taktikai szinten is döntő tényezőnek bizonyulnak [129, 96. o.]. Ebben a konfliktusban a teoretikusok által nem várt módon a jelentős alkalmazási veszteségek okán át kell értékelni a harckocsik szerepét és jelentőségét, miközben a tüzérség jelentősége szintén kevesek által várt módon újra felértékelődött⁸⁸. Márpedig napjainkban a tüzérség legfontosabb célfelderítő és irányást segítő, pontosító eszközei is a drónok. Az is bebizonyosodott, hogy akár még improvizált UAV-s megoldások is alkalmasak a taktikai szintű csapásmérésre, és máris megindult a drónok egy új generációjának fejlesztése. Itt nyilvánvalóan a katonák vagy harcjárművek által hordozni kényszerült tömeget növeli a drón tömege, és – hacsak nem öngyilkos drónról⁸⁹ van szó – az ahhoz tartozó további akkumulátorok, ami elsősorban megint csak a gyalogosan harcolók számára jelent nagy nehézséget.

A nemrégiben lezajlott 2. karabahi háború egyik döntő tényezői már a minden korábbinál nagyobb arányban használt és önálló drón-alegységekbe szervezett UAV-k voltak [130]. Az orosz-ukrán háborúban olyan rég nem látott (és a szakértők által nem várt) ember- és eszköztömegek vesznek részt, hogy a drónok jelentős számuk ellenére önmagukban itt nem jelenthetnek döntő tényezőt, de a jelentőségük mindenképpen nagyot nőtt. Nyilvánvaló tendencia tehát, hogy a drónok jelentősége a katonai műveletek minden szintjén, a stratégiai szinttől egészen a raj-szintű hadviselésig nőni fog. A magasabb szinten használt és általában nagyobb méretű UAV-k a technológiájukat tekintve erősen hasonlítanak az ember által irányított repülőeszközökhöz, így azokat csak speciálisan kiképzett szakemberek képesek kiszolgálni. A kisebb méretű, taktikai drónok megjelenését viszont éppen a villamos meghajtás fejlődése tette lehetővé. Az ilyen eszközök számos paraméterükben (sebesség, magasság, repülési idő) elmaradnak a hagyományos repülőgép-hajtóművek (elsősorban a gázturbinák) teljesítményétől, de nagy előnyük, hogy a kiszolgálásukhoz nem kell speciálisan képzett személyzet. Az elektromos motorral meghajtott UAV-k kiszolgálásához és irányításához lényegesen rövidebb kiképzést követően alkalmasak lesznek az egyszerű

⁸⁸ Érdekes, és az elemzők szerint ugyancsak nem várt módon a légielő hatékonysága igen csekély.

⁸⁹ Az angolszász irodalomban gyakran használják a loitering ammunition (kb. cirkáló lövedék) kifejezést, ami a hadműveleti szinten használt eszközökre igaz, de a taktikai eszközöknél nincs igény a hosszúságú repülésre, így itt a lényegét jobban kifejezi az „öngyilkos” jelző.

katonák és nem szükséges a szárazföldi alegységek szintjére levinni a rendkívül bonyolult és költséges repülő-infrastruktúrát.

Már csapatpróbán vannak a közeljövő UGV eszközei is, ezek némelyike akár már az orosz-ukrán háború során hadrendbe állhat [131]. Ezek autonómiája igen eltérő, a közeljövő eszközei még valószínűleg csak igen korlátozott önállósággal rendelkeznek majd, és még az sem dőlt el, hogy milyen hajtáslánccal szerelik fel őket. Valószínűsíthető, hogy a villamos meghajtás polgári problémái alapján a nagyobb méretű (nagyobb teherbírású és hatótávolságú) eszközök a hasonló kategóriájú ember által vezetett járművek technológiájára épülnek, így azok logisztikája az üzemanyag-ellátás hatáskörébe tartozik majd. A szintén terjedő egy személyhez, vagy egy kisalegységhez kötött, kisebb méretű eszközöknél viszont az egyszerűbb kiszolgálás mellett azok néma üzeme is előnyös, így ott egyértelműen a villamos hajtás a praktikusabb. Itt egyes eszközök megjelenése akár azt is hozhatja magával, hogy az akkumulátorok korlátozott energia-sűrűsége okozta hatótávolság-limit miatt csökkenhet az alkalmazó alakulat menetteljesítménye, amit nyilvánvalóan csak valamilyen komoly vélt vagy valós képességnövekedés ellensúlyozhat.

Összefoglalva, a korszerű szárazföldi csapatok esetében minden vizsgált területen tendenciózus villamosenergia-igény növekedés várható. A tábori elhelyezés tekintetében a növekedést okozó eszközök lassú terjedése miatt ennek üteme mérsékelt marad, de a katonai gép- és harcjárművek esetében már komolyabb ütemben fog nőni a villamos energia iránti igény, míg a személyi felszerelés vonatkozásában igen jelentős lesz a villamosenergia-felhasználás növekménye már a közeli jövőben is.

4. A terepi villamosenergia-ellátás nehézségeinek elvi és gyakorlati csökkentési lehetőségei

Amint az a korábbi fejezetekből látszik, a villamos energia előállítása műveleti területen, jelenleg is komoly feladatot ró a logisztikára és a növekvő igények mellett, ezek a hagyományos megoldások egyre nehezebben lesznek képesek fenntartani a rendszert. Ahogy a britek is Cézár utánpótlási vonalait támadták, úgy ez az eljárás a modern hadviselésnek is szerves részét képezi. Az orosz-ukrán konfliktus során is előszeretettel támadják egymás üzemanyagtárolóit, de ha a hadviselő felek között erős aszimmetria van, úgy a gerilla-egységek a szűkös erőforrásaikat egyre inkább a logisztikára koncentrálják, mert azzal nagyobb nehézségeket okoznak, mintha az első vonalas harcoló alakulatokat próbálnák támadni. Vagyis minden olyan megoldás, ami csökkenti a szükséges utánpótlás mennyiségét, az műveleti előnyt jelent a saját csapataink számára, mert tovább képesek fenntartani a műveleti autonómiájukat.



31. ábra: Gerillák által megsemmisített NATO utánpótlási járműoszlop. Afganisztán, Samangan tartomány, 2012 [132]

A műveleti terület sajátosságai nagyban meghatározzák, az utánpótlás logisztikai rendszerét. A Közel-Keleten valószínűleg jóval egyszerűbb a közelből üzemanyagot szállítani, mint jó minőségű élelmiszert, de az üzemanyag mindig nagy mennyiségben kell és ha nincs belőle elég, az komolyan veszélyezteti az adott csapatok harckészségét. Amint láttuk, a jelen rendszerben a villamos energia biztosítása teljes egészében az üzemanyag-ellátáson múlik, így minden olyan villamos energetikai megoldás, ami csökkenti ezt a függőséget, az

kedvező hatással van a csapatok műveleti képességeire. Az alábbiakban összegyűjtöttem mindazokat az elvi megoldásokat, amik a villamos energia oldaláról csökkenthetik a felhasznált üzemanyag mennyiségét:

- A villamosenergia-tárolók energia-sűrűségének növelése;
- A villamosenergia-tárolók szabványosítása;
- Energetikailag hatékonyabb villamos fogyasztó eszközök rendszeresítése;
- A villamosenergia-termelő eszközök hatékonyságának növelése;
- In situ villamosenergia-termelés mobil eszközökkel;
- Energia-menedzsment.

A továbbiakban az alkalmazható technikák és eljárások értékelésénél lehetőség szerint az ún. TRL⁹⁰ rendszert fogom alkalmazni. Ezt eredetileg az USA haditechnikai fejlesztéseinek nyomán követésére használták, de mára a civil K+F területén is általánosan elismerik és használják, mivel általa jól megítélhető, hogy hol tart egy adott fejlesztés az alap kutatások megkezdése és a piaci megjelenés közötti rögös úton.

bevezetés	TRL 9	működő rendszer
	TRL 8	gyártás technologizálása
	TRL 7	prototípus demonstráció a tervezett működési környezetben
fejlesztés	TRL 6	technológiai demonstráció releváns környezetben
	TRL 5	technológiai validáció releváns környezetben
	TRL 4	laboratóriumi technológiai validáció
kutatás	TRL 3	konceptió kísérleti igazolása
	TRL 2	konceptió kialakítása
	TRL 1	alapelvek megfigyelése

13. táblázat: Az egyes technológiákhoz kapcsolódó készenlét osztályozása (saját szerkesztés)

4.1. A villamosenergia-tárolók energia-sűrűségének növelése

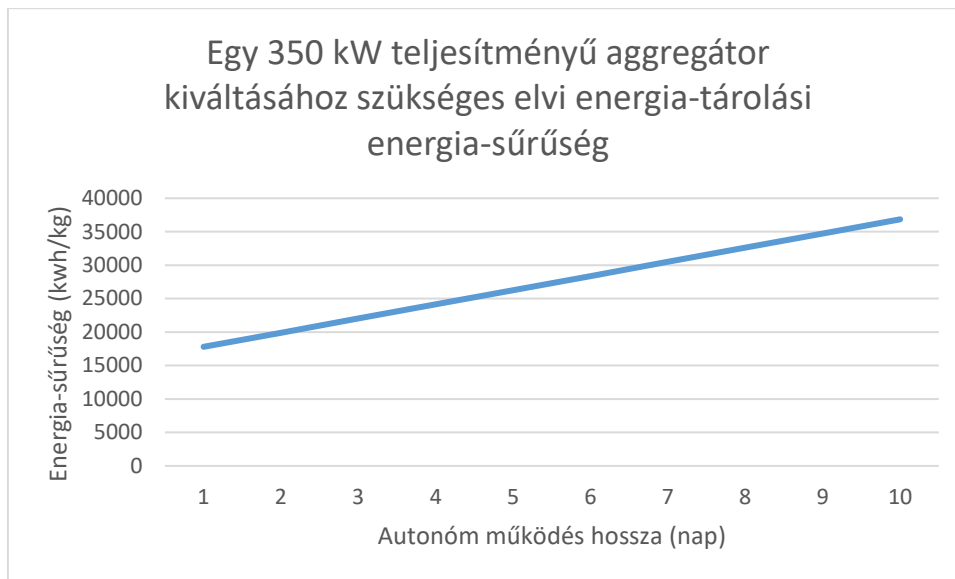
A villamosenergia-tárolók energia-sűrűségének növelése egy olyan probléma, amire évek óta próbál megoldást találni a világ tudománya. Ez nem csupán katonai szempontból lenne fontos, de nagyban elősegíthetné a civil mobil infokommunikáció fejlődését és az elektromobilitás elterjedését is. A katonai szempontok alapján az energia-tárolás energia-sűrűségének akár csak kis mértékű növelése is könnyítene a katonák személyi felszerelésének tömegén, ami azonnali pozitív hatással lenne azok harci képességére. Ha egy küldetéshez

⁹⁰ Technical Readiness Level – Technikai készültségi szint.

szükséges málházott akkumulátoroknak a tömegét akár csak 10 %-al csökkenteni lehetne, annak helyére két tár lőszer vagy egy teljes napi élelem-adag kerülhetne, ami a gyalogos katonák jelenlegi 2-3 napos autonóm tevékenységi idejét tekintve már számottevőnek mondható.

A gép- és harcjárművek esetében a villamosenergia-tárolás hatékonyságának kis mértékű növekedése nem hozna jelentős változást sem azok felépítésében, sem azok használati módjában. Viszont nagyobb arányú, 50 %-os vagy azt meghaladó növekedés az energia-sűrűségben robbanásszerűen lökné előre a részben, vagy egészben villamos hajtásláncok elterjedését [133], bár ezek tábori körülmények közötti feltöltése a meglévő aggregátoros technológiákkal még igen komoly nehézségekbe ütközne. A villamos energia tárolási hatékonyságának még nagyobb arányú javulása esetén a tábori villamosenergia-rendszert pedig részben vagy egészben függetleníteni lehetne az aggregátoroktól. A 26. ábrán látható, hogy ha az energia-tárolás hatékonyságát a jelenlegi százszorosára tudnánk emelni, azzal azonos tömeg mellett néhány napra teljesen ki lehetne váltani egy teljes teljesítménnyel üzemelő dízelaggregátort és a működéséhez szükséges üzemanyagot. Amennyiben abból az életszerű feltételezésből indulunk ki, hogy az aggregátor működési ideje alatt legtöbbször a névleges teljesítményének 20-80 %-án üzemel, az még inkább a tárolt energiának kedvez, hiszen az aggregátor 50 %-os terhelés mellett (az aggregátor névleges teljesítményének függvényében) csupán 10-20 %-al fogyaszt kevesebb üzemanyagot, mintha a névleges teljesítményen működne [22, 39. o.].

Bár a multinacionális nagyvállalatok olyan elképesztő összegeket költenek a villamosenergia-tárolás kutatására, amelyet a legtöbb haderő nem engedhet meg magának, a lehetőségek megismerésének érdekében mégis számba vettem az összes elvi lehetőséget.



32. ábra: Egy folyamatosan működő 350 kW teljesítményű és 15 tonna tömegű dízelaggregátor kiváltásához szükséges elvi tömegarányos energia-sűrűség a tevékenységi idő függvényében (0,3 liter/kWh, 0,84 kg/liter dízel-adatokkal számolva – saját szerkesztés)

4.1.1. A villamos energia natív tárolásának elvi lehetőségei

Tulajdonképpen a villamos energia natív módon, tehát villamos töltések formájában alig tárolható. Egyedül a szuperkondenzátorok és a szupravezető tekercsek azok az eszközök, ahol magukat a villamos töltéseket tudjuk tárolni. A szuperkondenzátorokkal kapcsolatos nehézségeket a 2.2.3 pontban már tárgyaltam, a szupravezető tekercsek pedig egyelőre csak a laboratóriumokban fordulnak elő, mivel a szupravezetés jelenleg csak extrém alacsony hőmérsékleten, többnyire folyékony nitrogénnel hűtött rendszerekben valósítható meg. Amennyiben létrejön a szupravezetés, akkor már gyakorlatilag végtelen ideig lehet veszteség nélkül tárolni az energiát, azonban az ilyen eszközök energia-sűrűsége igen alacsony, ráadásul a hűtés jelentős mennyiségű energiát emészt fel [134]. Jelenlegi formájukban a TRL 3-5 szintjén járnak, később, mint teljesítmény-tárolók, a hálózati feszültség stabilizálására talán alkalmasak lehetnek, de a közeli jövőben nem is várható, hogy ez a technológia energia-tárolási céllal jelentősebb szerephez jusson.

A szuperkondenzátorok lényegében kiforrott (TRL 9) termékek, és az általuk nyújtott teljesítmény-sűrűségnek van is katonai relevanciája, de a technológia energia-tárolási célra jelenleg szintén csak rendkívül korlátozottan alkalmas. Hosszabb távon ugyan van még potenciál a szuperkondenzátorok fejlesztésében, most a grafén alkalmazása és az elektrokémiai folyamatokkal kombinált eszközök, a hibrid szuperkondenzátorok kutatása hangsúlyos [135], de akkora a szakadék a jelenlegi technológiával megvalósítható szuperkondenzátoros eszközök és a hagyományos elektrokémiai eszközök energia-sűrűsége

között, ami kizárja, hogy belátható időn belül a katonai célú energia-tárolási alkalmazása megvalósuljon.

E fenti kettőn kívül, minden más esetben a villamos energiát átalakítjuk valamilyen más formájú energiává, majd azt tároljuk. Szükség esetén így a tárolt energiát ismét villamos energiává kell alakítani. Ez a kétszeri energiakonverzió mindenképpen időt vesz igénybe, így limitálja a technológiák által elérhető teljesítmény-sűrűséget, másfelől a konverzió során mindig fellép veszteség is, ami pedig a hatásfokot rontja. Az értekezés elején említettem, hogy a villamosság szinte bármilyen más energiaformává át- és visszaalakítható, így teoretikusan valamennyi lehetőséget számba veszem.

4.1.2. Mechanikus energia-tárolás

A mechanikus energia-tárolás során a villamos energiát átalakítjuk valamilyen mechanikus energiává, és azt tároljuk, majd szükség esetén visszaalakítjuk. Az egyik legtipikusabb megvalósítási formája az ún. súlytároló. Ilyenkor valamilyen tömeget a magasba kell juttatni, például egy villanymotorral egy nagyobb súlyt fel kell csörlőzni, majd mikor szükséges, a lefelé igyekvő tömeggel meg lehet forgatni egy generátort. A technológia hatásfoka a villamos forgógépek kitűnő hatásfoka miatt elég jó, de nagy és költséges infrastruktúrát igényel. A civil villamos hálózatokban létezik gyakorlati megvalósítása, a megújuló forrásokra jellemző egyenetlenségek kiegyenlítésére használják [136], de mérete és statikus volta lényegében kizárja a műveleti területen történő alkalmazást.

Ennél is elterjedtebb a szintén elsősorban megújuló forrásuk mellett alkalmazott ún. szivattyús-tározós rendszer, ahol a pillanatnyilag fel nem használt energiával vizet szivattyúznak egy magasabban elhelyezkedő tározóba, majd szükség esetén onnan turbinákon keresztül engedik le. A technológia TRL 9-es, mégis kissé meglepő, hogy ilyen rendszert már katonai célra is alkalmaznak. Egy a Kanári-szigeteken elhelyezkedő bázist látnak el ilyen módon energiával [137], de a műveleti célú alkalmazása az infrastrukturális igények miatt nyilvánvalóan nem megvalósítható. Ugyanakkor a letárolt energia-mennyiség tekintetében, 90 % feletti részesedéssel ezek a rendszerek dominálják a civil energia-tárolási piacot [138].

A lendkerekes rendszerek szintén kinetikus energiát tárolnak egy nagy tömegű forgó lendkerékben. A gyorsításra használt motor és az energia kinyerésére használt generátor⁹¹ jó hatásfoka itt is biztosítja a teljes rendszer jó hatásfokát, de a méret és a mechanikus súrlódás

⁹¹ A kettő funkciót akár egyetlen villamos forgógéppel is meg lehet valósítani.

okozta gyors „kisülés” miatt ez sem alkalmas műveleti területen történő alkalmazásra. Katonai alkalmazása mégis van, a legújabb amerikai repülőgép-hordozó hajókon a gőzkatapultot váltották fel ilyen rendszerekkel [139].

Szintén a mechanikus tárolás egyik módja a sűrített levegős, amelyet már szintén alkalmaznak hálózati terhelés kiegyenlítésére (TRL 9), de a tárolható energia mennyisége méretarányosan itt is elhanyagolható, így terepi, mobil megvalósítása sem célszerű.

4.1.3. Hőtárolók

A hőtárolás számos előnnyel kecsegtet, úgymint olcsó megvalósítás, természetes képződmények kihasználásának lehetősége, de a megoldás tömegarányos energia-sűrűsége tulajdonképpen rendkívül rossz így csak az ipar és a lakossági ellátás területein valószínűsíthető a további terjedése. Az ide tartozó eljárások többségének TRL szintje jelenleg csak 6-8 között mozog.

Az egyik leggyakoribb és legjobb tároló anyag a víz, melynek hőtároló kapacitása 1,159 kWh/m³K. A fázisváltás (halmazállapot változás) nélküli használható hőtartomány 0-100 °C [134]. Vagyis a folyékony víz elvi tárolási kapacitás maximuma 159 Wh/kg. Ez az érték természetesen a gyakorlatban lényegesen kisebb, ráadásul a működéshez jelentős méretű és tömegű hőszigetelés, a be- és kitároláshoz bonyolult berendezések szükségesek, így a teljes rendszer mérete és tömege lényegében semmilyen mobilitást nem tesz lehetővé, ami kizárja a műveleti területen történő alkalmazást.

4.1.4. Kémiai tárolók

Ezeknek a megoldásoknak a tudományos alapja, hogy villamos energia segítségével a víz bontása (hidrolízis) útján hidrogén termelhető, illetve szén-dioxid hozzáadásával akár metán, komplexebb kémiával metanol is előállítható. Ezek később elégetve, direkt hőenergiaként is hasznosíthatóak, de az üzemanyagcellák révén akár közvetlenül is visszaalakíthatóak villamos árammá. A vízbontás egyszerű és aránylag kicsi infrastruktúrát igénylő technológia, ráadásul a hidrogén helyszíni előállítása nem ellenkezik a NATO SFC-vel, viszont a komplexebb vegyi anyagok tábori körülmények között történő előállítása túlságosan infrastruktúra-igényes. A víz bontására és az üzemanyagcellák kialakítására számos technológia létezik jelenleg is, de ezek egy része a magas hőmérsékletű reakciók miatt csak az ipar számára lehetnek alkalmasak, de a klasszikus szobahőmérsékletű, lúgos elektrolízis, valamint a szintén

szobahőmérsékleten működő PEM⁹² üzemanyagcellák nem igényelnek ipari környezetet. Mivel az elektrolízis során létrejövő H₂ gáz többnyire úgyszólván sűrítve tárolódik, hatékony lehet a folyamatot enyhe túlnyomás alatt végrehajtani, mert az a teljes rendszer hatásfokát is javítja.

A teljes folyamat hatásfoka nem kimagasló. 1 m³ H₂ előállításához 4-7 kW villamos energia szükséges, így a hatásfok 65-82 %. Mivel a PEMFC⁹³ hatásfoka a gyakorlatban csak 40-50 % [134], így a teljes rendszeré a legjobb esetben is csak 30 % körül alakul. A teljes eljárásnak így is számottevő a berendezésigénye. Az elektrolízis során használt víznek tisztának kell lennie, különben hamar tönkremegy az eszköz, a folyamat során az elektródák anyaga is degradálódik, így idővel romlik a hatásfok. A keletkező hidrogéngázt többnyire nagy nyomáson, minimum 300 bar-on tárolják, ehhez több lépésben kell komprimálni. A PEM cella is érzékeny a szennyeződésre, a hidrogénben található kis tömegszázalékú kénes szennyeződés is igen hamar károsítja a membránt. A teljes rendszer ezzel együtt sem túl költséges, mert kommersz technikákra épül, egyedül a PEM cellában katalizátorként alkalmazott platina drága, ami költségvetési oldalról sokáig akadályozta (és jelenleg is gátolja) a technológia szélesebb körű terjedését.

Vannak viszont óriási előnyei is az eljárásnak. A hidrogén térfogatarányos energia-sűrűsége a tároló palack nyomásától függően igen jó, tömegarányos energia-sűrűsége pedig a hidrogén kis molekulatömege miatt kimondottan nagy. A legnagyobb előny azonban az, hogy a legtöbb versenytárs tárolási megoldásnál a kitérítéshez használt eszköz is része a tárolónak (így van az akkumulátorok esetében is), míg az üzemanyagcellák esetében csak a PEMFC-t kell a maximális teljesítményhez méretezni, a hidrogénpalackok tetszőleges alkalommal cserélhetők. Példának okáért, ha egy akkumulátoros rendszerrel 200 Wh-ás cellákból akarunk felépíteni egy 100 kWh-ás rendszert, akkor az elvárt teljesítmény-sűrűségtől függetlenül mindenképpen 500 darab akkumulátort kell felhasználni. Ezzel szemben egy PEMFC-s rendszerrel a PEM cella teljesítménye szabja meg annak méretét és tömegét és a megfelelő számú palack biztosításával 10, 100 vagy 1.000 kWh energia is biztosítható. Mindezeket túl a hidrogén igen jól skálázható, a néhány W-os teljesítménytől a több MW-os rendszerekig bármilyen összeállítás kialakítható.

Bár a platina még jelenleg is költségessé teszi a PEMFC alkalmazását, a technológia ipari méretekben már jelenleg is versenyképes a többi tárolási megoldással szemben. A műveleti villamos energia szempontjából ez nem releváns, de a hidrogénnek számos olyan előnye is

⁹² Proton Exchange Membrane – Protoncsere membrán.

⁹³ PEM Fuel Cell – PEM üzemanyagcella.

van, ami elősegíti a polgári terjedést, ami viszont nagy lendületet ad a fejlesztéseknek. Ilyen az, hogy önmagában is elégethető, de 5-10 %-os arányig a hálózat jelentős átalakítása nélkül bekeverhető a vezetékes földgázba (Power2Gas technológia) és az sem mellékes, hogy a kiürült földgáztározók révén a hidrogén olcsón tárolható ipari mennyiségben. Erre épül az 1. fejezetben is említett RESHUB projekt. A hidrogén alkalmazása a villamosenergia-tárolásra annyira kézenfekvő, hogy egyes szakértők már évek óta a szénhidrogén-alapú gazdaságot váltó hidrogén-alapú gazdaságról vízionálnak [140].

A hidrogén-alapú energia-tárolás műveleti területen történő alkalmazása az összetett technológia és a költséges PEMFC ellenére nagyon is lehetséges. A technológia általában 9-es TRL-ű, de a terepi használat terén legfeljebb TRL 6-7-ről beszélhetünk. A vízbontás tábori körülmények között is kivitelezhető, a PEMFC és a hidrogénpalackok pedig kompakt és jól skálázható kitárolási lehetőséget biztosítanak. Korábbi beosztásomban, mint az EDA E&E CapTech magyar képviselője én indítottam el egy Svájjal közös „B” kategóriás projektet⁹⁴, FUSS⁹⁵ néven, melynek célja az üzemanyagcellák személyi felszerelésbe történő integrálási lehetőségének igazolása volt. A magyar Természettudományi Kutatóközpont Anyagtudományi és Környezetkémiai Intézet és a svájci Inergio által közösen elkészített tanulmány alapján a PEMFC már jelenleg is képes lenne kiváltani az akkumulátorokat. Az elterjedésének igazi gátja az egyelőre magas költsége, amely viszont a civil hidrogén-infrastruktúra esetleges kiépülésével párhuzamosan jóval olcsóbbá válna [141].

Amennyiben a terepi zöld-hidrogén előállítás lehetőségétől eltekintünk, még a hátszorból szállított hidrogén sem okoz nagyobb logisztikai terhet, mint hasonló energia-mennyiség akkumulátor formájában történő kiszállítása, így egyedül a NATO SFC okozhat problémát – amennyiben a palackozott hidrogént üzemanyagként tekintjük.

A hidrogénnel kapcsolatban gyakran hangoztatott biztonsági aggályok sem megalapozottak. Közismert, hogy a hidrogén hajtású autók fejlesztésében élen járó Toyota tesztekkel igazolta, hogy a gépjárművek hidrogéntartályának sérülése kevésbé kockázatos, mint a benzintanké. Az is közismert és jól dokumentált, hogy a lítiumos akkumulátorok a becsapódó lövedék hatására felrobbannak [142], kigyulladnak, míg a FUSS projekt keretében a jelenlétemben végrehajtott teszt során az éles lőszerrel meglőtt kisméretű hidrogén-tartály

⁹⁴ Az EDA „A” projektekre az EDA szerződik, azokat a valamennyi tagállam által befizetett közös büdzséből finanszírozzák. A „B” projekteket kettő vagy több tagállam a saját költségvetéséből finanszírozza, az EDA csak adminisztratív támogatást nyújt.

⁹⁵ FUEl cell Soldier System – Üzemanyagcella a személyi rendszerekhez.

ilyen szempontból semleges viselkedett, csak a távozó gáz nyomása hatott a próbabábura, de a hidrogén alacsony viszkozitásának köszönhetően nem történt robbanás [141].



33. ábra: Az első képen a becsapódó 7,62 mm-es páncéltörő-gyújtó lövedék hatására a hidrogéngáz csak nagy nyomással távozik a palackból, míg a második képen a lövedék hatására a cseppfolyós bután be is robban (Zrínyi Média felvétele, MH Lőkísérleti Vizsgálóállomás, Táborfalva, 2023)

Bár jelenleg a kémiai alapú villamosenergia-tárolás szerepe még marginális, a hidrogénnel alapuló villamosenergia-ellátás még igen messze van az elméletileg elérhető maximális energia-sűrűségtől, tehát bőven van fejlesztési lehetőség. A terepi alkalmazás területén elsősorban a tárolás technológiája területén várható előrelépés. A legnagyobb energia-sűrűség a cseppfolyós kriogén hidrogénnel érhető el, de ennek kezelése műveleti területen nem életszerű. Ugyanakkor a jelenleg széles körben alkalmazott 300-350 bar-os hegesztett acélpalackokat lassan kiváltják az autóiparban kifejlesztett, akár 700 bar-os nyomást is elviselni képes szénszálas palackok, illetve nagy erővel fejlesztik a fém-abszorbens technikákat is⁹⁶. Fontos viszont, hogy a hidrogén jövőbeni katonai (és ezen belül értelemszerűen a műveleti) felhasználása nagyban függ a civil energiaipar változásaitól mivel terjedésének elsősorban már nem technológiai, hanem pénzügyi-gazdasági gátjai vannak.

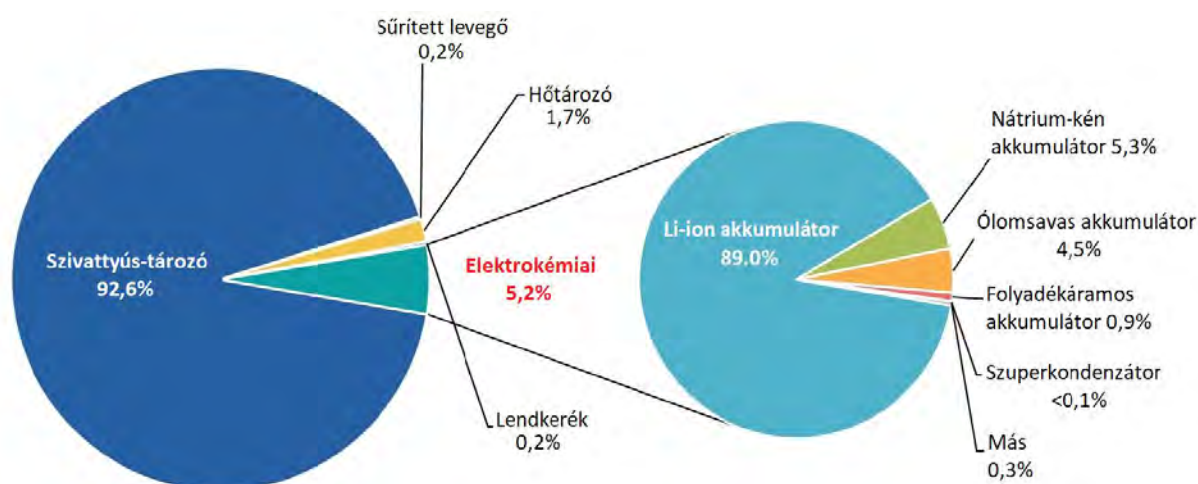
Kisebbségi forradalmat indíthatna el az a technológia, amelyik a NATO SFC-t szem előtt tartva engedné szélesebb körben alkalmazni a PEM-cellákat a terepen. Vagyis az F34-ből kellene hidrogént előállítani. Ez kémiaiilag megvalósítható, és voltak is ezzel kapcsolatos fejlesztési kísérletek, de kudarcot vallottak [143]. A problémát az okozta, hogy az eljárásához szükséges vegyipari berendezések túl nagyok és túlságosan energiaigényesek, ráadásul a végtermék hidrogén korántsem mondható tisztának, és a benne található, főleg kén-alapú szennyeződés gyorsan tönkreteszi a PEM- cellákat.

⁹⁶ A hidrogén molekulái annyira kicsik, hogy akár a fémek rácsterületében is elférnek. Ez az elnyelés (abszorpció) magas energia-sűrűséget tesz lehetővé, miközben a tároló eszközök jóval egyszerűbben kezelhetők, mint akár a cseppfolyós, akár a nagynyomású gáz halmazállapotú hidrogén.

4.1.5. Elektrokémiai tárolók

Jelenleg a villamosenergia tárolására alkalmas mobil eljárások közül az elektrokémiai a domináns. Jelen technikai szinten mobil alkalmazásra, ahol elsődleges szempont a fajlagos energia-sűrűség és a jó skálázhatóság ezen kívül csak a szuperkondenzátor és PEM jöhet szóba, de a korábban ismertett problémák miatt ezek szerepe marginális.

Az elektrokémiai energia-tárolásnak sem mindegyik változata alkalmas terepi használatra. A nátrium-kén (NaS), illetve a redox folyadékkáros akkumulátorok rendkívül robusztusok, de tömegarányos energia-sűrűségük nem túl jó, ezért csak statikus, ipari felhasználásra alkalmasak. Az ólomsavas akkumulátorok pedig elsősorban a gépjárművek révén használatosak még. Energia-sűrűségük nem kiemelkedő, de igénytelenek és megbízhatóak, bár jelenleg már inkább csak a csekély előállítási költség az, amely miatt még nem szorította ki teljesen a lítium technológia.



34. ábra: A villamosenergia-tárolók piaci megoszlása a tárolókapacitás szerint (saját szerkesztés a [138] alapján)⁹⁷

Mint jelenleg meghatározó mobil energia-tárolási technológiát, folyamatosan fejlesztik az akkumulátorokat. Ezen belül egyrészt olyan új anyagösszetételeket keresnek, amelyek nagyobb energia-sűrűséget tesznek lehetővé, mint a most használatos Li-ion, másrészt keresik a módokat az utóbbiak optimalizálására is.

Régóta ismert a lítium-kén anyagösszetétel, ahol az elméletileg elérhető maximális energia-sűrűség a lítium-ion kb. nyolcszorosa, 2.600 Wh/kg [144]. Kedvezőek a teljesítmény-sűrűségi paraméterei és laboratóriumi körülmények között 1.500 ciklusos élettartamot is

⁹⁷ A forrásban a szuperkondenzátorok helytelenül szerepelnek az elektrokémiai elven működő eszközök között, mert csak bizonyos hibrid szuperkondenzátorok ilyenek. Erre a forrás nem ad választ, de mivel érdemben nem befolyásolja a mondanivalót, meghagytam a helyén.

rögzítettek már, ami alapján sokáig nagy reményeket fűztek hozzá. Sajnos ezeket az elméletileg lehetséges értékeket máig nem tudják egyszerre produkálni, így meg sem próbálták a gyártástechnológiát kialakítani hozzá. Ezzel a megoldással továbbra is csak a laboratóriumokban lehet találkozni.

Szintén nagyon régóta tudott, hogy bizonyos fém-levegő és fém-kén összetételek is alkalmasak energia-tárolásra. Az ismert fémek a vas, a nikkell, a magnézium, az alumínium, a nátrium, a kálium és a lítium [145, 2. o.]. A levegős összetételekhez egy évtizede nagy reményeket fűztek, hiszen itt az egyik elektróda a levegő, így az energia-sűrűséget csak a másik elektróda tömege befolyásolja. Az elméletileg elérhető energia-sűrűség akár a duplája (300-700 Wh/kg) is lehet a lítium-ionénak, de a gyakorlati kutatások itt is megrekedtek a TRL 5-6 szintjén. A fém-kén összetételek (kalcium, kálium, nátrium, magnézium, alumínium, lítium) még nagyobb, 1.000-2.500 Wh/kg értéket is ígérnek [145, 97. o.], de a kutatások a mai napig ez esetben sem jutottak túl a laboratóriumi fázison. A legtöbb esetben az elektródák anyagának gyors degradációja okozza a problémát, a vegyi átalakulások néhány ciklus alatt teljesen felemészti azokat. Szintén probléma, hogy a fizikai megvalósítás során gyakran nagy mennyiségű kémiailag inaktív anyagot is kell alkalmazni, ami rontja az energia-sűrűséget, így a gyakorlatban is használható akkumulátort végső soron nem sikerült kialakítani.

Bár továbbra is folynak alternatív anyagösszetételre vonatkozó kutatások, amelyek között egészen egzotikus organikus anyagok is szerepelnek, jelenleg nem ez a fókuszterület. Még ha alacsony TRL-en sikerülne is olyan kombinációt létrehozni, ami versenyképes lehet a lítium-ionnal, a hozzá tartozó gyártástechnológia kialakítása, majd a gyártókapacitások létrehozása akár évtizedeket is igénybe vehet, így belátható időn belül nem várható ilyen típusú eszközök piaci megjelenése.

Jelen pillanatban a legnagyobb kutatási erőforrások a lítiumos technológia korszerűsítésének irányába koncentrálódnak. A lítium-ion akkumulátoroknál az anód elektróda valamilyen széntartalmú kristály, többnyire grafit, míg a katód a leggyakrabban lítium-kobaltdioxid (LiCoO_2), vagy lítium-ferrofoszfát (LiFePO_4), de előfordulnak más fémes oxidok, pl. lítium-magnéziumoxid (LiMn_2O_4) is. Az elektródák valamilyen elektrolitban úsznak, ez általában szerves karbonátokban oldott lítium-hexafluorofoszfát (LiPF_6), amely nem mellesleg mérgező és tűzveszélyes. A két pólus között egy vékony szeparátor fólia található, amely az elektronokat nem engedi át, tehát hagyományos értelemben véve szigetelő, de a lítium-ionok képesek rajta átjutni. A lítium-polimer kémiai értelemben nem jelent új technológiát, csak az alapvetően folyékony elektrolitot egy polimerrel itatják fel. Az így

képződő zselészerű anyag jobban formázható, hajtható (így akár hajlékony akkumulátor is építhető belőle) és kevésbé érzékeny a külső mechanikus behatásokra, de villamos paramétereiben nem tér el jelentősen az alapját képező li-ion akkumulátortól.

A vezető akkumulátor fejlesztő cégek dollármilliókat költenek a fenti anyagkombináció tökéletesítésére. Ezen belül az elektrolit lítium-ionvezető képességét próbálják titkos összetevőkkel javítani, illetve az elektródák vegyi szempontból aktív felületét próbálják különféle anyagtechnológiai trükkökkel megnövelni. Ezek a törekvések viszonylag kevés hatással vannak az energia-sűrűsége, a jelenleg gyártott legkorszerűbb li-ion akkumulátorok energia-sűrűsége 150-200 Wh/kg, itt számottevő közeledés már nem várható a teoretikusan legfeljebb elérhető 250-300 Wh/kg értékhez. Viszont mindkét fejlesztési irány tulajdonképpen a korábban a 17. ábrán bemutatott modell belső ellenállását csökkenti, ami a gyakorlatban nem csak gyorsabb kisütést, de gyorsabb töltést is eredményez. Ez mind a mobil infokommunikációs eszközök, mind a villamos hajtásláncú gépjárművek használhatóságát oly módon javítja, hogy a tulajdonképpeni energia-sűrűség nem változott.

Az akkumulátor kutatások másik ígéretes területe jelenleg, az ún. szilárdtest akkumulátor is egy régről ismert teória, és már igazoltan a TRL 6-7, egyes sajtóközlemények szerint a TRL 8-as szintjén jár [146], így belátható időn belül (5-10 év) tömegesen is megjelenhet a piacon. Az akkumulátor gyártók mindig is szerettek volna megszabadulni az elektrolittól, ami szivárgásra hajlamos, és nem csak egészségkárosító, de tűzveszélyes is, elsősorban ez felelős az ismert akkumulátor-tüzekért. Az elektrolit elvben pótolható valamilyen kerámia, üveges amorf anyaggal vagy polimerrel (ez utóbbi gyurmaszerű, elastikus kvázi-szilárd anyag), amely vezeti a li-ionokat [147]. Korábban a konkrét megvalósítást az akadályozta, hogy ezeknek az anyagoknak a lítium ionvezető képessége két nagyságrenddel elmaradt a hagyományos folyékony elektrolitoktól. Pedig, ha sikerülne olyan szilárd anyagot találni, aminek az ionvezető képessége összemérhető a lítium-hexafluorofoszfáttal, az nem csupán az akkumulátor veszélyességét csökkentené, de az elérhető energia-sűrűség elvi maximumát is kitolná, közel az 1 kW/kg tartományhoz [147], míg az élettartam akár nagyságrendileg is felülmúlhatná a jelenlegi li-ion akkumulátorokat, és elérhetné a 10.000 órát.

Jelenleg a legkomolyabb megoldandó probléma, hogy már léteznek igen jó ionvezető szilárd elektrolitok, de ezekben a lejátszódó vegyi folyamatok során, akár 6-8 %-os térfogatváltozás is mérhető. Vagyis a vegyi degradáción túl, az elektrolitnak az elektródokkal érintkező felülete delaminálódik, tehát mechanikusan is degradálódik, ami a publikus források szerint csak néhányszor 10 töltés-kisütés ciklus élettartamot tesz lehetővé. A probléma megoldására egyes kutatók a vékonyréteg eljárást javasolják [148], de itt a szükséges

vákuumos eljárás nehezen technológizálható. A korábban említett sajtóközleményben hivatkozott, legkorábban (1-2 év) múlva sorozatban gyártható akkumulátorral kapcsolatban „semi solid-state” anyagról, tehát vélhetően polimerről van szó [149]. A fejlesztők szerint ezzel az eljárással 500 Wh/kg az elérhető legnagyobb energia-sűrűség, de ezen a téren az először megjelenő eszközök vélhetően nem lesznek még sokkal jobbak, mint a hagyományos cellák, de a megnövelt biztonság így is keresett prémiumtermékké teheti a civil szférában és ez katonai szempontból is rendkívül vonzóvá teheti.

Bővebb fejtegetés nélkül is látható, hogy a műveleti területen történő alkalmazhatóság szempontjából elsődleges paraméter az energia-sűrűség, azon belül is elsősorban a tömegarányos (gravimetrikus) energia-sűrűség. Ezt figyelembe véve a jelenleg ismert eljárások legtöbbször nem alkalmas és valószínűleg soha nem is lesz alkalmas a katonai környezetben történő használatra. A megfelelő mobilitást az elektrokémiai tárolók egyes típusai, és – jelenleg még inkább csak elvben – a kémiai tárolók és a szuperkondenzátorok biztosítják.

A nagyobb mennyiségű energia tartós tárolására alkalmas szuperkondenzátorok még csak TRL 2-3 szinten léteznek, és jelenleg nincs is kilátásban olyan fejlesztés, ami áttörést hozhatna.

A feltörekvő technológiák közül a hidrogénre épülő PEMFC már kereskedelmi termék, de katonai alkalmazása még bizonytalan. A tárolási technikák javításával az akkumulátorokénál nagyobb energia-sűrűség érhető el, de ez az előny, csak nagyobb volumen esetén számottevő, illetve a viszonylag drága PEM cellák is csak nagyobb rendszereknél rentábilisak. Ráadásul mind a kriogén hidrogén, mind a komprimált gáz kezelése nehezkesebb az akkumulátorkénál, míg a fém-abszorbens technológia még gyermekcipőben (TRL 4-6) jár. A tárolt hidrogén villamos energiává történő alakításához minden esetben további berendezések, PEM cella, szűrő, regulátor, szükségeselek.

Az elektrokémiai tárolás területén több ígéretes technika is felfedezhető, de ezek TRL-je is alacsony, 2-5 közötti és nincs rá reális esély, hogy belátható időn belül kereskedelmi termékké várjanak. A mobil alkalmazásban egyeduralkodónak számító li-ion technológia a mostani formájában energia-sűrűség tekintetében csak minimális, a kevésbé releváns teljesítmény-sűrűség tekintetében moderált tartalékkal rendelkezik. A szilárdtest akkumulátorok fejlesztése előrehaladott, de a gyakorlatban ezek is csak 5-10 év távlatában, lassan és fokozatosan szoríthatják ki a hagyományos li-ion cellákat.

Egy táblázatban foglaltam össze azokat a technológiákat, amelyek jelenleg szóba jöhetnek a katonai műveleti területen történő villamosenergia tárolására. Nem szerepelnek azok a technológiák, amelyek nem kellően mobilak (mechanikus és hőtárolók, folyadékáramos akkumulátor, szupravezetők, magas hőmérsékletű üzemanyagcellák, stb.), illetve azok, amelyek a terepen nem állíthatóak elő, így a NATO SFC kizárja őket (metanol üzemanyagcella).

technológia		gravimetrikus energia-sűrűség (Wh/kg)		TRL
		elméleti maximum	jelenlegi	
villamos	kettős rétegű szuperkondenzátor	?	1-4	3
hibrid	pszeudokapacitás	?	4-10	3
elektrokémiai	li-ion akkumulátor	350	150-250	9
	szilárdtest akkumulátor	1.000	?	7
kémiai	hidrogén	39.000	1.500	8

14. táblázat: A terepi használatra alkalmas tárolási technológiák összehasonlítása (saját szerkesztés)

Ez alapján megállapítottam, hogy a műveleti területen történő energia-tárolás hatékonysága valamennyi lehetőséget figyelembe véve is csak limitált mértékben és lassan fog javulni, önmagában ettől a közeli jövőben nem várható a terepi villamosenergia-ellátás nehézségeinek szignifikáns mértékű javulása.

4.2. Energiatárolók szabványosítása

Abból a feltételezésből indulok ki, hogy az egymással kompatibilis energia-tárolók, a jelenlegi gyakorlatban az akkumulátorok, lehetővé tesznek egyfajta energia-menedzsmentet. Gyalogos katonák esetében egy alegység katonái más ütemben fogyasztják az energiát a különféle eszközeikben, lehetséges, hogy bizonyos málházott eszközöket egyáltalán nem kell használniuk, így az azokhoz tartozó akkumulátorokat feleslegesen cipelték. Amennyiben ezt az energiát fel tudnák használni más eszközökben, azzal (villamos energia szempontjából) kiterjeszhető lenne az autonóm műveleti idő. A gyakorlatban viszont van néhány tényező, ami ennek gátat szab.

A málházott villamos berendezések egy 72 órás küldetés alatti energiaszükséglete nagyságrendileg eltérő lehet. A taktikai rádióé, illetve a digitális katona koncepció mentén központosított villamos ellátású eszközöké a kWh nagyságrendbe, míg például az éjszakai irányzék a Wh nagyságrendbe tartozik. Ez utóbbihoz tartozó akkumulátorok szerelvényeinek

alkalmassá tétele a nagyobb teljesítményigény kiszolgálására megnöveli annak tömegét, miközben a rádió számára így nyert plusz üzemidő kevesebb, mint egy óra.

Probléma továbbá, hogy a személyi felszerelésben a legjelentősebb fogyasztó rádióhoz minden gyártó igyekszik a saját akkumulátorát mellékelni. A különféle gyártók részben piacvédelmi okokból nem is nagyon igyekeznek más gyártók termékeit támogatni. A kisebb hadiipari gyártók többnyire igyekeznek egy már ismert és elterjedt akkumulátort alkalmazni, mivel ez eladhatóbbá teszi a terméküket, de ezek általában olyan speciális berendezések, amelyek nem képezik a katonák alapfelszerelését. A BB-2590/U jelű akkumulátor, ami már egyfajta kvázi szabványnak tekinthető, több gyártó is forgalmazza 250-300 Wh kapacitással.

A digitális katona koncepció része, hogy a szenzorok központosított tápellátással rendelkeznek, miközben az alapvetően kézi- vagy sisak-integrált használatra tervezett rádió a katona hátán vagy mellkasán kap új helyet. Ez a konfiguráció szinte igényli az új akkumulátort. Ennek megfelelően a már kiforrott digitális katona architektúrákhoz (pl. Nett Warrior) egyetlen központi, hajlékony és viselhető (övre vagy zsebbe rögzíthető) akkumulátort fejlesztenek [107]. Ez kizárja, hogy egyes rendszerelemek eltérő fogyasztásából adódóan felesleges energia maradjon nem hozzáférhető formában a felszerelésben, de a technológia által adott energia-sűrűsége nem tud javítani.

A tároló eszközök szabványosítása kizárólag a katonák személyi felszerelése tekintetében jelenthet előnyt, de hatása minimális.

4.3. Villamos fogyasztók energia-hatékonyságának javítása

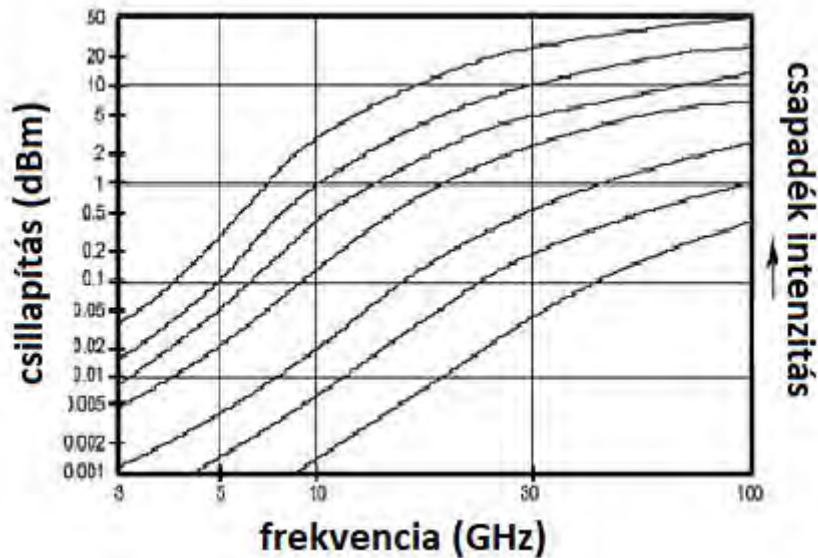
A villamos fogyasztók energia-hatékonyságának növelése egy általános környezetvédelmi stratégia. A műveleti területen használt villamos fogyasztók tekintetében viszont az autonóm működési idő kiterjesztésének eszköze is lehet, bár ennek feltétele, hogy a fogyasztás csökkentésével egyidejűleg az adott eszköz paraméterei nem változhatnak, mert az az alkalmazó csapatok szempontjából képességvesztést jelentene. A lehetőségek vizsgálatának érdekében a villamos fogyasztókat jellegük és alkalmazásuk szerint nagyobb csoportokra bontottam:

- Infokommunikációs eszközök;
- Világítás;
- Egyéb villamos fogyasztók.

4.3.1. Az infokommunikációs eszközök energia-hatékonyságának javítása

Az infokommunikációs eszközöket további két részre bontottam, a feldolgozó áramkörökre és a rádiófrekvenciás részre. Ez utóbbi hatékonysága, azaz az egységnyi felhasznált villamos teljesítményre jutó számítási teljesítmény, ahogy azt a harmadik fejezetben is megállapítottam, folyamatosan nő, és még belátható ideig nőni is fog. Ezzel együtt az alkalmazott számítógépek áramfelvétele mégsem csökken, mert a növekedő számítási és/vagy tárolási kapacitást a szintén növekvő infokommunikációs igények egyszerűen felszívják. Mivel a korszerű infokommunikációs eszközök működése teljes egészében a digitális számítógépeken alapul, nincs mód az áramkörök további méret- és fogyasztáscsökkentésére. Nincs mód a számítási teljesítmény mesterséges visszafogására sem, mert a nagyobb teljesítmény gyorsabb és pontosabb információt jelent, ami nélkülözhetetlen műveleti előny.

Nyilvánvalóan a rádiófrekvenciás teljesítmény sem csökkenthető, mert az egyértelműen kisebb áthidalható kommunikációs távolságot, vagyis csökkent képességet jelent. Sőt a rádióspektrum sajátosságai miatt még nőhet is a kisugárzott teljesítmény. Ugyanis a magasabb frekvenciákon a légkör csillapítása nagyobb, márpedig az újabb rádióeszközök egyre magasabb frekvencia-tartományokban üzemelnek. Ennek oka, hogy a rádióspektrum egy meg nem újuló természeti erőforrás. Ha egy adott frekvencia már használatban van, azt adott földrajzi távolságban (ez a frekvencia és teljesítmény függvényében változik) az még egyszer nem használható. Másrészt a nagyobb frekvenciákon több is a kiosztható sávszélesség. Viszont, ha ugyanakkora távolságra kívánunk információt továbbítani, akkor a légkör csillapítását figyelembe véve vagy fókuszálnunk kell a rádiófrekvenciás teljesítményt (tipikus példája a parabola-antenna) vagy egyszerűen meg kell növelni az RF teljesítményt, ami viszont értelemszerűen nagyobb hálózati teljesítmény-felvételt is eredményez.



35. ábra: A légekör rádiófrekvenciás csillapítása a frekvencia és a csapadék függvényében [150]

4.3.2. A világító eszközök energia-hatékonyságának javítása

Amint azt a második fejezetben kifejtettem, a világítás terén napjainkban egy kisebb forradalom zajlott/zajlik le, ahogy a hőmérsékleti elvű (izzószal, gázkisülés-lámpa) villamos világító eszközökről áttérünk a fizikai elvű fényforrásokra (LED). Egy hagyományos fényforrás ugyanolyan megvilágítást biztosító LED-re történő cseréje önmagában is jelentős, csaknem 90 %-os energia-megtakarítást eredményez. Ugyanakkor a világítás energiaigénye csak a tábori elhelyezés során számottevő, és a teljes felhasználás szempontjából ez sem túl jelentős a többi fogyasztóhoz (infokommunikáció, hűtés-fűtés) képest.

Természetesen a gépjárműveken és a személyi felszerelés területén is célszerű a LED-ek alkalmazása, de az első esetben a LED-ek hosszabb élettartama a döntő érv. A személyi felszerelésben a nagyobb specifikus fénytjeljesítmény igen hasznos, de mivel a világítást csak viszonylag ritkán használják egy-egy gyalogos művelet során, az energia-megtakarítás itt sem jelentős, bár magának a lámpának a tömege jelentősen, ugyanolyan fényerő és üzemidő mellett akár negyedére is csökkenhetett.

Az elmúlt tíz évben rendszeresített haditechnikai eszközök már részben vagy⁹⁸ egészben LED-es fényforrásokat alkalmaznak, így a világítóeszközök korszerűsítése révén még elérhető potenciális energia-megtakarítás tovább csökkent. Mindezek alapján a világítás

⁹⁸ A gépjárművekben és a harcjárművekben viszonylag lassan zajlik le az összes fényforrás LED-esítése, mert a LED-ek minden jó tulajdonságuk mellett nem tolerálják a feszültség ingadozását, ami viszont a generátor karakterisztikája miatt sajátossága a gépjármű fedélzeti villamos hálózatoknak.

energia-hatékonyságának javítása sem hozhat jelentős eredményt a műveleti területen jelentkező villamosenergia-igények mérséklése terén.

4.3.3. Az egyéb villamos fogyasztók energia-hatékonyságának javítása

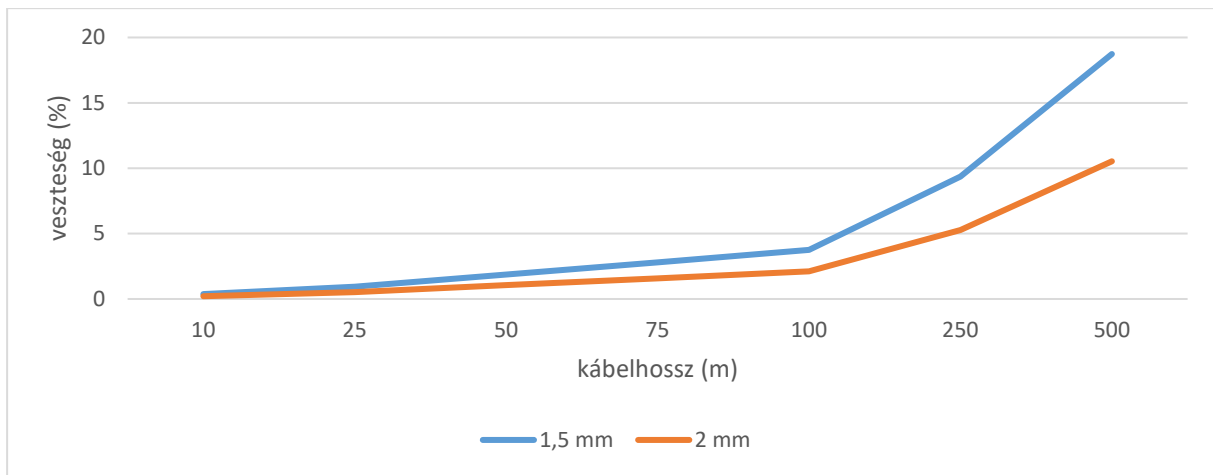
Az egyéb villamos fogyasztók túlnyomó többségét jelentő villanymotorok hatékonysága 90-95 %, míg a melegvíz előállítására vagy a tábori konyha üzemeltetésére használt fűtőszálaké 100 %, így ezen a területen értelemszerűen technikailag nem lehetséges az energia-hatékonyság javítása. A régebbi klíma berendezésekhez képest a modern inverteres darabok optimális esetben 20, a valóságban inkább csak 10 % megtakarítást jelentenek, ami önmagában nem elhanyagolható, de egy tábori elhelyezés vagy egy gépjárműfedélzeti villamos rendszer teljes energetikai mérlegében nem is túl jelentős.

4.3.4. A villamos elosztó hálózat energia-hatékonyságának javítása

Ismert tény, hogy a villamos energia vezetékes átvitele esetén a kábelek ellenállása veszteséget okoz, aminek a mértéke a távolsággal arányos, így a járművek fedélzeti rendszereinél, illetve a személyi villamos hálózatoknál nincs is nagy jelentősége. A veszteség csökkenthető a kábel ellenállásának csökkentésével is, de ehhez nagyobb átmérőjű kábelt kell használni. A szükséges teljesítmény átviteléhez az indokoltnál vastagabb kábel alkalmazása viszont nem csak drága, de nő a kábel tömege is, ami logisztikai szempontból szintén nem szerencsés.

átmérő (mm)	keresztmetszet (mm ²)	ellenállás (Ω/m)	maximális terhelőáram (A)	tömeg (g/m)
0,2	0,0314	0,5573	0,094	0,07
0,5	0,196	0,0891	0,589	1,75
0,75	0,442	0,0396	1,32	3,93
1	0,785	0,0223	2,36	6,98
1,5	1,766	0,00991	5,30	15,70
2	3,140	0,00557	9,42	27,91

15. táblázat: Tömör rézhuzal egy szálának jellemző adatai (saját szerkesztés a [151] alapján)



36. ábra: Rézkábelek veszteségei a távolság függvényében 230 V-os feszültség mellett (saját szerkesztés a 15. táblázat adatai alapján)

Az ohm törvény ($R=U/I$), illetve az egyenáramú teljesítmény számítására alkalmas $P=U \cdot I$ képletből adódóan a kábel vesztesége adott ellenállás mellett $P=I^2 \cdot R$. Ez például 500 méteres kábelhosszon továbbított 230 V-os feszültség esetében az 1,5 mm átmérőjű kábelnél 18 %, míg a 2 mm-es kábelnél 10,5 % veszteséget jelent, ugyanakkor a vékonyabb kábel tömege (a szigetelés tömegét nem számolva) 23,5 kg, míg a vastagabbé 42 kg. A fenti képletből látható, hogy a feszültség növelésével arányosan csökken az áramerősség, ami viszont a veszteséget a távolság négyzetével arányos módon csökkenti. Ezért is transzformálják a távvezetékek feszültségét olykor 100 kV-nál is nagyobb feszültségre.

Transzformátorok telepítésével csökkenthető lenne az aggregátortól távolabb elhelyezkedő fogyasztók felé a kábelek vesztesége, de az alkalmas transzformátorok a teljesítményüktől függően több 10 kg-osak is lehetnek, így a mobil táborok kialakításakor kerülnek ezek használatát, ilyenek nincsenek is a tábori készletekben. Ha egy ellátandó fogyasztó több, mint 2-300 méterre van az aggregátortól, akkor a lehetőségek függvényében másik aggregátort telepítenek, vagy (ha a feszültség nem csökken annyira, hogy a fogyasztó működésképtelen legyen) elfogadják a kábel okozta veszteséget.

Összességében sem a fogyasztók energia-hatékonyságának javítására, sem az elosztói hálózat okozta veszteségek mérséklésére nincs igazán hatékony eljárás. A technikailag lehetséges megoldások alkalmazásával akár a tábori elhelyezés, akár a járműfedélzet, akár a személyi felszerelés tekintetében is csak mindössze néhány %-kal lehet csökkenteni a villamos hálózat terhelését.

4.4. A villamosenergia-termelés hatékonyságának javítása

A terepi villamosenergia-termelés hatékonyságának javítása jelenleg lényegében az aggregátorok hatékonyságának javítását jelenti. Ez technikailag három módon lehetséges:

- A generátor hatékonyságának növelésével;
- A generátort meghajtó hőerőgép hatékonyságának növelésével;
- A veszteség hő csatolt hasznosításával;
- Más hőerőgép alkalmazásával.

Magának a generátornak a hatásfokát érdemben nem lehet javítani, hiszen az a villamos forgógépeknél megszokott 90-95 % [21]. A dízelmotorok indikált (elméleti) termodinamikusan hatásfoka 42-48 %, míg a gyakorlatban ez az érték 36-42 % [152]. Egy korszerű nagyteljesítményű aggregátorban található dízelmotornál ez az érték már megközelíti a 40 %-ot, így jelentős javításra itt sincs lehetőség.

A belsőégésű motorok energiamérlege általában egyharmados arányban áll a hasznos (főtengelyre jutó) mozgási energiából, a gázok áramlásának energiájából (elsősorban a kipufogóból) és a hőveszteségből. A gázok áramlása szükséges a motor működéséhez, így bizonyos korlátok között, de azért lehetséges a kipufogógázok energiájának mechanikus hasznosítása, ilyet alkalmaznak például a Toyota Priusban is, és egyes források szerint akár 8 %-al is javíthatja a benzinmotor hatásfokát [153]. Ugyanakkor a hőveszteség egy része villamos energia formájában is visszanyerhető. Erre a gyakorlatban kettő, már jól bevált lehetőség is van. Az egyik az ún. Seebeck-hatáson alapuló Peltier-elem, a másik egy külső égésű hőerőgép, a Stirling-motor alkalmazása.

4.4.1. A hőveszteség csatolt hasznosítása Peltier-elemmel

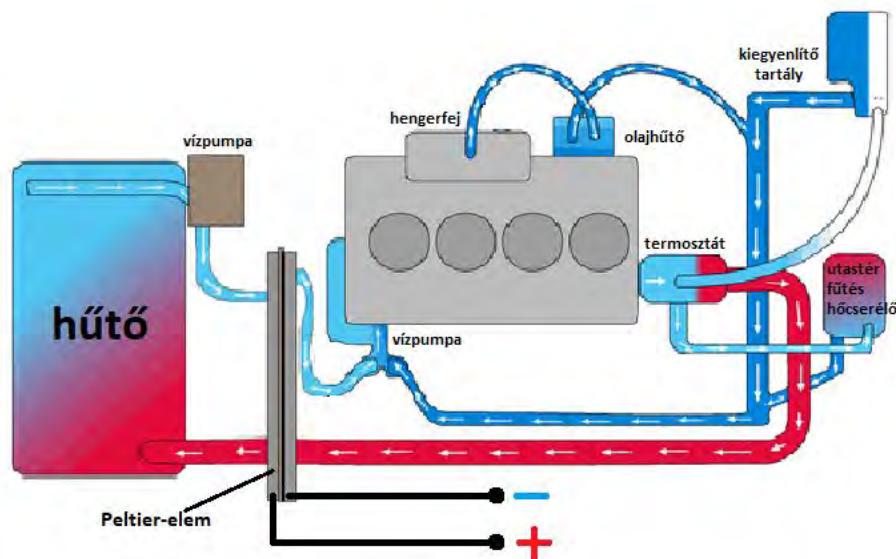
A Peltier-elem oly módon működik, hogy ha bizonyos, kétféle anyagból álló elemen áram halad keresztül akkor azok találkozási pontján az egyik anyag lehül míg a másik felmelegszik (Peltier-hatás). Az ilyen elemek visszafelé is működnek, azaz, ha a két anyag eltérő hőmérsékletű, akkor az érintkezési ponton áram keletkezik (Seebeck-hatás). A keletkező áram erőssége arányos a két oldal hőmérsékletének különbségével.

Ezt használják ki a Mars-pályáján túli űreszközök energia-ellátására, hiszen ott a napelemek már nem sokat érnek. Az ún. Radioizotópos Termikus Generátorokban (RTG)⁹⁹

⁹⁹ Radioisotope Thermoelectric Generator.

alkalmazott Peltier-elemek egyik oldala az űr közel abszolút nulla hőmérsékletének van kitéve, míg a másikat egy radioaktív anyag bomláshője melegíti akár több száz fokra, így akár 10 % körüli hatásfokot is elérhetnek [154]. Az ilyen eszközök nagyon kis teljesítményt szolgáltatnak, a teljesítmény-sűrűségük csak 1-2 W/kg, viszont az izotóp több évig is képes fűteni azt, és működtetni a műholdat. Sajnos a legjobb hatásfokú anyagpárosok (bizmut-tellurid, bizmut-antimonid, ólom-tellurid) legalább egyike ritkaföldfém, így ez az eljárás igen költséges.

Földi körülmények között, akár az aggregátorok motorjánál is alkalmazható a módszer, de a hatásfok kevesebb lesz, mivel az elérhető hőmérséklet-különbség is közelítőleg 200 °C-al kevesebb. Természetesen nem lehet a teljes motort ilyen hőelemekkel beburkolni, így a veszteségő egy része mindenképpen elillan, ezért érdemes a legnagyobb hőleadó részekre, a kipufogódobra, illetve (folyadékhűtéses motornál) a hűtőkörrre koncentrálni. Ezzel a teljes hővesztésnek kevesebb, mint fele fogható meg, és ha az így keletkező energiát nem egy külön fogyasztó kör ellátására használjuk, akkor a keletkező egyenáramú villamos energiát is illeszteni kell a generátor váltakozó áramához, amihez további veszteséget okozó konverter áramkör is szükséges. Az eljárás nagy előnye viszont, hogy nem tartalmaz mozgó alkatrészt, így a meghibásodás valószínűsége csekély. A gyakorlati megvalósítása elég körülményes és drága is, így a Peltier-elemek jelenlegi hatásfoka mellett tömeges elterjedése nem várható.



37. ábra: Peltier-elem lehetséges beépítése a motor hűtőkörébe (saját szerkesztés)

4.4.2. *A hőveszteség csatolt hasznosítása Stirling-motorral*

A Stirling-motor egy külső hőbevezetésű motor, amit gyakran neveznek külső égésűnek is, de valójában nem szükséges semmit sem elégetni a működéséhez. A Peltier-elemhez hasonlóan elég, ha az egyik oldala melegebb a másikonál. Ez a külső hő egy zárt hengerben található gázt melegít fel, aminek tágulása megmozgat egy kis dugattyút, ami egy tengelyt forgat. A tengely fordulata egy másik nagyobb dugattyút kifelé mozgat, ami komprimálja a lehűtött gázt. A viszonylag egyszerű szerkezet kinetikus energiává alakítja a veszteség hőenergiát, így kézenfekvő lenne ezzel a plusz mechanikus teljesítménnyel rásegíteni a dízelmotor főtengelyére, de ez a Stirling-motor nagy hiszterézise miatt túlságosan bonyolult kapcsolóművet igényelne, így a gyakorlatban inkább egy külön generátort forgatnak vele.

Ez a megoldás összességében hatékonyabb, mint a Peltier-elem, de nagyobb a helyigénye, a tömege és a meghibásodás valószínűsége is. Ugyanakkor a Stirling-motor még mindig egy rendkívül egyszerű szerkezet, így a korszerű anyag- és gyártástechnológiák alkalmazásával igen robusztus módon kivitelezhető. Ez annyira igaz, hogy a tervezett amerikai Mars-misszió energia-ellátására is ilyeneket kívánnak alkalmazni, ami nem csak azt jelenti, hogy a nem túl barátságos marsi-környezetet kell tudnia éveken át elviselni, hanem előtte a kilövéskor ható óriási erőket is [155]. Mindebből az is következik, hogy a modern Stirling-motorok képesek a katonai környezetben is működni. Az egyszerűségükből következően kicsi a meghibásodásuk valószínűsége, de mivel az aggregátorral nincsenek mechanikus kapcsolatban, csak egy hőcsatolás köti őket össze, a meghibásodásuk nem is tenné az aggregátort működésképtelenné.

A Stirling-motorok technikája most kezd felfutni, ezért lassú terjedésükre számítok mind a polgári, mind a katonai eszközökben. Az általuk biztosított veszteségéből visszanyerhető energia igen hasznos, de ennek mértéke nincs jelentős hatással a rendszer összteljesítményére, mivel az aggregátor teljes termodinamikai hatásfokát legfeljebb néhány százalékkal képes megnövelni.

4.4.3. Más hőerőgép alkalmazása

Elvi lehetőségként felmerülhet, a dízelmotor helyett gázturbina alkalmazása is az aggregátorokban. A NATO szárazföldi logisztikai rendjében azért lett az F34-es az egyedül támogatott üzemanyag, mert az a dízelmotorok mellett alkalmas a helikopterek¹⁰⁰ és az M1 Abrams harckocsik gázturbináinak meghajtására is. A gázturbina elvileg 40 %-os maximális termikus hatásfoka lényegében azonos a dízelmotorokéval, viszont fajlagos teljesítménye annak sokszorososa [156], akár az 1 kW/kg értéket is meghaladhatja, bár a gázturbina gazdaságossága a 100 kW-os teljesítmény-tartomány alatt nem igazán kedvező. A NATO STO elődszervezete egy időben komolyan foglalkozott a kisméretű gázturbinák háton hordozható változatával, de aztán a rendkívüli zaj és hőhatás miatt elvetették [157].

Az M1 Abrams-on kívül a Szovjetunió is szolgálatba állított egy gázturbinás harckocsit, a T-80-ast. Ez azonban egyértelműen kudarcnak tekinthető, a rendkívül drága és költségesen üzemeltethető harckocsi harcértéke nem haladta meg jelentősen a jóval olcsóbb T-72 közepes¹⁰¹ harckocsiét, és messze alatta maradt a T-90-es szintén közepes harckocsinak [158]. Az ezredforduló idejére ezért többségüket már konzerválták, majd az orosz-ukrán háború alatt újra alkalmazásba vonták őket, de az Oryx független elemző adatai alapján most sem teljesítenek jobban, mint az elvileg csak közepes szovjet/orosz harckocsik [159]. A széleskörű alkalmazás ellenére megkérdőjelezhető az M1 Abrams sikeressége is, hiszen a kortárs és legfőbb versenytárs Leopard 2-t sokkal több ország rendszeresítette [160] és az utód típus sem használ már gázturbinát, hanem az egy hibrid dízelmotor hajtásláncot alkalmazó jármű [122].

Ennek oka, hogy a gázturbina elképesztően hangos, így elég nehéz elképzelni egy a katonák pihenésére is szolgáló tábor közepén, ezen kívül az üzemeltetése sokkal bonyolultabb, mint a jó értelemben véve igénytelen dízelmotoroké.

4.5. In situ energiatermelés alternatív üzemanyaggal

Nyilvánvalóan csökkenti a szárazföldi csapatok üzemanyag utánpótlástól való függőségét, ha a számukra szükséges villamos energiát, vagy legalább annak egy részét önmaguk is képesek lennének megtermelni valamilyen más módon, mint a dízelaгрегátorok. Erre elvben

¹⁰⁰ A helikopterek bár repülőeszközök, támogató jellegük miatt többségükben a szárazföldi erők hadrendjében szerepelnek.

¹⁰¹ A szovjet/orosz közepes harckocsi megtevesztő lehet, a nyugati „nehéz” harckocsi kategória mellett. Az tény, hogy a szovjet/orosz típusok tömege akár 15-20 tonnával is elmarad azoktól, de ez az eltérő alkalmazási doktrína és az ügyes tervezés eredménye. Valójában ezek a harckocsik ugyanazt a feladatot látják el, mint a nyugati típusok, ezért ott rájuk is az MBT megnevezést alkalmazzák.

két lehetőség is adott. Az egyik, hogy olyan üzemanyagot visznek magukkal, aminek az energiasűrűsége nagyságrendileg meghaladja a fosszilis üzemanyagokét, így hosszabb távon képes lenne működtetni a generátorokat. A másik módszer, hogy olyan energiaforrásokat is felhasználnak, amelyeket nem kell odaszállítani, mert a terepen is elérhetőek.

4.5.1. Nukleáris energia-termelés tábori körülmények között

A 6. táblázatból látható, hogy a fosszilis üzemanyagoknak igen nagy mind a volumetrikus (térfogatarányos), mind a gravimetrikus (tömegarányos) energiasűrűségük. Ezt a „hagyományos” üzemanyagok közül csak a hidrogén képes túlszárnyalni, de az sem nagyságrendileg. Kémiai módszerekkel ilyen extrém mennyiségű energiát már nem lehet kinyerni az anyagokból, erre csak a fizika, konkrétan a maghasadás (vagy elvben a fúzió) képes.

A mobil katonai nukleáris erőmű ötlete egyáltalán nem új, az USA-ban már a 60-as években kifejlesztettek az ML-1 kísérleti erőművet és a tervezési kritériumok igen szigorúak voltak. A szabvány légiszállítható konténerekben elhelyezett rendszer össztömege nem lehetett több, mint 40 tonna, a minimális biztonsági távolság (emberektől való távolság üzem közben) 150 méter [161]. Ezek a megszorítások kizárták az akkoriban már működő nyomottvizes reaktor „miniatürizálását”, a mérnököknek egy nitrogénnel üzemelő, bonyolult hőcserélős rendszert kellett kialakítani. Ezt sikeresen ki is próbálták, de a végül hat konténerben elhelyezkedő berendezés teljesítménye alig 200 kW volt, márpedig ezt egy dízelmotor már akkoriban is egyetlen konténernyi méretben megvalósította, így a nukleáris fűtőanyag tartóssága csak nagyon hosszú idő alatt hozta volna be a logisztikai költségeket, két év időtávban pedig már nem mobil megoldásokban, hanem fix bázisokban és infrastruktúrában gondolkodnak a katonai vezetők, így nem is folytatták a kísérleteket.

1961-ben természetesen a Szovjetunióban is építettek egy mobil reaktort. A „NURKA” nevű szerkezet, a lánctalpas alváz ellenére csak minimális mobilitással rendelkezett, mivel arra egy teljes első generációs nyomottvizes atomreaktort sikerült a mérnököknek összezsúfolni. A NURKA teljesítménye 2 MW volt, ami már számottevőnek tekinthető, de itt a csak névleg meglévő mobilitás miatt hagytak fel a fejlesztéssel [162]. Mindenesetre a tudás nem merült feledésbe és Oroszország néhány éve már viszonylag kicsi, úszó platformon tartósan üzemeltet az arktikus területen mobil atomreaktort és a hadsereg állítólag ismét vizsgálja egy hagyományos szárazföldi, vagy légi úton szállítható nukleáris erőmű rendszerbe állíthatóságát.

Részben az előző fejezetben bemutatott RTG-k új, Stirling-motoros nemzedékével kapcsolatban az USA-ban is újra felmerült a lehetőség azok használatára [163], de ténylegesen megépített demonstrátort még nem mutattak be. Az amerikai elgondolás nagy előnye, hogy bár ez is radioaktív anyagot használ, a plutónium természetes formájú izotópja lényegesen kevésbé veszélyes, mint a dúsított urán vagy plutónium. A rendszer sokkal jobban skálázható is, mint a hagyományos turbinás erőművek kicsinyített változatai, akár néhány kilogrammos, 1-10 kW teljesítményű eszköz is kialakítható, amint erre a „Kilopower” fantázianév is utal.

Bár mind az RTG-k, mind a vizes-turbinás nukleáris kiserőművek TRL-je igen magas, a baleseti vagy az ellenséges támadás, szabotázs nyomán bekövetkező nukleáris robbanás vagy szivárgás veszélye mindeddig megfontolásra készítette a döntéshozókat. A korábban kiszámolt terepi villamosenergia-igények tükrében a műveleti területre szállított nukleáris erőműre jelenleg még nincs akkora igény, amely mellett vállalható lenne az üzemeltetéséből adódó kockázat. Viszont a még nem látható jövőben, lehet, hogy nem lesz elkerülhető a nukleáris technológia terepi használata.

A robbanás következtében keletkező gáznyomással csőből indított lövedékek technikájában – elsősorban anyagtechnológiai okok miatt - már csak minimális a fejlesztési tartalék, míg a vegyi üzemű rakéták technológiájának még nem ismerjük a korlátait, de a hiperszonikus eszközök így is számos alkatrész esetében feszegetik a határokat [164]. A nagyhatalmak természetesen már fejlesztik és tesztelik a fegyverek következő generációját, de a lézerek és az elektromágneses ágyúk egy egészen új dimenziót jelentenek majd a villamosenergia-igény területén. Például a már csaknem tíz éve működő railgun¹⁰² egyetlen lövése 15-20 kWh energiát igényel, ami egy átlagos háztartás 2-3 napi fogyasztásának felel meg [165].

Az in situ energia-termelés másik módja, ha az adott területen fellelhető energiaforrásokat hasznosítjuk. Mivel ez kizárja a logisztikai úton történő utánpótlást, illetve a fosszilis primer energiahordozók tábori körülmények között történő kitermelését és feldolgozását, nyilvánvalóan csak a megújuló energiaforrások (RES)¹⁰³ jöhetnek számításba. Elméleti szinten a megújuló források mindegyike a nap energiája által jön létre, így azok csak addig újulnak meg, amíg a nap ki nem alszik, de mivel ez csak kb. 5 milliárd év múlva következik

¹⁰² Sinágyú. Párhuzamosan elhelyezett vezetökre kapcsolt áram által létrehozott mágneses tér gyorsítja a lövedéket hiperszonikus sebességre.

¹⁰³ Renewable Energy Sources.

be, emberi mércével ezek az energiaforrások örökkévalók. Ezekből a szakirodalom alapvetően ötöt különböztet meg:

- Bioenergia;
- Geotermikus energia;
- Vízenergia¹⁰⁴;
- Szélenergia;
- Napenergia.

A geotermikus energia éppen rendelkezésre mennyisége csaknem állandó, és a biomassza mennyisége is jól számítható, így megbízható forrásnak minősül. Ugyanakkor a szél és nap, illetve kisebb mértékben a víz rendelkezésre állása sem állandó, az éppen elérhető mennyiség szélsőséges értékek között mozoghat, adott esetben nulla is lehet. Ezért nem lehetséges egy adott terület vagy objektum villamosenergia-ellátását pusztán ez utóbbiakra építeni.

4.5.2. Bioenergia terepi hasznosítása

Szerves forrásból alapvetően kétféle módon állítható elő energia. Magas energiatartalmú mezőgazdasági termelésből származó vagy (lakossági vagy mezőgazdasági, feldolgozóipari) hulladék biomasszájából. Elvben biomasszából is előállítható lenne valamiféle dízel- vagy kerozin, de még a legnagyobb energiasűrűséggel rendelkező primer energianövényekből, mint a repce, is csak a fosszilis dízel fűtőértékének 85 %-ával rendelkező üzemanyag állítható elő [166]. A bioüzemanyag F34 helyetti használatát a NATO SFC is tiltja, illetve az előállításához nagy termőterület és ipari feldolgozó kapacitás szükséges, így a szárazföldi csapatok számára alkalmatlan. A katonai alkalmazás ugyanakkor nem kizárt. Az olasz haditengerészet Flotta Verde¹⁰⁵ programjának részeként az ITS *Comandante Foscari* nevű 1.520 tonnás járőrhajót még 2014-ben átállították articsókából előállított bioüzemanyagra [167]. Személyes beszámolók alapján a projekt pénzügyileg nem rentábilis, de számos munkahelyet biztosít Olaszország déli részén, így politikai okokból ragaszkodnak hozzá.

A hulladék biomassza hasznosítására számos civil eljárás létezik. Ezek közül a hulladék nagy hőmérsékleten történő elégetése az, ami megvalósítható tábori körülmények között is. Számítások szerint egy katona egy nap alatt 0,5-3,5 kg szemetet hagy maga után tábori elhelyezésben [67], ennek fűtőértéke hasonló lehet a kommunális hulladékhoz, azaz 1,5-2,5

¹⁰⁴ Az angolszász irodalom gyakran külön típusnak tekinti a hullám (wave) és az árapály (tidal) technikákat, de én Magyarország geográfiai adottságait figyelembe véve nem tárgyalom őket külön.

¹⁰⁵ Zöld Flotta.

kWh/kg [168], így az üzemanyag adott. Átlagos mennyiségű és fűtőértékű hulladékot feltételezve, figyelembe véve a kb. 50 %-os hatásfokot, mintegy 2 kWh villamos energia állítható elő ilyen módon fejenként és naponta, ami 0,6 liternyi megtakarítást jelent az F34 üzemanyagból.

A Sínai-félszigeten állomásozó békefenntartók (MFO¹⁰⁶) El-Arish-ban található bázisán működik is egy ilyen égetőkemence, de ez egy állandó bázis, az eszköz egyáltalán nem mobil [169]. Egy ilyen kemence mobilizálása egy konténerrel vagy kerek alvázon technológiailag viszonylag könnyen kivitelezhető [170], de a hulladék összegyűjtése, osztályozása, illetve a visszamaradó nem elégett anyagok kezelése sok élömunkát igényel, aminek biztosítása műveleti környezetben nem prioritás. Az ilyen módon előállítható villamos energia az igényeknek csak töredékét fedezi, így egy mobil hulladék égetőmű esetleges beszerzése és üzemeltetése valamely haderő részéről nem jelenthet műveleti előnyt, legfeljebb egy PR lépésként értelmezhető.

4.5.3. Geotermikus energia terepi hasznosítása

Magyarországon jelentős potenciál van a geotermikus energiában, hiszen a geotermikus gradiens, ami azt mutatja meg, hogy 100 méterenként lefelé haladva hány °C-al emelkedik a hőmérséklet, magyarországi átlaga 5–8 °C között mozog, míg a bolygó átlaga csak 3 °C [171]. Sajnálatos módon ez a hőenergia (amennyiben eltekintünk az igen ritka termálvizektől) csak helyhez kötött fűrészekkel, és viszonylag jelentős infrastruktúra hozzáadásával (hőszivattyú) nyerhető ki a földből, ami nyilvánvalóan nulla mobilitású megoldás, alkalmatlan a műveleti területen történő felhasználáshoz.

4.5.4. Vízenergia terepi hasznosítása

A víz energiája a legrégebb óta felhasznált megújuló forrása az emberiségnek, a legkorábbi erre vonatkozó leletek kb. 2000 évesek. A villamos energiát a víz esetében is generátorok állítják elő, csak azokat nem egy belső égésű motor, hanem a lezúduló víz mozgási energiája forgatja. A vízenergia hasznosításának csak statikus, erőművi implementációja ismert [25], és még a legkisebb változatai (hazai terminológiában törpe, nemzetközi terminológiában mikro vízerőmű) is legalább néhányszor 10 kW teljesítményűek [172].

¹⁰⁶ Multinational Force and Observers – ENSZ felhatalmazással az Egyiptomhoz tartozó Sínai-félszigeten tevékenykedő többnemzetiségű békefenntartó szervezet. Korábban több, mint egy évtizeden át Magyarország is állomásoztatott ott mintegy 40 főt.

Magyarország a területéhez képest viszonylag jelentős, kb. 1 GW-nyi elméletben hasznosítható vízenergia-potenciállal rendelkezik, de ennek csaknem háromnegyedét a Duna teszi ki [173]. A világ más részein viszont elég gyakori, hogy egy jelentős területű országban (mint Afganisztán vagy Irak) lényegében csak egy-két elvben használható méretű állandó folyóvíz áll rendelkezésre. Tehát önmagában az a tény, hogy nagy mennyiségű folyóvíz nem biztos, hogy mindig van elérhető közelségben, biztosan kizárta tenné a víz energiájának műveleti területen történő alkalmazását, még abban az esetben is, ha technikailag megvalósítható lenne egy gazdaságosan üzemelő mobil vízerőmű.

Magyarország geopolitikai adottságait figyelembe véve, továbbá a nyilvánvalóan jelentős infrastruktúra igénye miatt nem tárgyalom a hullám (wave), és árapály (tidal) erőműveket.

4.5.5. Szélenergia terepi hasznosítása

A szél energiájának hasznosítása évszázados múltra tekint vissza és napjainkban is jelentős potenciál rejlik a hasznosításában. Példaként említem a legnagyobb teljesítményű szélerőműtelepet, a 6 GW-os névleges összteljesítményű kínai *Gansu* szélfarmot [174], amely három darab paksi erőmű teljesítményének leadására képes. Ugyanakkor a szélenergia igen jól skálázható, a piacon 500-1.000 W-os háztartási méretű eszközök is elérhetőek. Nagy előnye a technikának, hogy a szélkerekek által szolgáltatott forgó mozgás egy egyszerű áttétellel egy generátor tengelyére továbbítható. A szél rendelkezésre állása viszont nem csak az időjárás függvénye, hanem nagyban függ az adott terület általános éghajlati adottságaitól is. A tengerpartokon szinte mindig fúj a szél, így nem is csoda, hogy a legnagyobb szélfarmokat ide, a tengerek sekély vizű partmenti részeire¹⁰⁷ telepítik.

Magyarország, mint kontinentális állam, ilyen szempontból sokkal kedvezőtlenebb adottságokkal bír, a földfelszín közelében számottevő szélre csak a Dunántúl északi részén lehet számítani [175]. A földfelszíntől eltávolodva, jellemzően 100 méteres magasság felett szinte a világ minden részén fúj a szél, de ez olyan infrastruktúrát igényel, ami nyilvánvalóan kizárja a mobilitást, a műveleti területen történő alkalmazást [25]. Tábori körülmények között legfeljebb 10-20 méteres árboccal lehet számolni, ami nagyban korlátozza a szél energiájának hozzáférhetőségét.

¹⁰⁷ Offshore.



38. ábra: 2015 júniusában a Bakonyban üzemelő kísérleti szélturbina rotorátmérője 150 cm, maximális fordulatszáma 450/perc. Egy 10 méteres árbocon került elhelyezésre, amelynek stabilitásáról a szállító konténer gondoskodott (saját felvétel a CL15 gyakorlatról)

Magyarországon Várpalota környéke éppen a szeles Észak-Dunántúl térségében található, ahol 2015-ben a korábban említett Capable Logician gyakorlat során egy szélerőmű is telepítésre került. A 15 méteres árboc a stabilitás érdekében egy szabvány 20 lábás konténerhez lett erősítve. A generátor névleges villamos teljesítménye a 450 fordulat/perc maximális fordulatszám mellett 5 kW. A kisebb szélgenerátoroknál gyakorta alkalmazott megoldás, hogy a gondola képes a szél irányába fordulni. Ennek alkalmazásától itt a gyakorlatilag állandó szélirány miatt eltekintettünk. A szél által szolgáltatott teljesítményt napi 24 órában folyamatosan rögzítettük, és annak ellenére, hogy Várpalota környéke Magyarország talán legszelesebb vidéke, júniusban elég gyakran álltak a lapátok és az olykor felélénkülő szél is csak ritkán szolgáltatott 1 kW-ot meghaladó teljesítményt [176]. Ennek alapján a szélenergia hazai alkalmazásának gondolata műveleti területen megkérdőjelezhető, de más területeken lehet benne ráció.

Használatkor azonban ügyelni kell arra, hogy a szélkerekek rendkívül hangosak. A lapátok nagyságától és a pillanatnyi forgási sebességtől függően változó frekvenciájú, de monoton zúgó hangot adnak ki, ami egy táborban megnehezítheti a katonák pihenését. Ráadásul minél több energiát termelnek éppen, annál hangosabbak. A 10-20 méteres árboc nem tekinthető magasnak, de felállítása és bontása azért időt vesz igénybe és szakértelem is kell hozzá. Ez a magasság viszont már nagyban megkönnyítheti egy tábor vizuális felderíthetőségét, és a forgó lapátok aránytalanul nagy radarkeresztmetszetet szolgáltatnak,

így a lokátoros felderítés is egyszerűbb. Mindezek miatt, bár a technológia adott, sehol nincs ilyen mobil eszköz rendszeresítve, csak kísérleti alkalmazásai ismertek.

4.5.6. A napenergia terepi hasznosítása

A megújuló energiaforrások közül a civil és nem túl meglepő módon a katonai alkalmazásban is az egyik legfontosabb, a vízenergia után nominális mennyiségben világszerte ez szolgáltatja a második [2] legtöbb megújuló energiát. Magyarországon egy évben minden egyes négyzetméternyi vízszintes felületet átlagosan 1.200–1.300 kWh energia ér napsugárzás formájában [177]. Ha ezt mind hasznosíthatnánk, az egész Európa energiaigényét fedezné. A napenergia szempontjából a legkedvezőbb Ráktérítő és Baktérítő közeli területeken a napsugárzás energiája pedig akár évi 5–7 MWh is lehet négyzetméterenként.

Ennek az óriási energia-mennyiségnek a hasznosítására számos mód kínálkozik. Sok helyen található egy feketére festett hordóból kialakított kerti zuhanyzó. A napenergia hasznosításának ezt a legősibb módját valamivel szisztematikusabban megvalósító eszközök a napkollektorok. Nem állítanak elő villamos áramot, a tetőn elhelyezett jó hőelnyelő tulajdonságú csövekben manapság valamilyen fagyálló folyadékot, az esetek többségében glikolt melegít fel a nap. Ha ennek hőfoka átlépi a használati melegvíz-tartályban lévő víz hőmérsékletét néhány fokkal, egy szivattyú keringetni kezdi a fagyállót egy hőcserélőben, ami a tartály vizét melegíti, majd, ha a két hőmérséklet kiegyenlítődött, a szivattyú leáll. Derült, meleg nyári napokon a rendszer hatásfoka akár 80% is lehet, de erős fagyban hiába a szikrázó napsütés, alig fog bekapcsolni a szivattyú [178]. Mindezzel együtt egy jól kivitelezett hozzávetőlegesen 10 négyzetméteres kollektor (tartósan rossz idő esetére egy villamos fűtőszállal megtámogatva) képes egy átlagos háztartás használati melegvíz-igényét kielégíteni. A technológia terepi használat tekintetében is TRL 9-es, a Bundeswehr már rendszeresített is olyan tábori zuhanykonténert, ami alaphelyzetben szintén napkollektorokkal fűti a vizet [176]. Az elektronikus vezérléssel és villamos szivattyúval együtt is rendkívül egyszerű szerkezet, de jelentős a mérete és tömege. Melegebb területeken létesített átmeneti táborokban sok fosszilis üzemanyag takarítható meg általa, de Észak-Európában már teljesen használhatatlan.



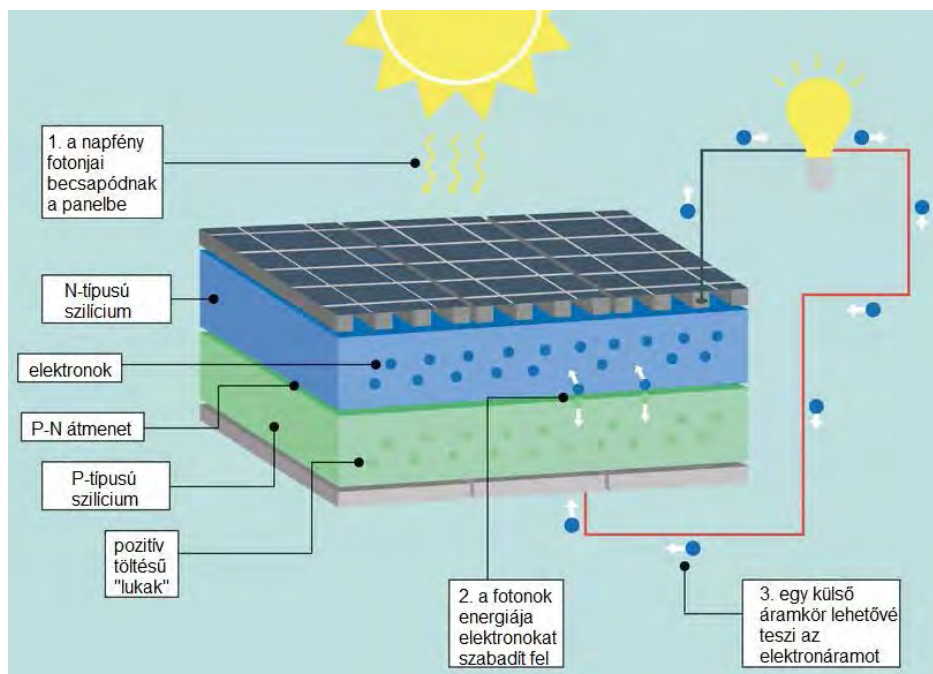
39. ábra: A sivatagi sárga színű konténer tetején található az álcahálóval fedett a napkollektor (saját felvétel a CL15 gyakorlatról)

A napenergiát már a napelemek elterjedése előtt is használták villamos energia termelésére. Ezeknél az ún. tükrös erőműveknél az akár több ezer darabból álló tükrörendszer egyetlen pontba fókuszálja a nap fényét, amely akár több ezer fokra is hevülhet. Az ide keringetett víz egy pillanat alatt gőzzé válik, amivel a hagyományos hőerőművekben megszokottak szerint turbinákon keresztül hajthatnak meg generátorokat. A legnagyobb ilyen telepet, az *Ivanpah*-t, a Mojave-sivatagban építették meg. Az 1.425 hektáron telepített 300 ezer tükrő, 3 vízforralón keresztül 392 MW teljesítmény leadására képes [179]. Az ehhez hasonló rendszerek csak hatalmas méretek mellett elég hatékonyan. E miatt, illetve a külön mozgatott számtalan tükrő bonyolultsága miatt ezek műveleti területen történő alkalmazása lehetetlen.

Szerencsére létezik egy olyan eszköz is, amelyik közvetlenül képes a nap energiáját villamos árammá alakítani. Ezek a közismert napelemek, amelyek olyan szilárdtest eszközök, ahol a fény fizikai és részben kémiai elvek mentén direkt módon hoz létre elektromos áramot. Ez az ún. fotovillamos vagy fotovoltikus hatás. Az angol terminológiában a „solar cell”-en kívül igen gyakori a „PV-cell” megnevezés (PV – photovoltaic) is. Általában két egymásra helyezett félvezető – az esetek többségében szilícium – rétegből épülnek fel. A felső, többnyire bórral, galliummal vagy indiummal adalékolt, ún. „P” rétegen a napfény fotonjai viszonylag könnyen áthatolnak, majd az alsó, többnyire foszforral, nitrogénnel esetleg arzénnel adalékolt „N” rétegbe csapódnak. A becsapódó fotonok energiája elektronokat szakít ki az „N” réteg kristályrácsából, amelyek a kialakításnak köszönhetően a felső rétegbe

kerülnek és ott negatív töltést hoznak létre, míg alul az elektronhiány miatt pozitív lesz a töltés, így alakul ki a két réteg közötti potenciálkülönbség, és létrejön a villamos áram [24].

Azt a tényt, hogy bizonyos anyagokban feszültség jön létre, ha megvilágítjuk, már 1839-ben felfedezte a francia Alexander Bequerel. Később az idők során többen is előállítottak ilyen anyagokat, de a rendkívül gyenge, 1 % alatti hatásfok és egyéb problémák miatt ezek sokáig megmaradtak a laboratóriumokban. Végül az első már valóban stabil és értékelhető mennyiségű áramot előállítani képes napelemet a Bell Laboratories mutatta be 1954-ben [180]. A még mindig csupán 1–2 % hatásfokú eszköz olyan drága volt, hogy sokáig csak a műholdakon alkalmazták, ahol viszont remekül beváltak, hiszen a korábban bemutatott két megoldással szemben a működésüknél a külső hőmérséklet nem játszik jelentős szerepet.



40. ábra: A fotovillamos (PV) hatás (saját szerkesztés a [181] alapján)

A gyártástechnológia fejlődésével, illetve az egyre fokozódó igények nyomán kialakuló tömegtermelés miatt a napelemek ára a 70-es évektől napjainkig nominálértéken is az ezredrészére esett és ma már szinte mindenütt megtalálhatóak. Az idők folyamán sokat javult a hatásfokuk is. Kezdetben még csak csekély fogyasztású eszközök, számológépek, órák működtetésére voltak képesek. Nem kézi eszközre integrálva, hanem általános célú és nagyobb volumenű villamos energia előállítására a 90-es évektől kezdődően alkalmazzák őket.

Az ilyen eszközök nagy előnye, hogy működésük mozgó alkatrészt, kiegészítő elemeket nem igényel, a villamos áram mindenféle elmozdulás és hanghatások nélkül, minimális hő

képződése mellett jön létre. Rendkívül jól skálázható a technika, néhány 100 mW-tól akár több 100 MW-ig tetszőleges teljesítményű rendszer létrehozható. Fontos részlet, hogy a napelemek egyenfeszültséget hoznak létre, szemben a generátorok váltakozó feszültségével. Ez azt jelenti, hogy ha a megtermelt áramot nem használjuk fel közvetlenül egy egyenáramú fogyasztóban, illetve nem tároljuk el akkumulátorokban, akkor többnyire váltakozó feszültségű árammá kell alakítani. Erre szolgál az ún. inverter, amely elektronikus úton a generátorok szinuszos feszültségéhez hasonló feszültséget hoz létre, és eközben többnyire elvégzi a szükséges feszültség-transzformációt is. Az egyszerűbb felépítésű inverterek kimenő feszültsége még jó szándékkal is csak kvázi-szinuszos, ami nem jelent problémát egy villanymotornak, de az érzékenyebb infokommunikációs eszközökhöz jobb minőségű, a szinuszt jobban közelítő kimenő feszültség alakot produkáló eszközök kellenek. Az inverterek alkalmazása nagyságrendileg 3-5 % veszteséget hoz létre a rendszerben [182].

A napelemeknek mára több változata is ismert, de a legrégebbi amorf szilícium paneleket szinte már sehol nem használják. A legelterjedtebb a kristályos szilícium cellák alkalmazása [27], ahol a két félvezető réteget egy üveglap és egy műanyag hátlap közé laminálják. Könnyű előállíthatósága, olcsósága és viszonylag jó, 20% körüli hatásfoka miatt a napjainkban alkalmazott napelemek 90 % ebbe a csoportba tartozik [183, 66-82. o.]. A gyártástechnológia szerint megkülönböztetünk monokristályos és poli-, vagy multikristályos típust.

Néhány éve Magyarországon még elég elterjedt volt a polikristály is, aminek direkt napsütésben kicsit rosszabb a hatásfoka, de szűrt napfény mellett jobban teljesít. Mára e téren is felzárkóztak a monokristályos típusok, így kereskedelmi forgalomban már csak ilyenek kaphatók. Mint minden eszköz, a napelem is veszít a működésének hatékonyságából az évek során. A kristályos szilícium elemeknél ez az ún. „öregedés” nagyságrendileg évi 1%. Sajnos elmondható, hogy azonos gyártási eljárás mellett jelenleg is fokozható lenne a napelemek hatásfoka, de ez drasztikusan rontaná azok élettartamát. A jelenlegi technológiai szinten a kereskedelemben kapható szilíciumkristályos napelemek tervezett élettartama 20-25 év.

Viszonylag új, az ún. vékonyfilm (thin-film) technológia [180]. A működési elv ugyanaz, de a félvezető rétegeket nem egy tömbökből vágják ki, hanem filmszerűen viszik fel a hordozó anyagra. Ez a fajta gyártástechnológia olcsóbb, bár a felhasznált anyagok lényegesen drágábbak, Ugyanakkor nagyon előnyös, hogy a napelem nem lesz üvegtábla-szerűen merev, hanem a hordozóanyagtól függően egy viszonylag rugalmas, hajlítható eszközt kapunk, ami lényegesen vékonyabb és nagyságrendileg könnyebb is a kristályos modellekénél, de a hatásfok alig haladja meg a 10 %-ot. Némileg gyorsabban is öregednek a kristályos szilíciumhoz képest, de rugalmasságuk miatt mégis nő az arányuk a szolár-

technológián belül. Az alkalmazott anyagok szerint számos változata ismert, amorf szilícium-mikrofilm szilícium, kadmium-tellurid (CdTe), réz-indium-diszelenid (CuInSe_2), illetve az űrtechnológiában az indium-ezüst-gallium (InArGa) [180].

A napelemek a maximális névleges teljesítményüket csak merőlegesen beeső, nagy intenzitású direkt napsugárzás mellett szolgáltatják. A kisebb intenzitású napsütés és/vagy szögben beeső sugárzás rontja az aktuális hatásfokot. A kisebb intenzitású sugárzást részben képes kompenzálni a XXI. század fejlesztése, a többátmenetes (multijunction) napelem. A működés elméleti hátterében ez sem hoz újdonságot, csupán annyi történt, hogy több különféle félvezető réteget helyeztek el egymáson. Ezek spektrális érzékenysége eltérő, így a beeső napfénynek lényegesen nagyobb részét tudják elektromossággá alakítani. A fotovillamos rétegek által létrehozott áram összeadódik, számottevően javítva ezzel a hatásfokot.

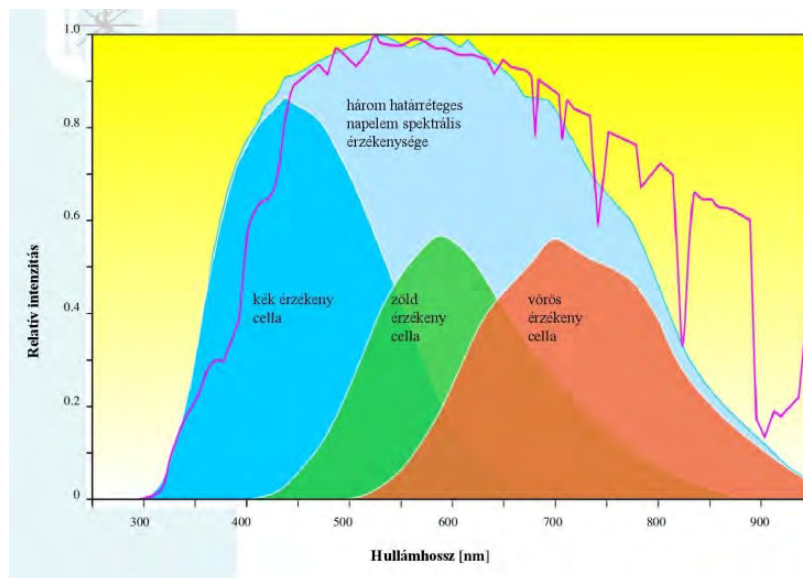
A nagyobb telepeket (az északi féltelén) fixen déli tájolással telepítik, de a merőleges beesés érdekében a kézi eszközök folyamatosan mozgathatók, sőt léteznek gépi irányítású komplexumok is.



41. ábra: A kép előterében egy utánfutós mozgatású fix állásban telepíthető hagyományos napelem, a háttérben egy automatikus napkövető egység. A Smartflower virág módjára hajtogatja ki a szirmait, GPS adatok alapján állítja tájolását (saját felvétel a CL15 gyakorlatról)

A legkorszerűbb többátmenetes napelemek gyártástechnológia alapvetően a vékonyfilmes eljárásra épül, ám egyelőre még nagyon drágák ezek az elemek, így az elterjedtségük is nagyon szerény, de azt jól mutatják, hogy még jelentős fejlesztési tartalékok rejlenek a

napelemek gyártásában. Szakemberek jelentős áttörést várnak az úgynevezett CIGS (réz-indium-gallium-diszelenid) napelemektől. Jelenleg is egy ilyen négyátmenetes eszköz tartja a napelemek hatékonysági rekordját. A Fraunhofer Intézetnél laboratóriumi körülmények között már teszteltek olyan napelemet, ami 46%-os értéket ért el, [184]. Katonai szempontból külön jelentősége van annak, hogy ezek a CIGS-eszközök megőrizték a vékonyfilm-technika kedvező méret, és tömegjellemzőit továbbá a rugalmasságot is.



42. ábra: Egy három-átmenetes (tri-junction) napelem spektrális karakterisztikája [185]

A fotovillamos hatás rendkívül jól skálázható, a tábori elhelyezés területén vagy a katonák személyi felszerelésének részeként is felhasználható, korlátozottan még a gép- és harcjárművek esetén is alkalmazható. Technológiája TRL 9-es. Hatásfoka jelentősen elmarad egy dízelagregátorétól, és nem is mindig áll rendelkezésre napsugárzás, mégis jelentős potenciál van benne, jelentős áttörések nélkül, de az elérhető eszközöknek évről-évre nő a hatásfoka és a stabilitása. A napsugárzás „megbízhatatlanságán” túl használatának legfőbb korlátja, hogy meglehetősen helyigényes. A jelenlegi általános 20 % körüli hatásfok mellett egy 1 m²-es szilícium-kristály panel direkt napsugárzás esetén is legfeljebb 100 W teljesítményt képes szolgáltatni. Szűrt napsugárzás esetén ennek csak a töredékét, míg pl. esős időben lényegében semmit. Zaj és hanghatások nélkül működik, de a napelemek csillogása messziről elárulhatja egy tábor vagy akár egy katona helyzetét, különösen a levegőből, hiszen a működése érdekében nem is álcázható. Esetleges használata esetén számolni kell a telepítési és bontási idővel. Ez az idő nagy mennyiségű cella esetén kézi munkával igen hosszú lehet, de a folyamat sok esetben jól gépesíthető.

Saját műszaki tapasztalataim, és a [3. számú mellékletben](#) rögzített saját adatgyűjtés alapján az alábbiakat állapítottam meg:

- A napelemek jelen formájukban tökéletesen alkalmasak a terepi alkalmazásra a személyi felszerelés nagyságrendjétől kezdve egészen tábori villamosenergia-ellátásig;
- A szilícium kristály alapú eszközöknél a mono- és multikristályos típusok teljesítménye között magyarországi viszonyok között nincs szignifikáns különbség, de minimálisan jobban teljesítettek a monokristályos típusok;
- A vékonyfilm-technológiás eszközök elsősorban a személyi felszerelés részeként jöhetnek számításba;
- Az intelligens napkövető eszköz 15-30 %-al teljesített jobban a fix telepítésű változatoknál. Figyelembe véve a drága és meghibásodásra hajlamos mozgató mechanikát, a megoldás nem tűnik egyértelműen előnyösnek,



43. ábra: A „szolárszőnyeg” egy utánfutóról göngyölíthető le. A telepítéskor az utánfutót vontató terepjáró is szerephez jut (saját felvétel a CL15 gyakorlatról)

4.6. Energia-menedzsment

Az energia-menedzsment annyit jelent, hogy a termelő és/vagy fogyasztó eszközök technikai fejlesztése nélkül, a meglévő eszközök működését, az azok közti kapcsolatot megváltoztatva valósítjuk meg, hogy kevesebb energia felhasználásával érjük el a kívánt

műveleti célt. Ez megvalósítható adminisztratív módon, vagy valamilyen automatizmus alkalmazásával.

Az energiamenedzsment egyértelmű előnyei az alábbiak:

- Könnyen konfigurálható;
- Segíti az egyes részegységek és berendezések pontos azonosítását;
- Alacsonyabb energia-felhasználás;
- Alacsonyabb üzemeltetési költség és környezeti terhelés;
- Valós idejű termelési és fogyasztási adatok gyűjtési és (akár grafikus) megjelenítési lehetősége;
- Gyors adaptáció képessége, növelt energiabiztonság.

Ugyanakkor a megvalósításának vannak nyilvánvaló hátrányai is [186]:

- Plusz költséggel jár;
- Részletekbe menő műszaki felkészültséget igényel;
- A rendszer finomhangolást igényel;
- Jelentős a munka-igénye;
- Mérsékelt skálázható;
- Centralizált struktúrát eredményez;
- Additív minőség-ellenőrzési és karbantartási költségek.

Megvalósítható adminisztratív módon is, azaz rendszabályok létrehozása és azok betartatása, illetve a betartás ellenőrzése által, de ez katonai környezetben és különösen műveleti körülmények között nyilvánvalóan nem megvalósítható. Műveleti tevékenység közben a katonák fiziológiai szükségletei a háttérbe szorulnak, miközben rendkívüli kognitív terhelésnek vannak kitéve, és többnyire jelentős stresszt is elszenvednek. Ilyen körülmények között nem életszerű, hogy a műveleti feladatok teljesítése közben a katonák még figyeljék a villamos energia felhasználását is és optimalizálják azt. Ez a katonai célok elérése szempontjából érdektelen plusz munkát jelent, miközben az sem elvárható, hogy minden katona rendelkezzen az energia-menedzsment megvalósításához szükséges műszaki ismeretekkel.

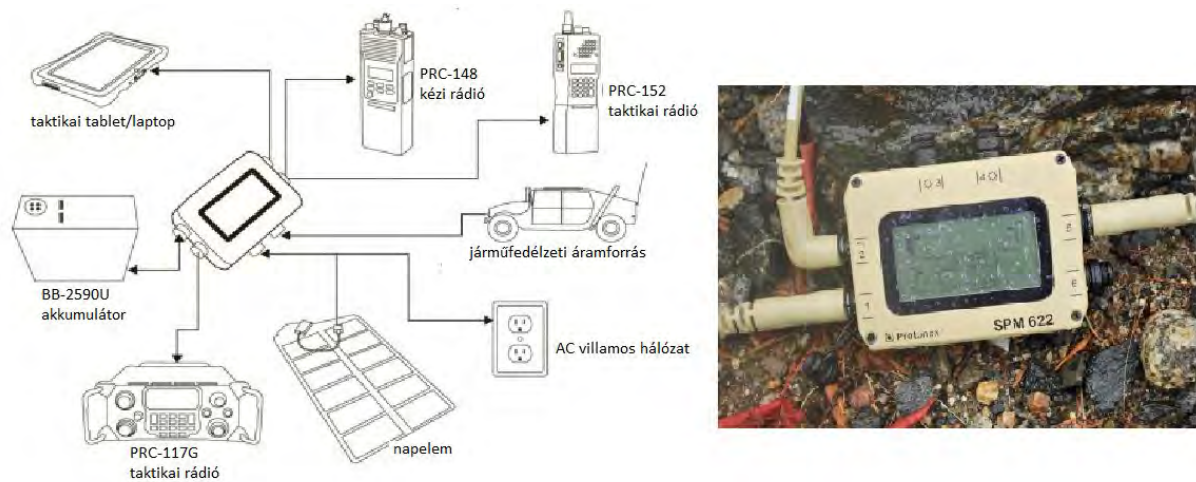
Általában az is elmondható, hogy a korszerű automatikus szabályozó eszközökkel megvalósított energia-menedzsment sokkal hatékonyabb, mint a hagyományos adminisztratív módszer. Számos csak ott jelentkező problémát korrigál az automatizmus.

jellemző	hagyományos terepi villamos hálózat	smart grid
szervezési elv	hierarchikus	hálózatos
termelés módja	centralizált	centralizált vagy decentralizált
vezérlés	elektro-mechanikus	digitális
monitor lehetőség	nincs vagy minimális	teljes körű
beavatkozás módja	kézi	automatikus
monitor és beavatkozási pontok száma	minimális	számos
kommunikáció a rendszerelemek között	egyirányú	kétirányú
adatmennyiség	minimális	nagy
optimalizálás paraméterei	csak gazdasági	több
biztonsági lehetőségek	minimális	több

16. táblázat: A hagyományos és a korszerű automatikus energia-menedzsment összehasonlítása (saját szerkesztés [187] alapján)

A gyakorlatban a tábori elhelyezés, a gép- és harcjárművek és a személyi felszerelésben található villamos eszközök esetében is, ez a nem használt fogyasztók lekapcsolását jelenti, ritkán van mód és lehetőség ennél komplexebb eljárást alkalmazni. A gép- és harcjárművek esetén a villamos hálózat architektúrája fix, a használaton kívüli eszközök lekapcsolásán túl fizikailag sincs egyéb lehetőség a villamos energia átirányítására. Lényegében ugyanez a helyzet a személyi felszerelés esetében is, annyi eltéréssel, hogy az egy csoportban tartózkodó katonák egymás közt cserélhetnek akkumulátorokat, illetve léteznek olyan raj és szakaszszinten rendszeresített töltés-disztribúciós eszközök, amelyek lehetővé teszik egy külső forrás (napelem vagy hordozható aggregátor) használatán kívül az akkumulátorok közti töltéscserét is.

A tábori elhelyezés esetében elvben lehetséges az aggregátorok áttelepítése is, de ez általában az elosztó hálózat újraépítését is jelenti, amire csak valóban nagyon indokolt esetben kerülhet sor, mivel sok élőmunkát vesz igénybe. Jobbára itt is csak a használaton kívüli fogyasztók lekapcsolásával, esetleg kapacitáshiány esetén a nem létfontosságú szolgáltatások energiaigényének korlátozásával élnek.



44. ábra: A Protonex SPM-622 készülék a Nett Warrior készlethez alkalmazható és már lehetővé tesz bizonyos személyi szintű energia-menedzsmentet. Egyelőre csak az USA különleges erőinél rendszeresítették raj és szakasz szinteken [188]

A legtöbb jelenleg rendszeresített, és korszerűnek tekintett tábori hálózat-építő eszköz sem ad módot arra, hogy a fogyasztókat prioritizálják és szükség esetén automatikusan korlátozzák azok áramfelvételét [189]. Tehát ezt a tevékenységet az elosztó hálózat csomópontjaiban kézzel kell elvégezni, ami csak az energiamérlegben beállt nagyobb mértékű változásokra ad reagálási lehetőséget, azt is csak késleltetéssel. Az ilyen adminisztratív szabályozás műveleti területen egyébként sem lehet túl hatékony, hiszen a katonák fizikai és kognitív terhelése alaphelyzetben is magas, közvetlen harcérinkezés veszélye vagy más stresszes helyzetben pedig végképp nem várható el, hogy „lekapcsolják maguk után a villanyt”.

A jövőben rendszeresítésre kerülő eszközök vonatkozásában bizonyos automatizmusok megléte már jóval valószínűbb, illetve ilyen „stand-by” funkciókat már jelenleg is kínálnak egyes járműfedélzeti és kézi eszközök. Nagyobb távlatokban viszont már a katonai villamos energetikai hálózatokban is jelentős szerephez juthat a mesterséges intelligencia (MI) [190], amely hatékony mikromenedzsmentet végezhet.

Mindazonáltal a katonai villamos berendezések használata mindig célirányos, ha a fogyasztás korlátozása a legcsekélyebb hatással lehet a csapat katonai képességeire, vagy csak a pillanatnyi harckészültségére, akkor azt nem szabad alkalmazni. Ezt figyelembe véve a menedzsment által megtakarítható villamos energia még egy fejlett MI-t bevetve is csak néhány százalék lehet [186], igazán jelentős eredmény nem érhető el általa.

4.7. Összegzés

Ebben a fejezetben részletesen megvizsgáltam minden olyan lehetőséget, amivel mérsékelni lehet a növekvő villamosenergia-igény és a rendelkezésre álló termelési infrastruktúra kapacitása közötti eltérést. Megállapítottam, hogy az alkalmazható technikák között nincs olyan, aminek alkalmazása vagy optimalizálása önmagában jelentős hatással lenne az energiamérlegre. Megállapítottam azt is, hogy jelenleg nem ismert olyan technológia, ami belátható időn belül önmagában megoldásként szolgálhatna.

Ebből az következik, hogy a szárazföldi csapatok műveleti területen történő tevékenysége során az ismert technológiák és eljárások optimalizálásával és azok komplex alkalmazásával lehetséges a villamosenergia-ellátás hosszú távú fenntartása.

Természetesen rendkívül fontos, hogy melyek azok a területek, amelyek prioritást kell élvezzenek a továbbiakban. Ennek vizsgálatára egy szándékoltan egyszerű analitikus módszert választottam az összehasonlításra. Bár a különféle módszerek és eljárások összehasonlítására és értékelésére számos remek matematikai módszer van, ezek egyikét sem láttam célszerűnek alkalmazni. Ezek a modellek egzakt paraméterek alapján keresik egy feladatra a legmegfelelőbb megoldást, én viszont nagyon eltérő dolgokat kívántam összevetni, amelyekre nem lehet egzakt módon ugyanazokat a mérőszámokat alkalmazni. Így is keresnem kellett azokat az analógiákat, amelyek alapján egy meglévő technika optimalizálását és egy új bevezetését össze lehetett hasonlítani.

Nem volt szándékom az egyes technológiákban vagy eljárásokban rejlő potenciált ebben a részben értékelni. Azt az elvet vettem figyelembe, hogy a jelenleg elérhető megoldások közül melyek kínálják a legkisebb befektetett költség vagy erőforrás mellett a legnagyobb javulást a terepei villamos energetikai rendszerek energiamérlegében. Ez egyben azt is megválaszolja, hogy egy most induló vagy zajló, haditechnikai eszköz fejlesztése során melyek azok a területek, ahová fókuszálni érdemes. A kapott eredmény általános érvényű, a speciális alkalmazási területek más prioritásokkal rendelkezhetnek.

A [2. számú mellékletben](#) foglaltam össze az ismert megoldásokat és eljárásokat. Ahol az eljárás mobilitása lényegében zérus, vagy az alkalmazásnak adminisztratív akadálya van (pl. NATO SFC) azokat kizártam a további vizsgálatból. A fennmaradó lehetőségeket különféle szempontok alapján 1 és 5 között értékeltem. Az adott szempontokat olyan módon prioritizáltam is, hogy az adott szempont alapján 1-es értékelést kapott lehetőségeket is kizártam a további vizsgálatból. Az egyes szempontokhoz tartozó értékelési módszert az alábbi táblázatban foglalom össze:

szempont	értékelés				
	1	2	3	4	5
hatásfok/energia-sűrűség/energia-hatékonyság javulás a jelenlegihez képest	0	<5 %	5-10 %	10-15 %	15%<
katonai alkalmazás készülségi szintje	alapkutatás	létezik civil alkalmazás	civil alkalmazás a elterjedt	létezik katonai alkalmazás	katonai alkalmazása elterjedt
alkalmazás/infrastruktúra költsége	rendkívül drága	költséges	moderált	mérsékelt	olcsó/minimális
mobilitás/skálázhatóság/alkalmazás sokrétűsége	0	<5 %	5-10 %	10-15 %	15%<

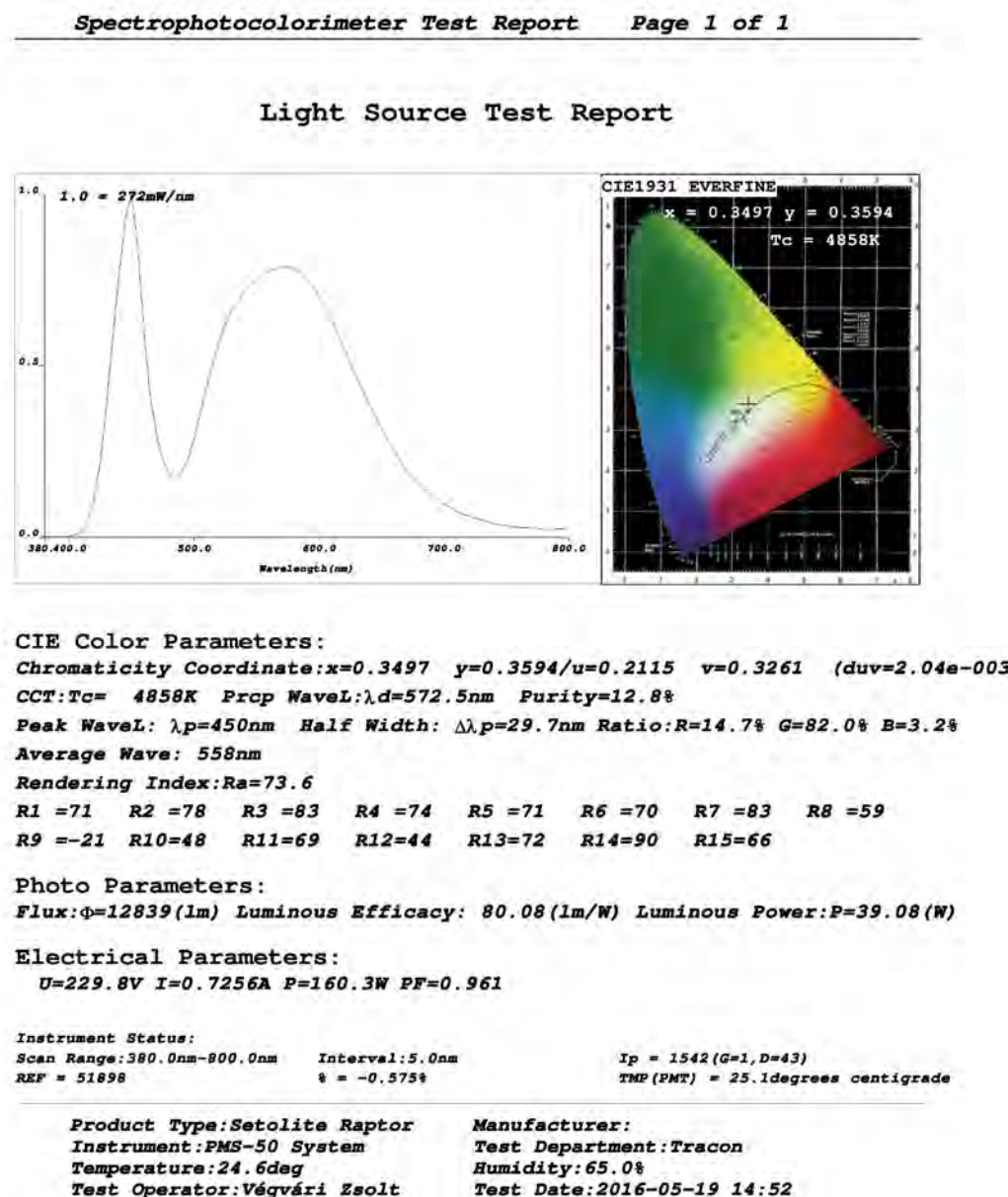
17. táblázat: A műveleti területen alkalmazható villamos energetikai technikák és eljárások értékelési szempontrendszere (saját szerkesztés)

Az elemzés alapján megállapítottam, hogy a teljes terepi energiamérleg javításában leginkább döntő szerepe a megújuló források hatékony kiaknázásának van. A műveleti területen az aggregátoros villamosenergia-termelés mellett jelen technológiai szinten kizárólag a szél- és a napenergia rendelkezik olyan mobilitással, ami lehetővé teszi azok használatát, ezen belül kisebb a jelentősége a napkollektoros melegvíz előállításnak és szélturbinás direkt áramtermelésnek, elsősorban azok méretei és alkalmazási nehézségei miatt. Magyarország földrajzi adottságait figyelembe véve egyik sem fókuszterület, de missziós szerepvállalás esetén megfontolandó az alkalmazásuk.

A fotovoltaikus energia-termelés minden tekintetben a legjobb eredményekkel kecsegtet. A telepítési és álcázási nehézségek mellett kizárólag az szól ellene, hogy teljes egészében nem lehet rá alapozni az ellátást, mert a nap közel felében egyáltalán nem elérhető, és a biztosított energia az időjárás függvényében is igen sztochasztikus lehet. Ugyanakkor a megfelelő energia-tárolókkal és/vagy aggregátorok mellett nagyban csökkentheti a szárazföldi csapatok logisztikai támogatási igényét. Külön érdeme, hogy eltérő hatékonysággal, de a világon a legtöbb helyen működik, illetve fejlesztésében még jelentős potenciál maradt.

Különösen a gyalogos katonák felszerelésének vonatkozásában, de általában is igaz, hogy csaknem ilyen fontossággal bír az energia-tárolás hatékonyságának javítása, ami egyben a napenergia szélesebb körű kiaknázásának is a kulcsa. A napenergia e nélkül is működik, de szélesebb körű és nagyobb volumenű hasznosításához mindenképpen szükséges. E területen a jelenleg is alkalmazott lítiumos akkumulátorok valószínűleg továbbra is dominánsak maradnak, de igen komoly fejlesztési és alkalmazási potenciál van a PEM-cellákban és a hozzájuk kapcsolódó zöld hidrogén-termelésben.

A fogyasztók oldalán kevés a mozgástér, egyedül a hagyományos hőmérsékleti működésű fényforrások LED-re történő cseréje lehet érzékelhető hatással a terepi energiamérlegre, viszont ez a folyamat már számos haderőben igen előrehaladott. Már csaknem egy évtizede foglalkozik a tudomány a LED-ek fényének káros élettani hatásaival a hadseregen belül is [191]. Ugyanakkor már erre a kérdésre is választ adnak a változtatható színhőmérsékletű világítótestek [192].



45. ábra: Egy korszerű tábori LED-es fényforrás 96 %-ot meghaladó színvisszaadásra képes, miközben egy hagyományos izzó teljesítményének csak tizedét veszi fel (saját mérés a Tracon Kft. fénytechnikai laboratóriumában található Ulbrich-gömbös műszerrel)

A többi alkalmazható módszerrel nem érhető el jelentős eredmény, mert azok vagy technológiai korlátokba ütköznek, mint pl. az elosztó hálózat veszteségeinek mérséklése, vagy adminisztratív akadályai vannak, mint pl. a szabványosításnak, ahol egy Magyarországhoz hasonló kisebb ország hadereje igen csekély érdekérvényesítő képességgel bír.

A mélytanulás képességével felruházott, vagy mesterséges intelligenciával megerősített szabályozó rendszerek, tehát a gépi menedzsmentek viszont reális eséllyel rendelkeznek arra, hogy már a belátható jövőben érzékelhető módon javítsák a terepen is alkalmazott villamos hálózatok hatásfokát, akár személyi, akár gépjárműfedélzeti, akár tábori hálózatról legyen is szó [193].

5. A szárazföldi csapatok képességeinek javítására alkalmas villamos energetikai megoldások

Miután megállapítottam, hogy csak több módszer együttes alkalmazásával enyhíthető a műveleti területen fennálló növekvő villamos energia iránti igény, ebben a fejezetben arra keresem a választ, hogy bizonyos esetekben konkrétan melyek ezek. A szárazföldi csapatok képességének javítása alatt a korábban kifejtetteknek megfelelően minden esetben az üzemanyagtól való függést értem, ami hozzájárul, hogy a csapatok hosszabb időn keresztül legyenek képesek autonóm módon működni.

Azokat a megoldásokat vizsgálom, amelyeket az előző fejezetben végzett analízis alapján megfontolásra érdemesnek találtam és ezeket vetem össze a jelenleg széles körben alkalmazott megoldásokkal. Végezetül ezúttal is külön vizsgálom a személyi felszerelés villamos berendezései, a járműfedélzeti villamos hálózat, továbbá a tábori elhelyezés eszközeiben történő alkalmazhatóságuk kérdéseit, illetve, hogy az egyes megoldások hol teljesítenek jobban. Hazai alkalmazhatóság tekintetében megvizsgálom a nemzetközi irodalomban fellelhető megoldásokat, de olyan még nem rendszeresített eszközöket is górcső alá veszek, amelyekkel a fejlesztés-tesztelés valamelyik fázisában a gyakorlatban is volt szerencsém megismerkedni. Mindezeket túl a saját ötleteimet is ismertetem.

5.1. A katonai használatra alkalmas villamosenergia-tárolók energiasűrűségének összehasonlítása

Ezen a területen a jelenleg is meghatározó akkumulátorok fejlesztésén kívül a hidrogén-alapú tárolási technológiákat találtam versenyképesnek a katonai alkalmazhatóság tekintetében. Nem tekintettem alternatívának a tucatszám létező, de a laboratóriumokból belátható időn belül nem kikerülő megoldásokat, így az akkumulátorok terén a domináns lítium-ion mellett kizárólag a szilárdtest akkumulátorokat tekintem valós lehetőségnek. Ugyanakkor az e technológia által kínált energiasűrűség-növekedés nem nagyságrendi, tíz éves időtávlatban és maximális optimizmus mellett is legfeljebb a jelenlegi gravimetrikus érték duplájára számíthatunk általa.

Az akkumulátorok egyedüli reális kihívója jelenleg a hidrogén-alapú technológia, így ezeket vetettem össze. Mivel hidrogén-alapú termék még számos szegmensben nincs piacon, nem volt értelme konkrét haditechnikai eszközök matematikai eljárásokon alapuló összehasonlításának, helyette az 5-8 paraméter alapján történő összevetésre alkalmas, kiváló

vizuális megjelenítést kínáló radar-diagramot (minőségsokszög, pókháló-diagram) választottam [194].

Elsőként a már korábban is előforduló kvázi-szabványnak tekinthető BB-2590/U katonai akkumulátort vettem össze egy teoretikus hidrogén alapú megoldással, az egyes paraméterek értékelésére egy tízpontos skálát alkalmaztam (nagyobb=jobb), mivel a hidrogénes eszköz ebben a formában nem létezik. Az említett akkumulátort több cég is gyártja és forgalmazza, technikai paramétereit típusonként $\pm 5\%$ eltéréssel lényegében 2010 óta változatlanok. Legfontosabb villamos paramétereit a 213 Wh kapacitás és a 288 W-os teljesítmény (14,4 V névleges feszültség mellett a maximális (nem impulzus) kisütőáram 20 A), így ezeket kívántam egy teoretikus hidrogénes eszközzel megvalósítani.

A hidrogénes rendszer alapjául a H3 Dynamics kereskedelmi forgalomban jelenleg is elérhető Aerostak A-300 típusát vettem alapul, ami tartósan 300 W teljesítmény leadására képes. Ebben a tartományban nem létezik hidrogénpalack így kreáltam egyet. Igen moderált töltőnyomás (100 bar) mellett 250 Wh-nyi hidrogén térfogata 0,2 liter, tömege 7,6 gramm lenne. Sajnos a megfelelő nyomástartáshoz az acél vastagságán nem lehet spórolni, így a palack térfogata (a nyomás-szabályozóval együtt) kb. 0,5 liter, tömege 700 gramm (ebből a 300 gramm a kereskedelmi forgalomban is elérhető nyomás-szabályozó). Mivel a hidrogén ára 2-8 USD/kg¹⁰⁸ [195], ezt nem is vettem figyelembe.

típus:	BB-2950/U	Aerostak A-300	palack	hidrogénes rendszer
	akkumulátor	PEM cella		
tömeg (g):	1.400	720	700	1.420
térfogat (l):	0,86 (6,1x12,7x11,2 cm)	1,68 (11,2x12,2x12,3 cm)	0,5	2,18
élettartam:	300 ciklus	40.000 óra	-	40.000 óra
alkalmazási hőmérséklet (°C):	-20 – 50	-40 – 80	-40 – 80	-40 – 80
önkisülés (%/hó):	3	-	0,001	0,001
ár (USD):	500	2.400	100	2.500

18. táblázat: akkumulátor és hidrogéncella összevetése személyi eszköz dimenzióban (saját szerkesztés [196] és [197] alapján)

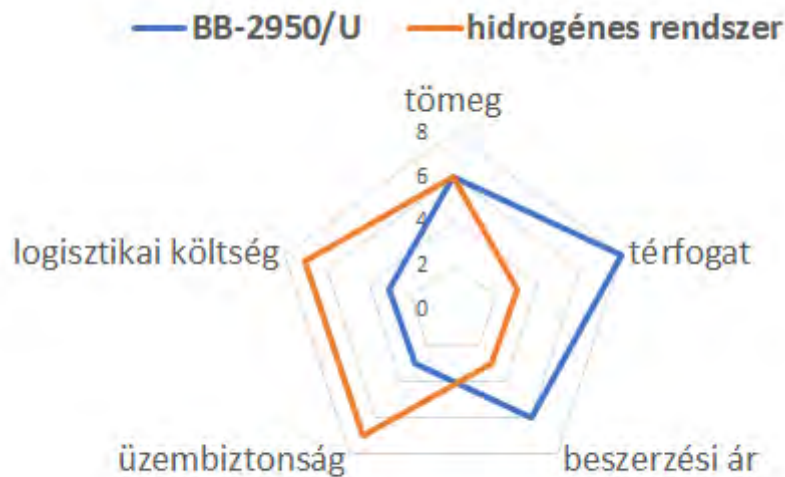
Az alkalmazott szempontrendszerben a tömeg a két eszköznél egyenlő, de csekélynek nem tekinthető, így 5 pontra értékeltem. A térfogatnál az arányoknak megfelelően az akkumulátor 8, míg a PEM-es rendszer 3 pontot kapott.

¹⁰⁸ A földgázból előállított 99,9 %-os tisztaságú hidrogén ára 2 USD/kg körül változott az utóbbi időben, a „zöld” hidrogén ennél lényegesen drágább.

A hidrogénes eszköz beszerzési ára ötszöröse az akkumulátorénak, de a H3 Dynamics jelenleg még rendelésre, kézi összeszereléssel készíti termékeit, miközben a BB-2950/U akkumulátorból több tízezer készül évente (a nem fő felhasználó Magyar Honvédségnél is százsámra megtalálható). Hasonló volumen esetén a hidrogénes eszköz előállítási költsége aligha lenne drágább 1.000 dollárnál. Így az elért pontszámok: 6 és 3.

Üzembiztonság címszó alatt figyelembe vettem a hidrogén sokkal kedvezőbb gyulladási hajlamát és a jobb hőmérséklet-tűrését is. Itt nem csak arról van szó, hogy nagyobb hőmérséklet tartományban alkalmazható, ennél sokkal fontosabb, hogy mind az energia-, mind a teljesítmény-sűrűsége jóval kevésbé függ a hőmérséklettől. Így az elért pontszámok: 3 és 7.

Logisztikai költség címszó alatt vettem figyelembe, hogy az akkumulátor 300 ciklusnyi élettartama nagyjából 2-5 évet jelent, míg a PEM-cellánál ez lényegében több emberöltő. Az akkumulátor önkisülése csekély, de ezzel együtt folyamatos gondozást, azaz időszakos regeneráló töltést igényel, ellenkező esetben kb. másfél év alatt bekövetkezik a mélykisülés, ami után az akkumulátor többé nem működik, míg a hidrogén tárolhatósága csaknem végtelen (saját magam is láttam raktárban olyan 70 éves hidrogénpalackokat, amelyek nyomása még a névleges értéken belül volt). Ennek megfelelően a pontszám 3 és 7.



46. ábra: A BB-2950/U típusú taktikai akkumulátor és egy teoretikus PEM-cellás személyi villamos ellátó rendszer összehasonlítása (saját szerkesztés)

Az ábra alapján jól látható, hogy a két megoldás ebben a szempontrendszerben hasonlóan teljesít (az ötszögek által lefedett terület közel azonos). Vagyis az alkalmazási prioritások (fontosabb-e a beszerzési ár, mint az üzembiztonság?) határozzák meg, hogy melyik rendszer a jobb számunkra. A valóságban persze kész PEM-cellás rendszert még nem lehet 1.000

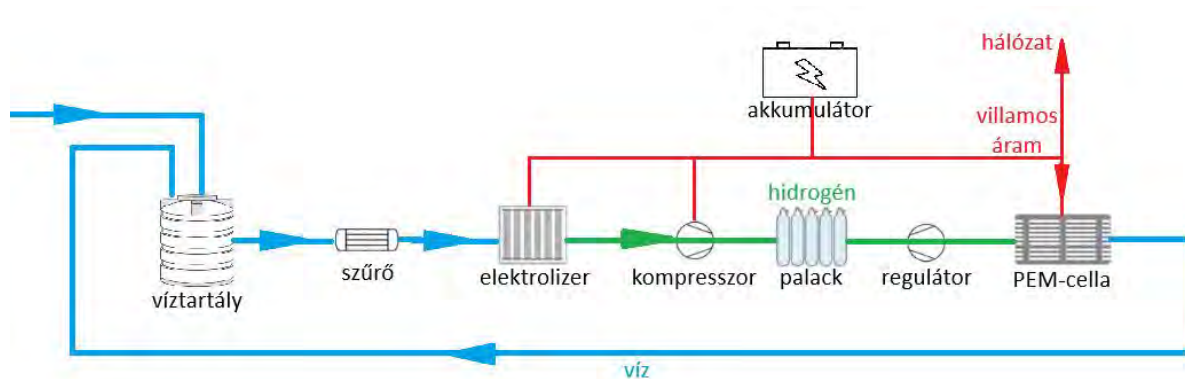
dollárért kapni, de az ábra alapján ez már jelenleg is csak fejlesztési-gazdaságpolitikai döntés kérdése. Ez a megállapítás összhangban van az általam elindított és nemrégiben sikerrel zárult, korábban már említett FUSS-projekt megállapításával is [141], miszerint a személyi akkumulátoros rendszerekhez hasonló műveleti képességet biztosító hidrogéncellás rendszer megvalósíthatóságának nincs műszaki akadálya.

Megvizsgáltam a gridek részeként működő energia-tároló lehetőségeket is. Itt egy szintén kereskedelemben is kapható, Huawei LUNA2000 sorozatot választottam az akkumulátoros megoldásként. Ezt a típust a gyártó háztartási naperőművekhez ajánlja, de a benne alkalmazott lítium-ferrofoszfát technika jó környezetállósága miatt általánosan elterjedt a katonai gridekben is, az elérhető 5-15 kWh kapacitás is megfelel a kisebb katonai gridek igényeinek.

gyártó:	Huawei		
típus:	LUNA2000-5	LUNA2000-10	LUNA2000-15
tömeg (kg):	63,8	113,8	163,8
térfogat (l):	60,3 (67x15x60 cm)	96,5 (67x15x96 cm)	132,6 (67x15x132 cm)
élettartam:	6.000 ciklus		
alkalmazási hőmérséklet (°C):	-10 – 50		
önkiszülés (%/hó):	2		
kapacitás (kWh):	5	10	15
töltési/kisütési teljesítmény (kW)	2,5	5	
ár (USD):	4.200	6.800	9.300

19. táblázat: Huawei típusú szolár-akkumulátorok főbb jellemzői (saját szerkesztés [198] alapján)

Hasonló képességű kereskedelmi termékként elérhető hidrogénes megoldást itt sem találtam, így újra csak magam állítottam össze egyet. Mivel ebben a funkcióban az energia betárolását is meg kell oldani, a teljes rendszer a PEM-cellán és a palackon kívül magába kell foglalja a hidrogént előállító elektrolizert (vízbontó), a tárolási nyomást előállító kompresszort és a vízsűrőt is. A rendszer biztos indításához egy kisméretű akkumulátorra is szükség van.



47. ábra: Hidrogén-alapú villamosenergia-tároló rendszer egyszerűsített vázlata (saját szerkesztés). Az ábra nem tartalmazza a hálózat felé az AC/DC konverziót és a kontrollert

A PEM cella egy elektromos motorkerékpárokhoz gyártott modell, ez kb. 60 liter atmoszférikus nyomású hidrogént fogyaszt óránként, így ehhez kellene méretezni az elektrolizert. A legkisebb általam talált elektrolizer teljesítménye 500 liter/óra, így az egyszerűség kedvéért ezt alkalmaztam. Ez az egység már tartalmaz egy 4 literes vízartályt, és egy előkompresszort, így 35 bar-os, 99,995 %-os tisztaságú H₂-t állít elő. Sajnos a kompresszor hasonlóképpen túlméretezett.

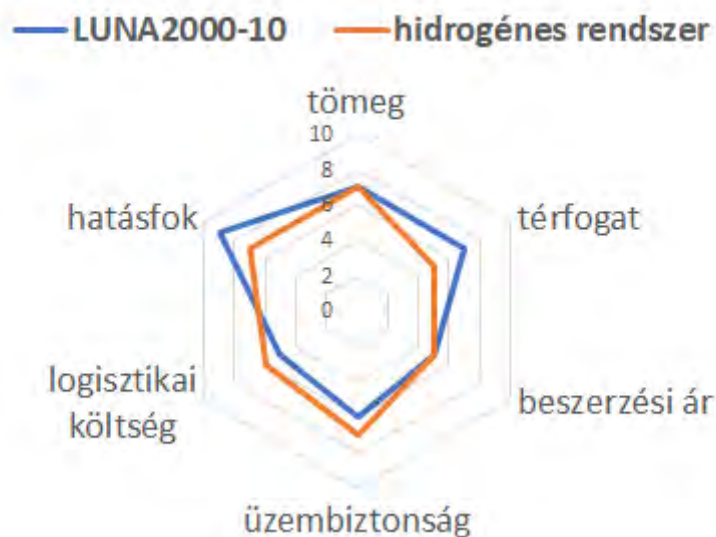
típus:	TJS36-10	AEM EL 4.0	-	F13
	PEM cella	elektrolizer	kompresszor	tartály
tömeg (kg):	3,3	35	69	6,5
térfogat (l):	26 (80x18x17 cm)	69 (48x62x26 cm)	163 (94x29x60 cm)	13
élettartam:	40.000 óra	5.000 óra	-	
alkalmazási hőmérséklet (°C):	-20 – 50	10 – 50	-20 – 50	
önkisülés (%/hó):	0,001	-		
ár (USD):	3.300	2.300	500	400

20. táblázat: Egy teoretikus hidrogén-alapú villamosenergia-tároló rendszer főbb elemei (saját szerkesztés a [198] és a [197] alapján)

Végző soron a hidrogénes rendszer tömege 115 kg-ra adódott, ami csaknem megegyezik a hasonló teljesítményű LUNA2000-10 hasonló adatával. A térfogatra 270 literre adódott, de a jelentősen túlméretezett elektrolizer és kompresszor optimalizálásával ez alighanem 200 liter alá lenne szorítható a jelenlegi technológiákkal is. Beszerzési költsége a kiegészítő csövek, csatlakozók nélkül 6.500 USD, ami szintén nagyságrendileg azonos az akkumulátoros rendszerével. Ezekben a jellemzőkben a kapott pontszámok rendre: 7-7, 7-5 és 5-5.

A teljes hidrogénes rendszer élettartamát a többi elemhez képest viszonylag hamar elkoszolódó vízszűrő limitálja és mivel a hidrolízishez folyékony halmazállapotú víz szükséges, de a rendszer az elektrolizer fűtésével alkalmassá tehető alacsonyabb hőmérsékletű

működésre is. Üzembiztonságra 6-7, míg logisztikai költségre 5-6 pontszámokat adtam. Ebben a kontextusban még egy paraméter figyelembe vettem, ez pedig a hatásfok, ami az akkumulátoros rendszer esetében kb. 90 %, míg a hidrogén-alapúnál legfeljebb 60 %. Ez terepi körülmények közötti zöld hidrogén előállítását feltételezve nem elsődlegesen fontos, de nem hagyható figyelmen kívül, így a két rendszer 9 és 7 pontot kapott.



48. ábra A LUNA200-10 típusú szolár akkumulátor és egy teoretikus PEM-cellás villamosenergia-tároló rendszer összehasonlítása (saját szerkesztés)

Az ábra alapján jól látható, hogy a két rendszer (legalábbis az általam megszabott prioritások szerint fej-fej mellett teljesít, lényegében függetlenül az alkalmazási prioritástól, hiszen a nemcsak a hatszögek által lefedett terület nagysága hasonló, de az alakjuk is.

Összehasonlítható a hidrogénes és az akkumulátoros energiatárolás még nagyobb volumenben is, de a több 100 kW-os rendszerek minden esetben (az akkumulátorosak is) egyedi igények alapján épülnek, így nehezen összevethető, viszont az előző összehasonlítást kicsit tovább gondolva a trend egyértelmű. Tételezzük fel, hogy változatlan elvart teljesítmény mellett a kapacitást szeretnénk növelni 50 kWh-ra. A LUNA rendszer moduláris, vagyis, mindössze 4 további akkumulátor-modult kell illeszteni a rendszerhez [199]. Ezek azonban 144 literrel és 200 kilogrammal növelik a rendszer méreteit és csaknem 10.000 USD-vel a bekerülési költségeket. Mindeközben az előzőleg összeállított teoretikus hidrogénes rendszerhez csak négy további palack lenne szükséges, az általuk okozott növekmény pedig mindössze 52 liter, 26 kg és 1.600 USD.

Ebből nyilvánvalóan következik, hogy 100 kW-os vagy nagyobb tartományokban (nagy táborok vagy béke idejű létesítmények) már jelen technikai szinten is jelentősen kedvezőbb paraméterekkel bír a hidrogénes rendszer, a gazdaságban történő terjedésének

Magyarországon még elsősorban adminisztratív akadályai vannak, pl. nem tisztázott, hogy a hidrogén üzemanyagnak minősül-e és jövedéki-adó köteles vagy sem. Az ilyen kérdések tisztázására és a technológia további terjedésének elősegítésére jött létre 2021-ben a Magyar Hidrogéntechnológiai Szövetség (MHTSZ), amelynek alapító tagjai között én képviseltem a Magyar Honvédséget).

Azt is meg kell említeni, hogy a mintegy 10 éves távlatban az akkumulátor-technikában egyedül valószínűsíthető, várhatóan jelentős energiasűrűség-növekedést okozó szilárdtest akkumulátorok elméletileg is csak 3-4-szeres javulást hoznak majd magukkal. Mindeközben a hidrogén-fronton a PEM-cellák, a elektrolízerek és a kompresszorok terén is várható egy moderált teljesítményarányos méret és tömegcsökkenés, de a tárolás területén komoly hatásfok-javulást hozhatnak a már jelenleg is használt 750 bar-os kompozit palackok, a folyékony hidrogén-tárolás és a fém-abszorpciós technológiák [200].

5.2. A katonai használatra alkalmas villamosenergia-termelő lehetőségek összehasonlítása

A terepi alkalmazásban domináns dízelaggregátoroknak jelenleg nincs igazi alternatívája. A [4. fejezetből](#) megállapítható, hogy más forrásból in situ termelésre csak a napenergia és korlátozottan a szél energiája alkalmas, ugyanakkor ezek elérhetősége nem állandó. Mivel a katonai műveletek nem engedik meg ezt a fajta függőséget, a dízelaggregátorok továbbra is a terepi villamosenergia-ellátás gerincét képezik, de a növekvő igények mellett nem nélkülözhetőek a megújuló források sem.

A két technika együttes alkalmazását teszi lehetővé az ún. Hybrid Smart Grid-ek. A nehezen fordítható kifejezés¹⁰⁹ egy olyan tábori villamos-energetikai rendszert takar, ahol a hibrid arra utal, hogy az aggregátorok mellé integrálja a megújuló energia-források helyszíni kiaknázását, míg az intelligens jelenti a villamos energia tárolását, a termelő és fogyasztó eszközök közötti kapcsolatot, amelyet a rendszer a környezeti paraméterek, a taktikai igények és a lehetőségek függvényében automatikusan optimalizál, adott esetben erre a mesterséges intelligenciát is felhasználva.

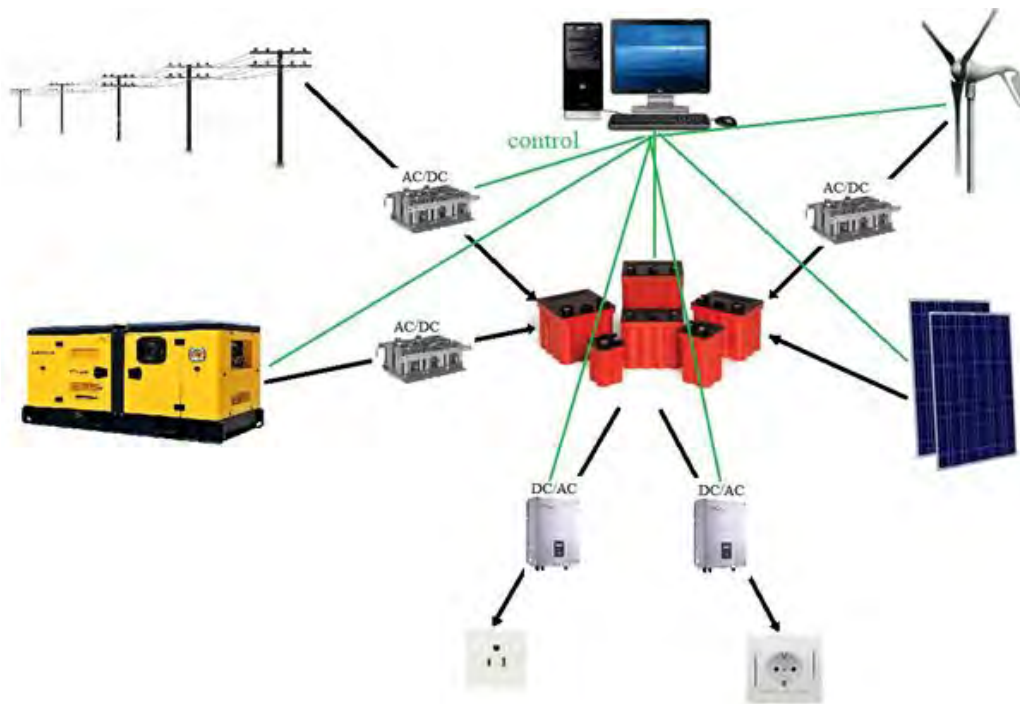
Ezek az eszközök civil környezetben már régóta használatban vannak, így a katonai alkalmazás is 7-es, 8-as TRL-el bír. Az ilyen rendszerekre való katonai igény már az ezredfordulón megfogalmazódott, és valamennyi korszerű haderő el is kezdte a fejlesztésüket

¹⁰⁹ Az angol kifejezésnek tartalmilag talán leginkább az „intelligens hibrid energia-hálózat” feleltethető meg.

a jelenleg is elérhető civil rendszereket alapul véve. Személyes kapcsolataim révén bizonyosan tudom, hogy mind az USA-ban, mind a nyugat-európai államokban léteznek ilyen eszközök a fejlesztés különféle fázisaiban, míg Kelet- és Közép-Európában legalábbis kezdik felismerni a katonai döntéshozók is a technológiában rejlő lehetőségeket. Arról nem találatam hiteles forrást, hogy Oroszországban, Japánban, Kínában, vagy a világ más részein folynak-e ilyen irányú kutatások. Ismert viszont, hogy ezekben az országokban is léteznek polgári célú hibrid rendszerek, így mivel a hasonló kérdésekre mindenhol hasonló válaszok születnek, valószínűsíthető, hogy a fejlett technológiával rendelkező pl. távol-keleti országok is dolgoznak a saját katonai rendszereiken. A már létező és ismert hibrid rendszerek a következő innovatív funkciókat kínálják:

- A termelés és a fogyasztás valós idejű monitorozása;
- Automatikus diagnosztika és kontroll;
- Számítógép-hálózati integráció;
- „Öngyógyítás”.

Ilyenek rendszeresítéséről bármelyik haderő részéről még nincs információ, de a technológia terepi validációja megvalósultnak tekinthető, ezek az eszközök már a CL15 gyakorlaton is bizonyítottak [176], és jelenleg is több rendszert élesben tesztelnek a különböző haderők [201]. A terjedésüknek egyedüli gátja az, hogy nyilvánvalóan drágábbak, mint egy egyszerű aggregátor. Annak ellenére, hogy az üzemanyagok is rendkívül drágák a műveleti területen, hiszen azt miután a legközelebbi biztonságos helyen megvásárolja a hadsereg, adott esetben több száz kilométerre kell elszállítani, fegyveres konfliktus esetén pedig szállítóeszközt biztosítani is kell, ezek a hibrid rendszerek csak sok év használat után térülnek meg. Mivel a haderők döntő többsége általában nincs bevetésen, sokkal olcsóbb egy egyszerű aggregátort a laktanyában parkoltatni, mint egy hibrid rendszert. Viszont amiért a fosszilis üzemanyagok az időszaki kilengések mellett is folyamatosan drágulnak és ahogy előtérbe kerül a műveleti biztonság kérdése, jelenleg csaknem biztosra vehető, hogy ezek a berendezések is megjelennek a hadseregek eszköztárában.



49. ábra: A hibrid smart grid egy lehetséges kiépítése (saját szerkesztés)

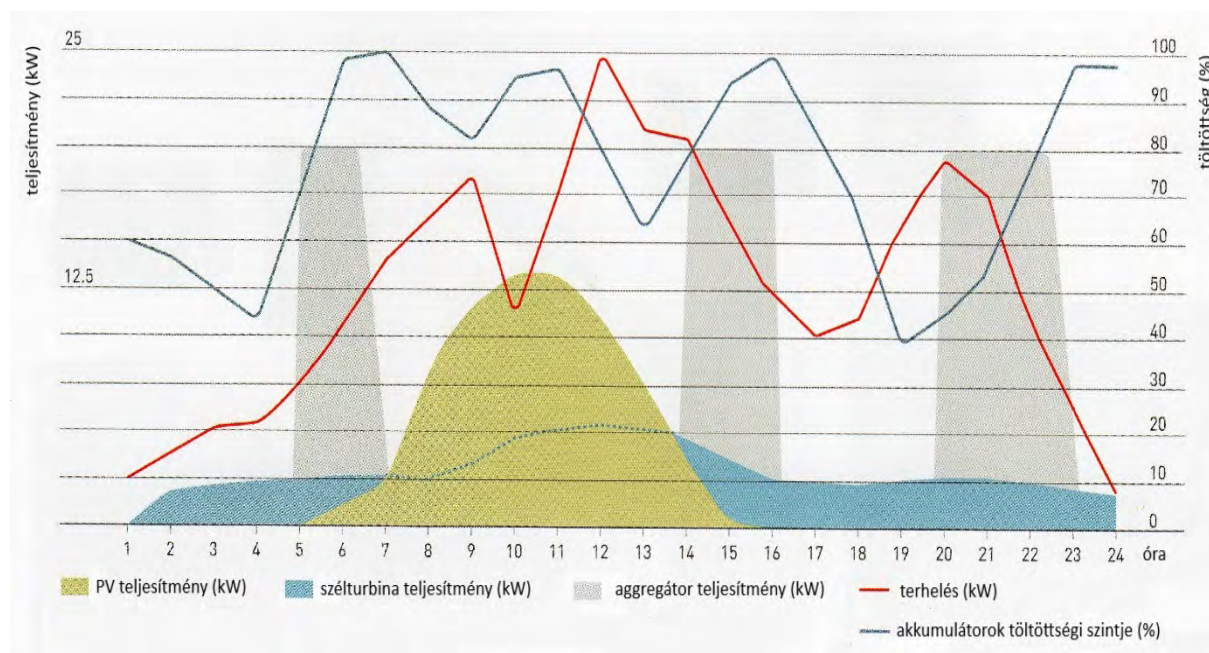
Az eddig nyilvánosan is bemutatott katonai hibrid smart rendszerek mindegyike ún. off-grid, amit magyarra „sziget-üzemmódú”-nak lehet fordítani. Ez azt jelenti, hogy semmilyen kapcsolata nincs a polgári távvezetékes infrastruktúrával vagy bármilyen másik griddel. Az, hogy a hagyományos aggregátorok erre nem képesek, az az egyszerűségükből fakad, és abból, hogy a haditechnikai eszközök tervezésekor a worst case¹¹⁰ filozófia érvényesül. Tehát az aggregátorok esetében feltételezik, hogy nincs polgári villamos infrastruktúra, ami a valóságban viszont nem feltétlenül van így.

A klasszikus háborún, vagyis a reguláris haderők összecsapásán kívül a hadseregek számos más tevékenységet is végezhetnek és végeznek is. Végrehajthatnak feladatokat békemisszió keretében és szerepet vállalnak a természeti vagy ipari katasztrófák során a mentésben és a helyreállításban is. Ilyenkor a polgári infrastruktúra működőképes maradhat, ha pedig onnan veszi az energiát a katonai egység, akkor a villamos energia előállításához szükséges letárolt üzemanyag jelentős részét megspórolja, amivel kiterjesztheti saját autonóm működési idejét.

Ha mégis megszűnik a polgári villamosenergia-szolgáltatás, vagy csak annak kapacitása nem képes fedezni az adott alakulat működésének szükségletét, akkor egy smart grid képes arra, hogy a szükséges ideig saját forrásaiból kipótolja, vagy teljes egészében kiváltsa azt. Ha a smart grid a távvezetékek meglététől függetlenül össze van kapcsolva egy másik griddel,

¹¹⁰A legrosszabb eshetőség.

adott esetben egy szomszédos katonai egység hálózatával, akkor pedig nagyobb dimenziókban is megvalósulhat a villamos energiával végrehajtott manőverezés.



50. ábra: A CL15 gyakorlaton működtetett Pfisterer¹¹¹ gyártmányú hibrid grid 24 órás működési diagramja (a gyári szoftverből 2015. június 19-én nyert kép, amely később a reklám brossúrákban is megjelent¹¹² – csak a feliratok kerültek lefordításra)

Ez ellen csupán két tényező szól, az egyik, hogy az összekapcsolt gridek egy támadás során sérülékenységet jelentenek. Ez hagyományos kinetikus támadás esetében nem valós kockázat, mert egy szomszédos grid esetleges sérülése vagy kiesése nincs hatással egy másik gridre. Arról nem találtam forrást, hogy egy esetleges EMP támadás esetén a grideket összekötő kábel mennyiben növeli a rendszer kitettségét, viszont feltételezem, hogy az infokommunikációs eszközök jelentős része már a villamosenergia-ellátás megszűnése előtt tönkremegy. Ezeknél sokkal reálisabb fenyegetés egy kibertámadás, amelynek során, ha egy grid kompromittálódik, akkor a vele kapcsolatban álló gridek is támadhatóvá válnak, esetleg a teljes taktikai informatikai hálózat integritása is veszélybe kerülhet. Ez valós kockázat, de ennek kezelése nem a műveleti logisztikai támogatás feladata.

Ennél kézzelfoghatóbb probléma, hogy az ilyen jellegű összekapcsolódások kivitelezéséhez a gridet el kell látni középfeszültségű interfésszel, továbbá jelentős méretű és tömegű kábel is szükséges a csatlakozás fizikai kiépítéshez. Egy háborús időszakban

¹¹¹ A gyakorlat idején még csak kísérleti eszközt a cég később CrossPower fantázianéven forgalmazta, abból egy példányt 2018-ban a vilniusi székhelyű NATO Energiabiztonsági Kiválósági Központ (ENergy SEcurity Centre Of Excellence – ENSEC COE) vásárolt meg.

¹¹² A cég marketing okokból a gyakorlat legszelesebb napját örökítette meg.

végrehajtott katonai művelet során kiépített tábor esetén nincs sok létjogosultsága az erősáramú kábelek fektetésének, hiszen a csapatok adott esetben gyorsan mozognak, akár naponta többször is áttelepülhetnek. A már említett missziós vagy katasztrófavédelmi feladatok végrehajtása során viszont határozottan előnyös lenne egy ilyen kapcsolódási lehetőség.

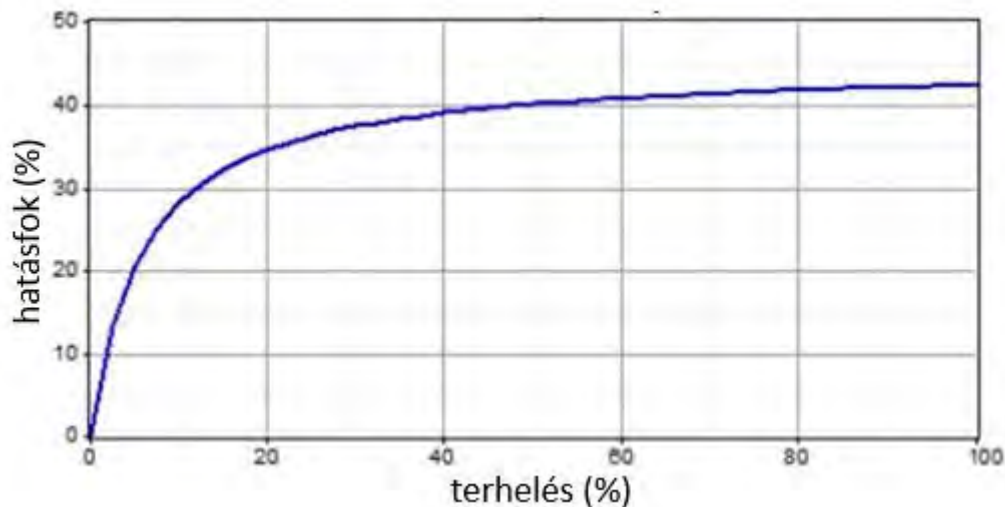
A 43. ábrán egy létező hibrid smart grid valós 24 órás működési diagramja látható. A rendszer 20 kW aggregátoros, 20 kWp napelemes és 5 kW szélturbinás termelő kapacitást kapott, amit egy 60 kWh kapacitású lítium-ion akkucsoport egészített ki. Jól látható, hogy ebben a konfigurációban az aggregátorok csupán 7 órát üzemeltek. Az is jól látszik, hogy az aggregátorok a legtöbb polgári automatikus rendszerrel ellentétben nem az akkumulátorok töltöttségének egy bizonyos szint alá esésekor kapcsolnak be, hanem a vezérlő szoftver figyelembe veszi a napszakot, a pillanatnyi rendelkezésre álló megújuló teljesítményt és a terhelést, és ezek függvényében számítja ki a szükséges üzemidőt.

Az ábra alapján is megállapítható, hogy a hibrid rendszereknek továbbra is alapeleme az aggregátor, hiszen az a már említett worst case esetén is képes ellátni a fogyasztókat. Ugyanakkor az az alapkérdés, hogy adott teljesítményű aggregátorhoz mennyi napelemes és mennyi tároló kapacitást érdemes létrehozni az optimális működés érdekében. Kutatásaim során foglalkoztam azzal, hogy megállapítsam egy terepi smart grid optimális összetételét, de minden esetben arra jutottam, hogy nincs ilyen. Az optimális összetételt az alábbi paraméterek határozzák meg:

- A végrehajtandó feladat jellege (háborús, missziós, katasztrófa helyzet);
- A várható települési idő;
- Földrajzi adottságok (földrajzi szélesség és hosszúság, magasság, terep);
- Évszak;
- Várható időjárás;
- Logisztikai támogatás kapacitása.

A hibrid áramellátó rendszerekben jelenleg az akkumulátorok a legdrágább elemek, mégis nehezen nélkülözhetőek, mert az aggregátor-napelem páros nem lenne önmagában elég rugalmas. Ugyanakkor önmagukban is nagyon hasznosak, hiszen képesek kompenzálni az aggregátorok terhelésfüggő hatásfokváltozásait, ezzel akár a teljes üzemidő alatt 40 %-os tüzelőanyag-megtakarítást eredményezve [202], [13], mert a fogyasztókat alapvetően az akkumulátorok látják el egy inverteren keresztül, az aggregátorok csak egy kritikus töltöttségi szint (jellemzően 20 %) alatt kapcsolnak be, akkor viszont maximális hatásfokkal üzemelnek.

Ez a tüzelőanyag-felhasználáson kívül jótékony hatással van az aggregátorok élettartamára is [202].



51. ábra: Egy dízelaggregátor hatásfokának változása a terhelés függvényében [203]

Nem lenne értelme a hagyományos aggregátoros és a megújuló forrásokra építő villamosenergia-termelést összehasonlítani, mert a katonai alkalmazás szempontjából ez érdektelen, ugyanakkor az aggregátoros és a hibrid termelési módok összevetésének már van alapja. Elvileg meg lett volna a lehetőség egy-egy rendszerben álló aggregátorral összevetni a CL15-ön közelről megismert valós eszközöket, de ezek még elsősorban technológiai demonstrátorok voltak, számos paraméterükben nem véglegesek. Mivel így ismét nem konkrét eszközöket, hanem koncepciókat hasonlítottam össze, újra a radar-diagramokat találtam a legmegfelelőbbnek. Ennek során az alábbiakat pontoztam: beszerzési költség, üzemeltetési költség, ellátás-biztonság, mobilitás, műveleti biztonság.

A beszerzési költség tekintetében egyértelműen drágább a hibrid rendszer. Önmagában a napelemek és a vezérlés költsége nem igazán jelentős. A napelemek annyira olcsók (500 USD/kW), hogy egy terepi használatra alkalmas 10 kW-os dízelaggregátor árával összevetve (5.000 USD) azt kapjuk, hogy egy aggregátor hibriddé tétele azonos megújuló kapacitással számolva is legfeljebb megduplázza a költségeket. Más kérdés az akkumulátoroké, ezek lényegesen drágábbak, már egy nem túl jelentős 5 kW-ás kapacitású egység is újabb 5.000 dolláros árcédulával bír. Beszerzési ár tekintetében 8 pont az aggregátoré és 3 pont a smart hibrid rendszeré.

Az üzemeltetési költségek tekintetében a domináns tényező a tüzelőanyag ára. 10 kWh teljesítmény előállításához kb. 3 liter gázolaj (vagy F-34) szükséges. Egy 10 kW-os aggregátor névleges terhelésen egy nap 240 kWh villamos energiát állít elő, ami 72 literes

napi felhasználás lenne, de a gyakorlatban az a jellemző, hogy ha egy aggregátor az üzemidejének a felében a névleges teljesítményének 80 %-án üzemel, az már igen jó kihasználtságot jelent, de az sem ritka, hogy órákig csak 10-20 % terhelésen működjön. A CL15 gyakorlat tapasztalatai alapján a szóló aggregátorok napi átlagos terhelése 50-60 %, ami 3,5 liter/kW üzemanyag-felhasználást jelent és összesen kb. 120 kWh-ás napi termelést.

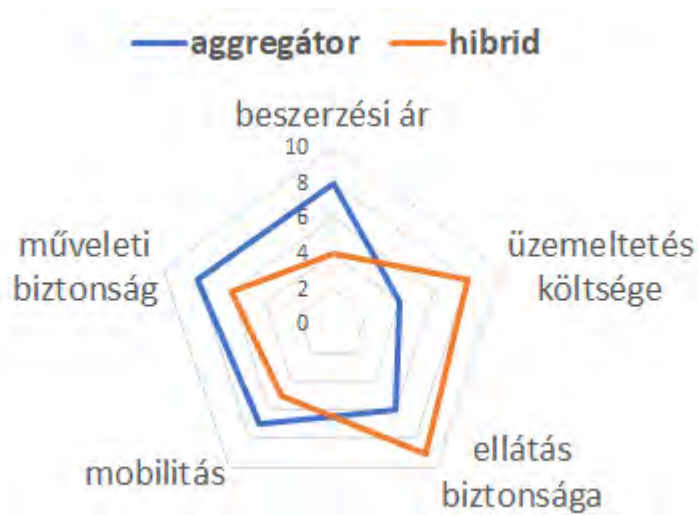
Egy 10 kWp-s napelem-rendszer szintén saját tapasztalataim szerint Magyarországon napi 30-50 kWh energiát állít elő, éves átlagban napi 35 kWh körül, bár ez extrém esetben nulla is lehet. Azonos aggregátoros és napelemes kapacitás esetében ez utóbbiak a napi felhasználás kb. egyharmadát képesek fedezni. További megtakarítás, hogy smart rendszer esetében az aggregátorok mindig a névleges terhelésen üzemelnek. Ez nem csak üzemanyag-megtakarításként jelentkezik, de a dízelmotor üzembiztonságára is kedvezően hat.

Fontos tényező, hogy műveleti területen az üzemanyag ára messze nem azonos a benzinkutakon feltüntetett árakkal. Műveleti területen erre mindig ráakódik a szállítás és elosztás költsége, ellenséges területen pedig a szállítási útvonalak és gépjárműoszlopok fegyveres biztosítása is, így a tényleges költség akár a beszerzési ár többszöröse is lehet. 4 pont az aggregátoré, 8 pont a hibrid rendszeré.

Az ellátás biztonsága szempontjából a hibrid rendszeré az előny. Az szóló aggregátor meghibásodása esetén az ellátás azonnal megszűnik, míg a hibrid rendszer egyes komponenseinek meghibásodása esetén a többi általában képes egy ideig ellátni a fogyasztói oldalt, így lehetőséget adva a javításra és/vagy cserére. Bár a dízelaggregátorok igen megbízhatóak, csak 6 pontot kapnak, míg a hibrid rendszer 9-et.

Mobilitás esetében azt vettem figyelembe, hogy a hibrid rendszer értelemszerűen nagyobb és nehezebb, mint egy szóló aggregátor, illetve a napelemek (szélturbina) elhelyezése a kialakítástól függően több-kevesebb, de mindenképpen plusz telepítési időt jelent. A pontszám 7 és 5.

Műveleti biztonság címszó alatt azt vettem figyelembe, hogy az egyes eszközök alkalmazása mekkora kockázatot jelent a csapat részére. Itt nem a már korábban pontozott szállítás biztonságára gondolok, hanem arra, hogy a villamosenergia-ellátás eszközei milyen hatással vannak a csapatok biztonságára. Egy szóló aggregátornak egyedül a hangja, ami esetleg árulkodó lehet a csapat elhelyezkedésére, míg a napelemek (vagy a szélturbina) nagyban megkönnyítik a vizuális felderíthetőséget is. A hibrid eszközök, ha integrálásra kerülnek a taktikai számítógépes rendszerbe, némi kiberbiztonsági kockázatot is jelentenek. Ezek a fenyegetések minimálisak, mert pl. egy százfős tábor helyét többnyire nem a napelem leplezi le, így a pontszámok 8 és 6.



52. ábra: Az aggregátoros és a hibrid villamosenergia-előállítási koncepció összehasonlítása

Az ábrából az állapítható meg, hogy a két ötszög által határolt terület nagyjából azonos, vagyis a két megoldás (legalábbis ebben a szempontrendszerben) hasonlóan alkalmas a katonai felhasználásra, konkrét esetben a szempontok súlyozása lehet döntő.

5.3. Az automatizált villamosenergia-menedzsment lehetőségei

Nincs egzakt elfogadott érték azzal kapcsolatban, hogy a szofisztikált vezérlés milyen hatással van egy villamos hálózat hatékonyságára. A szimulációk szerint ez akár 5-10 % is lehet, de ez nagyban függ az alap hálózat hatékonyságától. Mikrogrideket fejlesztő cégek szakembereivel folytatott konzultációk során ők is hasonló eredményekről számoltak be, vagyis a hardveresen már kész és működőképes hálózat hatásfokát a több lépésben végrehajtott szoftveres optimalizáció ilyen mértékben volt képes javítani.

Elvben hasonló értékekre lehetne számítani a személyi és a járműfedélzeti hálózatoknál, de én publikus eredmények hiányában legfeljebb 5 %-nyi javulást remélek, ugyanis itt jellemzően egyetlen energiaforrás van, így jóval kevesebb a módosítási, beavatkozási lehetőség. Ugyanakkor a hatékonyság javítása nem az egyedüli előnye az automatikus energia-menedzsmentnek, az a tény, hogy képes javítani az ellátás biztonságát és ezáltal javítja az alkalmazó túlélési esélyeit, önmagában is fontossá teszi.

Mindezek miatt a fejlett automatikus menedzsment eszközöket implementáló villamos-hálózat vezérlő eszközöknek a szárazföldi csapatoknál történő lehetséges alkalmazás minden szintjén, a személyi villamosenergia-hálózatoktól egészen az alegység, egység szintű szervezetek energia-biztosításáig kívánatos és várható is az alkalmazásuk.

5.4. A gyalogos katonák képességeit kiterjesztő villamos energetikai megoldások

A legfejlettebb hadseregeknek a gyalogos katonák digitalizációjára irányuló törekvései nyomán egyre hangsúlyosabb a villamos energia biztosításának kérdése. Az akkumulátorok energiasűrűségének növelése csak kis lépésekben valósul meg, így a küldetésekhöz a katonáknak jelentős tömegű akkumulátort kell magukkal vinniük. Egy bizonyos mennyiségén túl már nincs értelme az akkumulátort cipelni, érdemes megfontolni azok terepi körülmények között történő töltésének lehetőségét.

A fenti elgondolásnak megfelelően a Nett Warrior részeként a korábban már hivatkozott egyéni infokommunikációs eszközökön és tartozékain kívül raj, illetve szakasz szinten rendszeresített kollektív felszerelésként a következő eszközök állnak még a katonák rendelkezésére [204]:

- SPM-622 töltésvezérlő;
- QinetiQ North America 1 kW-os generátor;
- Thales MUBC¹¹³ akkumulátortöltő;

A töltésvezérlő képes a rendszeresített Harris rádiók akkumulátorainak, illetve a BB-2590U típusnak a töltésére másik BB-2590U akkumulátorról, fali aljzatról, gépjármű szivargyújtóról vagy bármilyen törpe egyenfeszültségről 34 V / 55 W-ig, amelyet jellemzően napelemmel használnak ki. Az eszköz mindössze 0,4 kg, de a hozzá tartozó masszív kábelek ennél nehezebbek. A hat csatlakozóján három darab független kétirányú töltési utat képes kialakítani [188].

Az akkumulátortöltő fali dugaszoló aljzatról vagy gépjármű szivargyújtóról egyszerre képes kettő darab BB-2590U akkumulátort vagy nyolc darab Harris PRC rádiókhöz tartozó akkumulátort tölteni. Az eszköz tömege kábelekkel együtt 2,72 kg [205]. A generátor egy kétütemű Honda dízelmotorral meghajtott, feltöltve 17,5 kg-os, csendesüzemű eszköz. 110 V váltakozó és 24 V egyenfeszültséget képes szolgáltatni egy feltöltéssel (2,2 liter) 80 %-os terhelés mellett 5 órán keresztül [206]. Az eszközkészletet egészen biztosan kipróbálták különféle napelemekkel és hidrogén üzemanyagcellával is [107], [207], de ilyenek rendszeresítéséről még nincs hír.

A magyar digitális katona koncepció megvalósítása során is szükséges lesz átgondolni a katonák villamosenergia-ellátását. Amennyiben lesznek olyan csapatok, mint pl. a Különleges

¹¹³ Modular Universal Battery Charger

Műveleti Dandár, ahol az elvárt képességek között szerepel az ellenség mélységében való tevékenység, akkor hasonló eszközökre szükség lesz. A napelem viszonylag egyszerű kérdés, már számtalan gyártó állít elő hajlítható típusokat, és ezek némelyike már 20 % feletti hatásfokot ígér. Tehát egy kb. 1 m²-es darab akár 150 W-os csúcsteljesítményre is képes, miközben csak 2 kg körüli a tömege. A textil alapú valóban összehajtható típusok még jellemzően alatta maradnak a 20 %-os hatásfoknak, így m²-enként 150 W körüli a csúcsteljesítményük, viszont hasonló tömeg mellett egészen kicsire összehajthatók. Ezek drágábbak, mint a hagyományos szilícium-üveg napelemek, de a költségeik egy katona teljes felszerelésén belül elhanyagolható.

Az aggregátor kérdése nehezebb, mivel ilyen kicsi méretben alig készülnek dízelmotorok, és azok hatásfoka is alatta marad a nagyobb típusokénak. Bár az 5 üzemóra feltöltött eszköz energia-sűrűsége meghaladja az akkumulátorokét, igazából messze nem optimális megoldás. Működés közben zajos és nagy mennyiségű hőt termel, így csak statikusan üzemeltethető, ráadásul a kiürült eszköz még mindig 15 kg holt terhet jelent, és ezt a tömeget nem is lehet egyenletesen elosztani egy emberen, mint a több kisebb akkumulátort.

Elvileg a NATO SFC in situ hidrogéntermelés hiányában kizárja az üzemanyagcellát, mint megoldást, de a teljes igazsághoz hozzátartozik, hogy bár az amerikai mini-aggregátor képes az F34-el üzemelni, igazából nem ehhez az üzemanyaghoz lett tervezve. Egy ugyancsak kb. 5 kWh-ra feltöltött hidrogén-tartályból és PEM cellából álló rendszer, bár katonai változata még nincs, hasonló tömeg- és térfogatadatokkal bír, viszont akár háton hordva is üzemeltethető lenne, mert zajtalan, minimális a hőkibocsátása [208], és hosszabb távon még jelentős fejlesztési potenciál van benne, ami egyáltalán nem mondható el a mini-aggregátorról. Jelenleg már valószínűleg nem az SFC tartja még távol az üzemanyagcellákat a katonai alkalmazástól, hanem az árak, hiszen a használatának lehetőségét számos országban vizsgálják, és az EDA, illetve a NATO is foglalkozik vele.

Ugyanakkor a Nett Warrior töltéselosztójának igen korlátozottak a képességei, más hasonló eszközről pedig még nem találtam információt. Az alkalmazható akkumulátorok típusok számát nem az elektronika korlátozza, hiszen a COTS¹¹⁴ pici és olcsó feszültségszabályozó chippekkel 0-30 V között, illetve több lépcsőben lényegében tetszőleges feszültség szint és töltőáram beállítható, hanem a rendszeresített kábelek, így ezt nem tekintem hibának. Viszont ez az elosztó nem képes egy forrásból több akkumulátort tölteni, még akkor sem, ha a forrás teljesítménye ezt egyébként lehetővé tenné és ugyancsak nem képes több

¹¹⁴ Commercial Off-The-Self – „polcos”, azaz bármikor, bárki számára elérhető kereskedelmi termék.

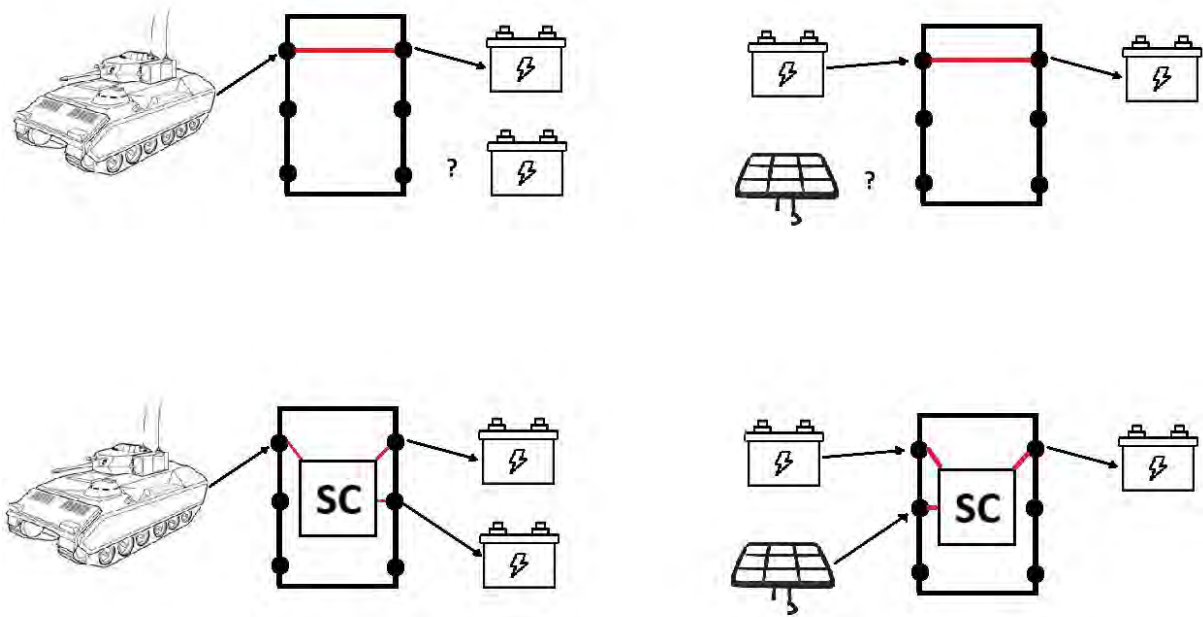
forrás teljesítményét egy akkumulátor töltésére koncentrálni, még akkor sem, ha egyébként az akkumulátor képes lenne nagyobb töltőáram fogadására.

Ez bizonyos szituációkban nehézséget okozhat. Például egy „A” típusú akkumulátort sürgősen fel kellene tölteni, de a katonánál csak egy „B” típusú akkumulátor van, illetve egy olyan napelem, ami csak a maximális töltőáram 50 %-át képes biztosítani. Ebben az esetben vagy maximális töltőárammal használja a „B” akkumulátort, ezzel azt kockáztatva, hogy a későbbiekben lesz kevés az energia, vagy a napelemet használja, akkor viszont azt kockáztatja, hogy nem töltődik fel teljesen az „A” akkumulátor. Erre lenne egy lehetséges megoldás egy töltésegysítő készülék, amelynek a központi eleme egy szuperkondenzátor lenne.

A szuperkondenzátor, ahogy a korábbiakban bemutatam, energia hosszabb távú tárolására nem igazán alkalmas, viszont képes az energiát igen gyorsan felvenni és leadni, így a töltéselosztót, egyfajta töltésegysítővé továbbfejleszteni. Amennyiben kellően kompakt kivitelben létre lehetne hozni ezt az eszközt, lehetővé válnának az alábbiak:

- A napenergia maradéktalan hasznosítása, olyan módon, hogy az nem nyújtja meg a töltési időt. Ilyenkor a töltőáramot alapvetően a napelem biztosítja, de azt az optimális töltőáram szintjéig kiegészíti a hálózat vagy egy forrás akkumulátor;
- Egy nagyteljesítményű forrásból kettő, vagy akár több akkumulátor egyidejű töltése;
- Korlátozott forrás energia esetén több akkumulátor töltése olyan módon, hogy az azok közötti töltőáram aránya előre meghatározott, vagyis a felhasználó által prioritizált.

Ezzel a megoldással valóban teljesen és maradéktalanul ki lehetne használni a mindenkor rendelkezésre álló energiaforrásokat, ezzel a katonánál magánál és az alegységen belül is új szintre emelve az energiával történő manőverezést.



53. ábra: A szuperkondenzátoros töltéselosztó által megvalósítható előnyös szcenáriók (saját szerkesztés)

5.5. A gép- és harcjárművek képességeit kiterjesztő villamos energetikai megoldások

A katonai gépjárművek és különösképpen a harcjárművek olyan komplex haditechnikai eszközök, amelyek fejlesztése és gyártása modern és szerteágazó ipari háttérrel feltételez. A polgári járműveknél többnyire jóval összetettebbek, azokhoz képest igen kis példányszámban készülnek és azoknál jóval hosszabb ideig tervezett az üzemeltetésük. A harckocsik között nemzetközi viszonylatban sem ritka, hogy korszerűsítésekkel egy-egy alaptípus akár 50 évig teljesítsen szolgálatot. A Magyarország által a HHP keretében beszerzett Leopard 2-es harckocsik első verzióját még a 70-es évek elején mutatták be és a Bundeswehr 1979-ben rendszeresítette [209], de az amerikai M1 Abrams is már 1980 óta teljesít szolgálatot.

Ez a tény komoly fejtörést okoz a tervezőknek, hiszen gyakran több évtizedes alvázakra kell a legmodernebb technikát ráépíteni az eszközök teljes élettartama alatt többször is. Ezek az átépítések a hajtásláncot és fegyverzetet csak minimális mértékben érintették, elsősorban a páncélzatot erősítették, de az elektronikus eszközök szinte mindig teljesen kicserélődtek. Az M1 Abrams A2-es verziója mostanában esik át a harmadik jelentősebb élettartam-növelő programon, a SEPV3-on. Ennek során felszerelték a Trophy aktív védelmi rendszerrel és számos más elektronikus eszközzel is, aminek nyomán megnövelték a fedélzeti akkumulátorok számát és felszerelték állóhelyzeti áramfejlesztővel, APU-val is [210].

A katonai járműveknél értelemszerűen nem lehetséges a megújuló energiaforrások bevonása. Egyedül a napelem kellően mobilis, ami elméletileg lehetővé tenné az alkalmazást, de a harcjárművek nem rendelkeznek akkora szabad felülettel, ami lehetővé tenné a felszerelésüket, illetve az esetleges álcázással működésképtelenné is válnának.

Ugyanakkor terjednek a lítiumos akkumulátorok. A gépjárműgyártás általában véve nehezen szabadul az ólomsavas akkumulátoroktól, hiszen azok olcsóak, strapabíróak és általában jól kiszolgálják a gépjárművek villamos igényeit, de a hibrid hajtásláncokhoz már nem elég az általuk kínált energiasűrűség. Manapság már a legolcsóbb „lágú” hibridek sem korlátozódnak az indító akkumulátor regeneratív töltésére, hanem kiegészítik azt egy lítiumos tárolóval is [211]. Ezek a terjedésükkel olcsóbbá is válnak, így várhatóan hamarosan teljesen kiszorítják az ólomsavas akkumulátorokat. A fejlettebb hibrid rendszereknél már akkora lítium-ion akkumulátorcsoportot építenek be, ami teljesen feleslegessé teszi a régi akkumulátorokat.

A katonai gépjárművek hajtáslánca kevésben tér el a civil típusoktól, hiszen a kis példányszám miatt többnyire azok modifikációi, vagy azok részegységeinek nagyarányú felhasználásával épülnek, viszont a jóval hosszabb életciklusú harcjárművek saját fejlesztésű hajtáslánccal rendelkeznek. Éppen ezért, illetve mivel egyes harcjárművek alvázán speciális, adott esetben nagyobb villamosenergia-igényű felépítményeket is kialakítanak, a korszerű harcjárművek generátorai többnyire „túltervezettek”. Ez bizonyos mértékben lehetővé teszi a fedélzeti villamos rendszerek korszerűsítését és a későbbiekben nagyobb villamos igények kielégítését is, de a hibrid rendszerek várható megjelenése miatt szükséges lesz a fedélzeti villamos rendszerek teljes újratervezése.

Az önálló katonai jármű fejlesztés, sőt még a gyártás is meghaladja Magyarország jelenlegi képességeit. A győri Rába Nyrt. gyárában minden lehetőség megvan MAN teherautók licenzgyártására [212], illetve a HM Currus Zrt. is legyártott 100 darab feletti autóbust katonai megrendelésre [213]. De ezek főbb elemei közül számos külföldről származik. A Rába teherautók motorja és sebességváltója is Németországból érkezett, míg a Currus Aires buszok alváza egy módosítatlan Volvo alváz, csak a felépítmény készült Gödöllőn. Jelenleg Zalaegerszegen zajlik egy olyan termelő központ kialakítása, ahol lehetőség lesz korszerű külföldi fejlesztésű eszközök gyártására [214]. Amennyiben a gyártás felfut, talán a fejlesztés egy része is Magyarországon zajlik majd, de egyelőre a külföldi gyártmányok specifikációja még behatárolja a járműfedélzeti villamos rendszerek hazai fejleszthetőségét.

A korszerű harcjárművek egyik sajátossága, hogy azokon egyre nagyobb számú villamos fedélzeti berendezést alkalmaznak. Ezek többségének a harcjármű álló helyzetében is, vagyis leállított hajtómű esetén is működni kell. Mivel technikailag nincs lehetőség a megújuló források bevonására, illetve korlátozott a tárolt villamos energia mennyisége is, meg kell oldani, hogy ezek a főhajtómű járatásánál kedvezőbb tüzelőanyag-fogyasztás mellett kapják meg a szükséges energiát.

Jelenleg ennek egyedüli módja a segédaggregátor (APU) alkalmazása, de a legtöbb haditechnikai eszköznél, mivel azok életciklusuk közepénél-végénél tartanak, ezek utólagos kiegészítések, ráépítések, amelyek nem aknázzák ki az rendszer integrációban rejlő lehetőséget. Az APU-k többsége a főhajtómű tartályából kapja az üzemanyagot, de a hűtőkörük elkülönül, pedig azok hatékonyan segíthetnék a hidegindítást. Újszerű megoldás, amikor a főhajtóműnél alkalmaznak olyan innovatív megoldásokat, amelyek lehetővé teszik annak ún. APU módban történő üzemelését, pl. a főhajtómű jelentősen redukált tüzelőanyag-felhasználás mellett csak a generátort hajtja meg.

5.6. Tábori elhelyezés

A tábori elhelyezés villamos energetikai hálózata rövid távon képes lesz jelen formájában kiszolgálni az igényeket, de az autonóm járművek, a hibrid és villamos hajtás, továbbá a mesterséges intelligencia és a terepi 3D nyomtatás terjedése miatt belátható időn belül változások lesznek szükségesek. Ahhoz, hogy a logisztikai támogatáson belül az üzemanyag-ellátás terhei ne növekedjenek a [4. fejezet](#) eredményei alapján fel kell használni az összes lehetséges technikát.

Ennek eszközei a már említett hibrid smart gridek. Az általam ismert ilyen rendszerek azonban kivétel nélkül fix összeállítások, ahol a dízelaggregátorok és megújuló források teljesítményét, a szükséges akkumulátorkapacitást és a rendszer vezérlési sémáját is egy-egy adott célra optimalizálták. Ez a tendencia nagyon jól látható a CL15 gyakorlaton felvonultatott és a [3. számú mellékletben](#) bemutatott, eszközök változatosságából.

Ebből következik saját elgondolásom, hogy az eddig bemutatott prototípusokkal ellentétben egy a jövőben kifejlesztendő (adott esetben akár valamelyik prototípusra alapozó) rendszer fejlesztése esetén nem fix, hanem moduláris rendszerben kell gondolkodni. Például egy konténeres kialakításnál a hordozó konténer minden esetben tartalmazza a vezérlést, és egy alap aggregátort, a fennmaradó helyen pedig további aggregátor, napelem (ez természetesen csak a szállítás idején lenne itt), akkumulátoros, esetleg PEM cellás tároló

egység, kis- és középfeszültségű csatlakozó modulok kerülhetnének elhelyezésre, a várható igények függvényében.

Amennyiben létezne egy ilyen eszközkészlet, akkor a logisztikának módjában állna a feladat ismeretében az optimális konfigurációt összeállítani. Ehhez nem lenne túl nagy feladat egy szoftvert is kifejleszteni, ami segítene a konfigurációban. A gridek üzemeltetését megkönnyítené és gazdaságosabbá tenné, hogy a katonai alakulatoknál ugyanolyan eszközök lennének használatban, azok részegységei pedig csereszabatosak lennének egymással.

Mindezek alapján egy táblázatban is összefoglaltam a katonai tábori villamosenergia-termelő eszközeinek evolúcióját, ahol a jelenleg általánosan használt dízelaggregátorokat (2) tekintetem egységnyi viszonyításai alapján, a többi eszköz ehhez képest kapott egy szorzót, amely az adott paraméternek az esetében megfelel. A relatív hatásfok számításánál a 2,5. generációnál azt a bizonyos statisztikai alapon számított 40 %-ot vettem figyelembe, amit több forrás is megerősített. A hibrid esetében egy az aggregátoréval megegyező névleges teljesítményű napelem termelését vettem figyelembe a Magyarországi évi átlagos napsütéses órák mellett. A tároló teljesítményénél az aggregátor maximális teljesítménye mellett 2 óras áthidalási időt vettem alapul.

generáció	„0.”	1.	2.	„2,5”	3.
energiaforrás	izomerő	benzin	dízel	pufferelt dízel	hibrid
típusos alkalmazási időszak	1910-1930	1920-1950	1940- napjainkig	2020- napjainkig	2010- napjainkig
típusos áramalak	DC		AC		
jellemző ellátási architektúra	decentralizált		centralizált	hálózatos	
elvi maximális termikus hatásfok	-	28 %	44 %		
relatív hatásfok	-	0,6	1	1,4	1,7
relatív tömeg	-	1,2	1	1,3	1,8
vizuális észlelhetőség	0,2	0,8	1	1,1	2
akusztikus észlelhetőség	0,1	1	1	0,8	0,6

21. táblázat: a katonai áramfejlesztő eszközök evolúciója (saját szerkesztés)

Az éppen legmegfelelőbb konfiguráció összeállításához az alábbi szempontrendszer lehetne kiindulási alap:

5.7. Összegzés

A szárazföldi csapatok autonóm működési idejének kiterjesztése hasznos képesség, amely megnöveli azok túlélőképességét is. Ennek része lehet a korszerű hadseregek számára esszenciális villamos energia olyan módon történő biztosítása, hogy az ne támasszon túlzott követelményeket a logisztikai támogatás, vagyis az üzemanyag-ellátás irányába, sőt lehetőség szerint csökkentse annak terhelését.

A személyi felszerelések esetében a digitalizációval párhuzamosan jelentős villamosenergia-igény növekedéssel kell számolni, miközben az akkumulátorok energia-sűrűsége csak igen lassan nő, más technológiák pedig még messze vannak a terepi alkalmazhatóságtól.

Ebben a helyzetben a centralizált és automatikus menedzsmenttel ellátott személyi villamos hálózat érzékelhető módon képes lenne megnövelni a rákötött eszközök működési idejét. Némi előnyt jelentenek továbbá a viselhető hajlékony akkumulátorok is, amelyek az energia-sűrűséget ugyan nem növelik meg, de a terhelést egyenletesebben osztják el a katonán, mint az egyéb megoldások.

A PEM-cella és a hidrogén által nyújtott energiasűrűség jelenleg is felveszi a versenyt a lítiumos akkumulátoréval és mindeközben nem jelent nagyobb kockázatot, ha lövedék vagy repesztalálat éri és egy TRL7-8-as technológiáról van szó, ami nagyon rövid idő alatt technológizálható. Ahogy a cellák ára csökken, úgy javul a technológia versenyképessége, amiben ráadásul rövid távon is kiaknázható fejlesztési tartalékok rejlenek.

Egy, a jelenlegieknél sokrétűbb töltéselosztó raj- vagy szakaszszinten történő rendszeresítése ugyancsak a jelentősen kitolhatná azt az időt, amíg egy kisalegység teljesen feléli az energia-tartalékát, hiszen kompromisszumok nélkül használhatná ki a napenergiát, illetve számos, akár ad-hoc villamos energiaforrást, miközben lehetőséget adna a kisalegységeknél lévő akkumulátorok közti szükség szerinti töltéscserére is.

A katonai gép- és harcjárművek esetében erősen korlátozottak a haderők, főleg a kisebbek fejlesztési lehetőségei, de követelménytámasztóként törekedni kell, hogy az újonnan rendszerbe álló eszközök – a várható hosszú élettartam miatt – bőséges villamos teljesítmény-tartalékkal rendelkezzenek.

A jelenleg is zajló folyamat, ahol a gép- és harcjárművek villamos energia iránti igénye nő, rövid távon nem ütközik a fedélzeti rendszer szűk keresztmetszetébe. Végző soron a motor által hajtott generátor az üzemanyagtartály kapacitásáig képes a villamos rendszerek ellátására. Mivel a villamos berendezések és az ellátásukhoz szükséges rendszerek a

felhasznált üzemanyaggal együtt is csak néhány százalékat teszik ki egy jármű tömegének, a növekvő villamosenergia-fogyasztás legfeljebb néhány kilométerrel rövidíti meg annak akciórádiusát.

Ennél komolyabb gond, hogy a villamos energiára a jármű tartós álló helyzetében is szükség van. Márpedig a nagyobb mennyiségű akkumulátor már valóban jelentős mértékben rontaná a jármű mobilitását, míg a főhajtómű járatása csak ilyen célzattal, hasonló módon lecsökkentené a jármű által megtehető távolságot. Erre a problémára jelenleg sem az energiatárolók fejlesztése, sem a megújuló források nem jelentenek megoldást, kizárólag egy kisebb teljesítményű és fogyasztású segédhajtómű beépítése lehetséges.

Az ilyen segédaggregátorok némileg megnövelik a hordozó jármű tömegét, és komplexitását, ami egyben a meghibásodás valószínűségét is növeli, illetve egy meglévő páncéltestbe az utólagos beépítése sem triviális, hiszen a korszerűsítések, átépítések során egy már meglévő limitált térfogatba kellene egyre újabb és újabb berendezéseket beszáfolni. Ezekkel a nehézségekkel együtt sincs jobb megoldás belátható ideig, de a segédaggregátorok nagyobb fokú integrációja javíthat a teljes rendszer hatékonyságán.

A tábori elhelyezés villamosenergia-igénye is nőni fog, hiszen egyrészt itt csapódik le az akkumulátorok töltésére szolgáló energia-mennyiség, másrészt már a küszöbön van néhány olyan új technológia alkalmazása, amik szignifikáns mennyiségű plusz villamos energiát igényelnek majd. Ez elvben pusztán az aggregátorok és a kiszállított üzemanyag mennyiségével is kompenzálható lenne, de ez az egyszerű mennyiségi válasz olyan terhet jelenthet a logisztikai támogatásra, ami valószínűleg nem tenné azt működésképtelenné, de fenntartása vállalhatatlan kockázatokat jelentene a szárazföldi alakulatok harcképességére nézve.

A hibrid smart gridek alkalmazása számottevően, akár 50 %-ot is meghaladó mértékben képes csökkenteni a villamos energia előállítására felhasznált üzemanyag mennyiségét. A komplexebb felépítés nyilvánvalóan növeli a meghibásodás valószínűségét, de az intelligens vezérlés, és a több különféle energiaforrás alkalmazása önmagában is növeli a tábori villamosenergia-szolgáltatás biztonságát. A hálózatos kiépítés pedig tovább növeli a villamos energiával végrehajtható manőverezés lehetőségét és így a táborok energia-ellátásának biztonságát.

Egy moduláris rendszer megvalósítása még további előnyökkel járna. A nagyobb mennyiségben gyártott családelvű modulok olcsóbbak, mint az egyedi berendezések és a logisztikai támogatás számára is egyszerűbb az alkalmazásuk. Mindeközben a modularitás azt

is lehetővé tenné, hogy egy-egy alakulat a várható feladat függvényében a leginkább optimális konfiguráció(ka)t vihesse magával.

Összegzett következtetések

Az [első fejezetben](#) összegyűjtöttem és összegeztem a Magyar Honvédség öt éves makro energetikai fogyasztását. A kapott eredmények összevettem Magyarországnak energiafogyasztásával, illetve az Egyesült Államok haderejének hasonló adataival. Külön kigyűjtöttem a villamos energiára vonatkozó adatokat és azokat is összehasonlítottam Magyarországnak és az Egyesült Államok hadereje villamos energetikai számaival.

Az adatokat táblázatos formában tettem feldolgozhatóvá, majd a végrehajtott tudományos elemzés alapján megállapítottam, hogy a villamos energia aránya a teljes haderő energiakosarán belül, néhány százalékos eltéréssel, igen jól leképezi az országos adatokat.

Miután a szekunder energiahordozók közül legkevésbé a villamosenergia-felhasználás függ a legkevésbé az időjárás, illetve a katonai aktivitás szezonális hatásaitól, továbbá miután natív indikátora a digitalizációnak, ennek nominális mennyisége, de még inkább a nemzetgazdaságon belüli aránya igen jól mutatja az adott haderő fejlettségét.

A [második fejezetben](#) bemutattam a tábori villamos energetika architektúráját a termelés-elosztást, illetve a fogyasztói oldalt egyaránt, külön részletezve a legfontosabb eszközöket, azok sajátosságait és hatásukat a szárazföldi csapatok képességeire.

Az értékelés során a szakirodalmi kutatásra, illetve részben saját mérnöki tapasztalataimra építettem. Megvizsgáltam és értékeltem a releváns katonai szabályozók hatását is, és megállapítottam, hogy a szárazföldi alakulatok terepi villamosenergia-ellátottsága jelenleg teljes egészében az logisztikai támogatás, azon belül az üzemanyag-ellátás megbízhatóságától függ. Ez egyrészt egyszerűsíti a logisztikai támogatás harctéri feladatrendszerét, de igen jelentős kockázatot is rejt magában.

Amennyiben a terepi villamos energia iránti igény növekszik, akkor a villamosenergia-felhasználáson keresztül nő a logisztikai függőség, ami számottevően ronthatja a csapatok harckészültségét és harci képességeit.

A [harmadik fejezetben](#) részletesen megvizsgáltam a szárazföldi csapatok villamosenergia-fogyasztásának összetevőit, és próbáltam azokra nominális értékeket megadni. Ez kizárólag a tábori elhelyezés vonatkozásában sikerült, mivel a személyi felszerelés és a járműfedélzet vonatkozásában túl sok az ismeretlen tényező. Ugyanakkor az indukció módszerét alkalmazva megállapítottam, hogy mind a közeli, mind a távolabbi jövőben egyre többféle villamos működésű eszköz és berendezés kerül a hadseregek eszköztárába, ami egyértelműen a villamos energia iránti igény növekedését hozza magával.

- A személyi felszerelés tekintetében a harctereken zajló digitalizáció miatt már igen rövid távon jelentős, akár 50 %-os, vagy azt meghaladó időarányos villamosenergia-felhasználási növekmény várható.
- A harc- és gépjárművek vonatkozásában, lassú, de folyamatos növekedés várható. A digitalizáció hatása itt is megmutatkozik, de arányaiban kevésbé hat a járművek villamosenergia-mérlegére. Várható az e-mobilizáció katonai terjedése is, de csak lassan, a tárolási és infrastrukturális megoldások fejlődésével párhuzamosan.
- A tábori elhelyezés vonatkozásában szintén lassú, de folyamatos a villamos energia iránti igény növekedése. Bizonyos technológiák előre jelezhető megjelenése a műveleti területen viszont jelentős villamosenergia-igénybeli kiugrásokat okozhat.
- A vezető nélküli légi és szárazföldi járművek szintén előre jelezhető nagyarányú elterjedése mindhárom szegmensben, a többi folyamattól függetlenül nagyarányú igénynövekedést generál a villamos energia terén.

A [negyedik fejezetben](#) részletesen megvizsgáltam a terepi villamosenergia-rendszer üzemanyagtól való függőségének csökkentésére kínálkozó valamennyi elvi lehetőséget. Az adatgyűjtés és összehasonlítás módszerével értékeltem az egyes megoldások. Ezek közben nagyban támaszkodtam saját laboratóriumi és terepi méréseimre, vizsgálataimra.

Szemponrendszerrel dolgoztam ki az egyes technológiák és eljárások alkalmazásával keletkező előnyök összevetésére, majd analitikus módszert használva priorizáltam azokat.

Csak a belátható 5-10 éves időtávra tekintve az alábbi technológiák és eljárások kínálnak szignifikáns mértékű terepi villamosenergia-mérleg javulást:

- Elsősorban nap-, kisebb mértékben szélenergia kihasználása;
- LED-es világítástechnika;
- A lítiumos akkumulátoros és PEM-cellás energiatárolás;
- Automatikus gépi energia-menedzsment.

Az [ötödik fejezetben](#) a korábbi fejezetek alapján megjelölöm azokat a technológiákat, amelyeket a szárazföldi csapatok további villamos energetikai fejlesztései során alkalmazni érdemes és összehasonlítom őket a konvencionális megoldásokkal, illetve meghatározom azokat a területeket, ahol a legnagyobb a fejlesztési potenciál:

- A személyi felszerelés vonatkozásában a villamos működésű felszerelési elemek centralizált energiaellátása, a napenergia hasznosítása és a kislegység energia-menedzsmentjének kialakítása;

- A harc- és gépjárművek esetében a gépi energia-menedzsment alkalmazása;
- A tábori elhelyezése vonatkozásában a hibrid smart gridek alkalmazása, különös tekintettel a moduláris rendszerekre;
- Elsősorban a személyi felszerelés és a tábori elhelyezés vonatkozásában a hidrogén-alapú energiatárolási technológiák alkalmazása.

Új tudományos eredmények

1. Megállapítottam, hogy a szárazföldi csapatok műveleti területen kialakított, teljes egészében aggregátorokkal, centralizált módon megvalósított jelenlegi villamosenergia-ellátása jelentős kockázatot jelent a szárazföldi csapatok harcászati képességeinek fenntarthatóságára. A jelenlegi ellátási modell teljes egészében az üzemanyagszállításra épül, ami korlátozza a csapatok autonómiáját és sebezhetővé teszi azokat, továbbá a centralizált modell önmagában is veszélyezteti a csapatok terepi villamosenergia-ellátásának biztonságát. Ezért a szárazföldi csapatok harcászati képességeinek fenntarthatósága, illetve növelése érdekében szükséges az üzemanyag-utánszállítás logisztikai rendszer sebezhetőségének csökkentése a korszerű energetikai technikák és megoldások széleskörű alkalmazása.
2. Megállapítottam, hogy a szárazföldi csapatok által a műveleti területen igényelt villamos energia mennyisége – bizonyos szegmensekben eltérő mértékben, de – folyamatosan nőni fog a közeli, és a belátható távolabbi jövőben is, mert nincs hatékony mód az eszközök fogyasztásának csökkentésére. Ugyanakkor a hadszíntér digitalizációja, továbbá a közeljövőben várhatóan rendszeresítésre kerülő villamos eszközök (aktív védelmi rendszerek, UAV-k, UGV-k, illetve az ezek elleni berendezések, elektronikai harci berendezések, stb.) részletes felmérése után megállapítottam, hogy ez újabb és újabb igényeket támaszt a logisztikai támogatás irányába.
3. Elsőként elemeztem teljes egészében a műveleti területen a villamos igények által generált logisztikai támogatási igények mérséklésének elvi módszereit és megállapítottam, hogy nincsen olyan technológia vagy eljárás, ami önmagában képes lenne megoldani ezt a problémát. A szárazföldi csapatok harcászati képességeinek fenntarthatósága érdekében a növekvő villamos igények kielégítésére csak a már alkalmazott technikák és eljárások, illetve az alkalmazásba vonható innovatív új megoldások komplex és tervszerű alkalmazása képes. Ez utóbbiak közül a megújuló energiaforrások és a smart gridek működését a gyakorlatban tanulmányoztam, a katonai alkalmazhatóságukat mérésekkel és helyszíni vizsgálatokkal bizonyítottam.
4. Többek között egy Magyarországon először végzett kísérleti lövészzettel bizonyítottam, hogy a hidrogén alapú energiatárolás technológiája már jelen formájában is kellően fejlett a katonai alkalmazásra. Bizonyítottam, hogy a hidrogén terepi felhasználása nem jelent nagyobb kockázatot az alkalmazó szárazföldi csapatokra, mint a jelenleg is

használt tüzelőanyagok, ugyanakkor a hidrogén nagyobb energiasűrűsége és a rá épített PEM cellák alkalmazása képes kibővíteni az autonóm tevékenység idejét, ezáltal növelve a csapatok túlélőképességét. A hidrogén nagyobb arányú alkalmazása összhangban van az EU-s [215] és nemzeti [61] energiapolitikai törekvésekkel, valamint a Nemzeti Katonai Stratégiával is [64].

5. Felállítottam a harctéri áramellátási rendszerek generációs modelljét, és bebizonyítottam, hogy a szárazföldi csapatok hagyományos aggregátoros ellátási modelljénél a villamos energia biztosításának hatékonyabb és biztonságosabb módja a megújuló energiaforrásokat, tárolóelemeket és korszerű vezérlőrendszereket is magába foglaló rendszerek (hibrid smart gridek) alkalmazása. Ezek az alkalmazás minden lehetséges szintjén növelik a műveleti autonómiát így kibővítve a csapatok képességeit.
6. Magyarországon elsőként (és nemzetközi kitekintésben is az elsők között) vizsgáltam meg rendszerszemléletű megközelítésben a szárazföldi csapatok villamosenergia-ellátásának kérdéskörét. Elsőként gyűjtöttem össze a Magyar Honvédség energiahasználatra vonatkozó makroadatait és azt elemezve és összevetve az ország teljes primer energia-felhasználásával, valamint az USA hasonló adataival megállapítottam, hogy a fejlett haderők és az adott nemzetgazdaság energiakosara csaknem teljesen megegyezik, ideértve az ország fejlettségére is jellemző villamosság részarányát is.

Ajánlások és további kutatást igénylő területek

Az értekezés témáját és eredményeit hasznosításra ajánlom a Magyar Honvédség és a Honvédelmi Minisztérium energiapolitikájának kialakításához haditechnikai eszközök beszerzési és kutatás-fejlesztési tevékenysége során. Az értekezés horizontálisan jól átfogja a katonai villamos energetikai, és azon belül elsősorban a szárazföldi csapatok műveleti területen végzett villamos energetikai tevékenységét és sajátosságait, de ennek megfelelően terjedelmi okokból nem volt képes azok mélységeibe merülni. Akár hazai formában, akár nemzetközi együttműködésben további kutatási témának ajánlom az alábbiakat:

- A Honvédelmi Minisztérium és/vagy a Magyar Honvédség energiapolitikájának és/vagy energiastratégiájának kialakítását;
- A szárazföldi csapatok villamosenergia-ellátására vonatkozó szabályzatainak kialakítását;
- A hidrogén-technológia katonai alkalmazhatóságát;
- A smart-gridek működési modelljeit katonai környezetben;
- A digitális katona koncepció villamos energetikai kérdéseit.

Az értekezést ajánlom a Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképzési Karán folytatott oktatási tevékenységhez is. Ennek részeként az alábbiakat emelem ki:

- Az értekezés feltárja a Magyar Honvédség békeidejű energetikai működését, bemutatja az energiakosarát és azt értékeli nemzetközi összevetésben is;
- Az értekezés bemutatja a szárazföldi katonai csapatok békeidejű és katonai művelet során végzett villamos energetikai gazdálkodásának eltéréseit és a működés eltérő céljait;
- Az értekezés bemutatja a villamos működtetésű katonai eszközöket a személyi felszerelés részeként, a gép- és harcjárművek fedélzetén és a tábori elhelyezés során, tárgyalja működésük alapjait, főbb jellemzőiket;
- Az értekezés bemutatja a tábori használatra alkalmas villamos energetikai technológiákat és eljárásokat, értékeli azok hatását;
- Az értekezés bemutatja és részletesen ismerteti azokat a korszerű villamos energetikai technológiákat, amelyek meghatározzák a jövő hadseregének bizonyos képességeit.
- A mesterséges intelligencia alkalmazhatósága a katonai villamos energetikában.

Ábrák és táblázatok jegyzéke

1. ábra: Az energiafelhasználás és GDP összefüggése 1984-2002 között (saját szerkesztés az [1] alapján)	6
2. ábra: A USA katonai műveleteinek fosszilis energia-szükséglete (saját szerkesztés a [36] alapján)	24
3. ábra: A Magyar Honvédség energiakosara *a 2016-2020 évek átlagát tekintve (saját szerkesztés az 1. melléklet alapján).....	27
4. ábra: Az USA és haderejének 2020. évi energiakosara (saját szerkesztés a [2] és [43] nyomán).....	28
5. ábra: A Magyar Honvédség főbb energiaforrásainak fogyasztási változása 2015-2020 (saját szerkesztés az 1. számú melléklet alapján)	29
6. ábra: Generátorral ellátott létesítmény áramellátásnak egy lehetséges megoldása (saját szerkesztés).....	31
7. ábra: Különbféle fényforrások akkumulált költségei (saját szerkesztés az [53] alapján)	34
8. ábra: A balatonakarattyai Honvéd Üdülő 2021-ben átadott napelemei (Horváth Péter Zoltán felvétele).....	36
9. ábra: A Chania légibázis (Kréta, Görögország) autonóm működését biztosító naperómű (saját felvétel).....	42
10. ábra: A RESHUB projekt koncepciója (Robert Sipeč, a Szlovén Védelmi Minisztérium ezredesének ábrája)	43
11. ábra: A RESHUB projekt egy objektumának energetikai vázlata (Robert Sipeč, a Szlovén Védelmi Minisztérium ezredesének ábrája).....	44
12. ábra: A műveleti területen történő villamosenergia-ellátás vázlata (saját szerkesztés)	46
13. ábra: Amerikai katonai üzemanyagszállító teherautó-oszlop Sahl Sinjar (Irak) közelében 2008. novemberében [71].....	47
14. ábra: Gépjárművekben alkalmazott egyszerű egyfázisú generátor felépítése [73]	50
15. ábra: TM5 típusú 2. világháborús német pedál-generátor [74].....	51
16. ábra: Amerikai General Electric 12-G és német Gleichstrom Erzeuger 400 typ B benzines aggregátorok a 2. világháborúból [74].	52
17. ábra: Szovjet gyártmányú ESD 50 kW-os dízelaggregátor vontatmány [78]	54

18. ábra: Előkészített tábori villamos hálózat részlete a CL15 nemzetközi logisztikai gyakorlaton Várpalotán (saját fotó). A konténertől balra található a sárga dízelaggregátor (jelen esetben egy civil típus), tőle jobbra a (zöld) villamos elosztó szekrény. Bal oldalt az előtérben látható az ún. „bálvány”, ahová a fogyasztókat lehet csatlakoztatni.....	55
19. ábra: A Leopard 2A7 páncéltestének jobb hátsó részén található egy kis teljesítményű Steyr dízelaggregátor (ilyen nem volt még az A6-ban sem), míg a Gidránon külső függesztményként került elhelyezésre a Kubota APU (saját felvételek)	57
20. ábra: A modellben egy kémiai folyamatoktól mentes energiatároló kapacitás (C) egy ideális akkumulátort reprezentál. A valós működés során fellépő veszteségeket két fix ellenállással vettem figyelembe (a valóságban ezek is sok minden, pl. a hőmérséklet függvényében változnak - saját szerkesztés).....	59
21. ábra: A processzorok teljesítményének fejlődése (saját szerkesztés a [94] alapján)	67
22. ábra: LED-es táborvilágító eszközök próbája a CL15 nemzetközi gyakorlaton (saját felvétel).....	71
23. ábra: A szárazföldi csapatok villamosenergia-szükségletének Maslow-piramisa (saját szerkesztés).....	72
24. ábra: A hidegháborús korszak jellemző képviselője az R-107 rádió adó-vevő [102]. A szovjet gyártmányú készülék csak egyszerű beszédkommunikációt tett lehetővé, miközben valamennyi tartozékával 40 kg-nál is nehezebb volt és több, mint 30 W-ot fogyasztott [103]80	
25. ábra: A járműfedélzeti generátorok teljesítményének változása (saját szerkesztés a [108] és [109] alapján)	83
26. ábra: A hagyományos és a hálózatos rádiókapcsolat modellje. Ez utóbbinál a pirossal jelölt útvonal egyetlen adatcsomagra vonatkozik (saját szerkesztés)	87
27. ábra: Magyar fejlesztésű MIMO technológiás adatrádió oktokofterre szerelve, mint harctéri átjátszó, egy 2018-as bemutatón (saját felvétel)	90
28. ábra: Ukrán katonák egy ukrán gyártmányú Delfast típusú elektromos crossmotorral és amerikai Javelin rakétavetővel felfegyverkezve 2022 májusában [120]	95
29. ábra: A hibrid hajtáslánccal szerelt AbramsX harckocsi prototípusa [122].....	96
30. ábra: Az aggregátorok, az akkumulátorok és a személyi felszereléseként málházott eszközök tömegének normalizált változása (saját szerkesztés)	101
31. ábra: Gerillák által megsemmisített NATO utánpótlási járműoszlop. Afganisztán, Samangan tartomány, 2012 [132]	104
32. ábra: Egy folyamatosan működő 350 kW teljesítményű és 15 tonna tömegű dízelaggregátor kiváltáshoz szükséges elvi tömegarányos energia-sűrűség a tevékenységi idő függvényében (0,3 liter/kWh, 0,84 kg/liter dízel-adatokkal számolva – saját szerkesztés)...	107

33. ábra: Az első képen a becsapódó 7,62 mm-es páncéltörő-gyújtó lövedék hatására a hidrogéngáz csak nagy nyomással távozik a palackból, míg a második képen a lövedék hatására a cseppfolyós bután be is robban (Zrínyi Média felvétele, MH Lökísérleti Vizsgálóállomás, Táborfalva, 2023)	112
34. ábra: A villamosenergia-tározók piaci megoszlása a tározókapacitás szerint (saját szerkesztés a [138] alapján).....	113
35. ábra: A légkör rádiófrekvenciás csillapítása a frekvencia és a csapadék függvényében [150]	120
36. ábra: Rézkábelek veszteségei a távolság függvényében 230 V-os feszültség mellett (saját szerkesztés a 15. táblázat adatai alapján)	122
37. ábra: Peltier-elem lehetséges beépítése a motor hűtőkörébe (saját szerkesztés).....	124
38. ábra: 2015 júniusában a Bakonyban üzemelő kísérleti szélturbina rotorátmérője 150 cm, maximális fordulatszáma 450/perc. Egy 10 méteres árbocon került elhelyezésre, amelynek stabilitásáról a szállító konténer gondoskodott (saját felvétel a CL15 gyakorlatról).....	132
39. ábra: A sivatagi sárga színű konténer tetején található az álcahalóval fedett a napkollektor (saját felvétel a CL15 gyakorlatról)	134
40. ábra: A fotovillamos (PV) hatás (saját szerkesztés a [181] alapján).....	135
41. ábra: A kép előterében egy utánfutós mozgatású fix állásban telepíthető hagyományos napelem, a háttérben egy automatikus napkövető egység. A Smartflower virág módjára hajtogatja ki a szirmait, GPS adatok alapján állítja tájolását (saját felvétel a CL15 gyakorlatról).....	137
42. ábra: Egy három-átmenetes (tri-junction) napelem spektrális karakterisztikája [185]	138
43. ábra: A „szolárszőnyeg” egy utánfutóról göngyölíthető le. A telepítéskor az utánfutót vontató terepjáró is szerephez jut (saját felvétel a CL15 gyakorlatról).....	139
44. ábra: A Protonex SPM-622 készülék a Nett Warrior készlethez alkalmazható és már lehetővé tesz bizonyos személyi szintű energia-menedzsmentet. Egyelőre csak az USA különleges erőinél rendszeresítették raj és szakasz szinteken [188]	142
45. ábra: Egy korszerű tábori LED-es fényforrás 96 %-ot meghaladó színvisszaadásra képes, miközben egy hagyományos izzó teljesítményének csak tizedét veszi fel (saját mérés a Tracon Kft. fénytechnikai laboratóriumában található Ulbrich-gömbös műszerrel)	145
46. ábra: A BB-2950/U típusú taktikai akkumulátor és egy teoretikus PEM-cellás személyi villamos ellátó rendszer összehasonlítása (saját szerkesztés)	149
47. ábra: Hidrogén-alapú villamosenergia-tároló rendszer egyszerűsített vázlatja (saját szerkesztés). Az ábra nem tartalmazza a hálózat felé az AC/DC konverziót és a kontrollert	151

48. ábra A LUNA200-10 típusú szolár akkumulátor és egy teoretikus PEM-cellás villamosenergia-tározó rendszer összehasonlítása (saját szerkesztés)	152
49. ábra: A hibrid smart grid egy lehetséges kiépítése (saját szerkesztés).....	155
50. ábra: A CL15 gyakorlaton működtetett Pfisterer gyártmányú hibrid grid 24 órás működési diagramja (a gyári szoftverből 2015. június 19-én nyert kép, amely később a reklám brossúrákban is megjelent – csak a feliratok kerültek lefordításra)	156
51. ábra: Egy dízelaggregátor hatásfokának változása a terhelés függvényében [203]	158
52. ábra: Az aggregátoros és a hibrid villamosenergia-előállítási koncepció összehasonlítása	160
53. ábra: A szuperkondenzátoros töltéselosztó által megvalósítható előnyös szkenáriók (saját szerkesztés).....	164
54. ábra: Az okos virág mindig a nap felé fordul (saját felvétel).....	204
55. ábra: A Multicon szolár-utánfutója telepített állapotban (saját felvétel).....	204
56. ábra: A Multicon konténeres rendszerén a gyártó német és felhasználó cseh alakulat zászlója lobog (saját felvétel)	205
57. ábra: Az EST napelemei telepítve (saját felvétel).....	205
58. ábra: A Pfisterer cég konténerre kívülről nem túl mutatós, ezért itt a kezelőfelület egy részlete látható a pillanatnyi termelési és felhasználási adatokkal (saját felvétel).....	206
59. ábra: Az IDE napelemei mögött alig látható (bal oldalon) az aggregátort és az akkumulátorokat is tartalmazó központi egység (saját felvétel)	206
60. ábra: A brit Renowagen szolár-utánfutójának telepítése látványosan gyors (saját felvételek).....	207
1. táblázat: Elemi elektromos energiakonverziók és hatásfokuk (saját szerkesztés a [5] alapján)	8
2. táblázat: A NATO STO paneljei [10]. Az MSG nem klasszikus panel, mivel nincsenek „alatta” munkacsoportok. Tevékenységével a munkacsoportok kutatásait támogatja.....	11
3. táblázat: Az EDA RTI igazgatóságának munkacsoportjai [11]	12
4. táblázat: Különféle fényforrások éves költsége (saját szerkesztés az [53] alapján).....	33
5. táblázat: A Magyar Honvédség által 2013-2022 között üzembe helyezett napelemes rendszerek száma és teljesítménye (saját szerkesztés a HM VGH által szolgáltatott adatok alapján)	36

6. táblázat: Különbféle anyagok és technológiák jellemző energetikai paraméterei (* PEM cellát alkalmazva, saját szerkesztés)	61
7. táblázat: Egyes villamos energián alapuló funkciók kiválthatósága más energián alapuló eszközökkel (saját szerkesztés)	74
8. táblázat: A különféle források által tábori elhelyezés idejére javasolt egy főre létesítendő villamos teljesítmény és (az összehasonlítás kedvéért) vízigény (saját szerkesztés a [97], [67] és [34] alapján).....	79
9. táblázat: A világ leggyakrabban használt kézi lőfegyvereinek főbb adatai (saját szerkesztés a [104] és [105] alapján)	81
10. táblázat: A Magyar Honvédségnél rendszeresített harcjárművek fedélzeti villamos rendszerének paraméterei (saját szerkesztés a járművek kiképzési dokumentációja alapján – a Lynx adatai még nem publikusak)	84
11. táblázat: Az amerikai HMMWV (Humvee) és a váltótípus JLTV (Joint Light Tactical Vehicle – Általános Könnyű Taktikai Jármű) fedélzeti villamos rendszerének főbb paraméterei (saját szerkesztés a [110], [111], [112], [113] alapján)	84
12. táblázat: Egy szakasz katona „Nett Warrior” rendszerhez kapcsolódó villamosenergia-fogyasztása különböző 72 órás tevékenységek során (saját szerkesztés a [107] alapján)	88
13. táblázat: Az egyes technológiákhoz kapcsolódó készenlét osztályozása (saját szerkesztés)	105
14. táblázat: A terepi használatra alkalmas tárolási technológiák összehasonlítása (saját szerkesztés).....	117
15. táblázat: Tömör rézhuzal egy szálának jellemző adatai (saját szerkesztés a [151] alapján)	121
16. táblázat: A hagyományos és a korszerű automatikus energia-menedzsment összehasonlítása (saját szerkesztés [187] alapján)	141
17. táblázat: A műveleti területen alkalmazható villamos energetikai technikák és eljárások értékelési szempontrendszer (saját szerkesztés).....	144
18. táblázat: akkumulátor és hidrogéncella összevetése személyi eszköz dimenzióban (saját szerkesztés [196] és [197] alapján)	148
19. táblázat: Huawei típusú szolár-akkumulátorok főbb jellemzői (saját szerkesztés [198] alapján)	150
20. táblázat: Egy teoretikus hidrogén-alapú villamosenergia-tároló rendszer főbb elemei (saját szerkesztés a [198] és a [197] alapján).....	151
21. táblázat: a katonai áramfejlesztő eszközök evolúciója (saját szerkesztés).....	167

Témakörből készült publikációim

1. Végvári Zsolt: A LED-ek alkalmazásának lehetőségei a Magyar Honvédségben – **Katonai Logisztika** 23. évf. (2015) 1. szám 133-162o. (ISSN 1588-4228, on-line ISSN 1789-6398);
2. Végvári Zsolt: A Smart Energy koncepció és eszközei a CL15 logisztikai gyakorlaton 1. rész – **Haditechnika** 49. évf. (2015) 6. szám 30-34o. (ISSN 0230-6891);
3. Végvári Zsolt: A Smart Energy koncepció és eszközei a CL15 logisztikai gyakorlaton 2. rész – **Haditechnika** 50. évf. (2016) 2. szám 44-48o. (ISSN 0230-6891);
4. Végvári Zsolt: A megújuló villamos-energiaforrások felhasználásának lehetőségei harctéri körülmények között – **Hadmérnök** 11. évf. (2016) 1. szám 41-53o. (ISSN 1788-1919);
5. Végvári Zsolt: Akkumulátorok a gyalogos lövészkatona felszerelésében, a fejlesztés lehetséges irányai – **Műszaki Katonai Közlöny** 26. évf. (2016) 2. szám 85-101o. (ISSN 2063-4986);
6. Végvári Zsolt: A hibrid villamos energiaellátó rendszerek vezérlésének terepi megvalósítása – **Hadmérnök** 11. évf. (2016) 4. szám 192-209o. (ISSN 1788-1919);
7. Végvári Zsolt: Az újszerű harctéri villamos energetikai megoldások kutatásának szükségessége és a fejlesztési lehetőségek összevetése – **Honvédségi Szemle** 145. (2017) évf. 1. szám 102-113o. (ISSN 1216-7436);
8. Végvári Zsolt: Harctéri villamosenergia-ellátás - Új energetikai megoldások kutatásának szükségessége és a fejlesztési lehetőségek összevetése – **Katonai Logisztika** 26. évf. (2016) 2. szám 52-74o. (ISSN 1588-4228, on-line ISSN 1789-6398);
9. Végvári Zsolt: Elektromágneses úton gyorsított lövedékek a tüzérség eszköztárában – A Bae Systems EM railgun-ja 1. rész – **Haditechnika** 51. évf. (2017) 1. szám 28-31o. (ISSN 0230-6891), DOI: 10.23713/HT/51.1.06;
10. Végvári Zsolt: Elektromágneses úton gyorsított lövedékek a tüzérség eszköztárában – A Bae Systems EM railgun-ja 2. rész – **Haditechnika** 51. évf. (2017) 2. szám 18-22o. (ISSN 0230-6891), DOI: 10.23713/HT/51.2.04;
11. Végvári Zsolt: A katonai aggregátor fejlesztés és gyártás történeti áttekintése – különös tekintettel a villamos forgógépek magyarországi gyártására 1927-1954 között – **Katonai Logisztika** 26. évf. (2016) különszám 564-579o. (ISSN 1588-4228, on-line ISSN 1789-6398);

12. Végvári Zsolt: International Scenes of Military Energy Research – **Defence Review** 145. évf. (2017) 1. szám 107-117o. (ISSN 2060-1506);
13. Király László – Végvári Zsolt: Energiahatékonyság a Magyar Honvédség béke időszaki működésében – **Hadtudomány** (2017) 3-4. szám 54-73o. (ISSN 1215-4121), DOI: 10.17047/HADTUD.2017.27.3-4.54;
14. Végvári Zsolt: Smart Military Electrical Grids – **AARMS** 17. évf. (2018) 1. szám 53-70o. (ISSN 2498-5392);
15. Végvári Zsolt: A Harckocsik védelmének fejlődése a páncélelhárítás fejlődésének tükrében és az aktív védelmi rendszerek (APS) megjelenése 1. rész – **Haditechnika** 52. évf. (2018) 3. szám 20-24o. (ISSN 0230-6891), DOI: 10.23713/HT/52.3.05;
16. Végvári Zsolt: A Harckocsik védelmének fejlődése a páncélelhárítás fejlődésének tükrében és az aktív védelmi rendszerek (APS) megjelenése 2. rész – **Haditechnika** 52. évf. (2018) 4. szám 35-38o. (ISSN 0230-6891), DOI: 10.23713/HT/52.4.07;
17. Ocskay István – Végvári Zsolt: A hidrogén üzemanyagcellák katonai célú felhasználásának lehetőségei – **Haditechnika** 53. évf. (2019) 2. szám 14-19o. (ISSN 0230-6891), DOI: 10.23713/HT/53.2.03;
18. Végvári Zsolt: Kilopower – villamos erőmű a Marson 1. rész – **Haditechnika** 53. évf. (2019) 2. szám 43-46o. (ISSN 0230-6891), DOI: 10.23713/HT/53.2.08;
19. Végvári Zsolt: Kilopower – villamos erőmű a Marson 2. rész – **Haditechnika** 53. évf. (2019) 3. szám 39-42o. (ISSN 0230-6891), DOI: 10.23713/HT/53.3.08;
20. Végvári Zsolt: A szuperkondenzátorok és katonai alkalmazhatóságuk – **Haditechnika** 53. évf. (2019) 5. szám 20-25o. (ISSN 0230-6891), DOI: 10.23713/HT/53.5.05;
21. Végvári Zsolt: Supercapacitors and their Military Applicability – **Defence Review** 147. évf. (2019) 1-2. szám 38-49o. (ISSN 2060-1506), DOI: 10.35926/HDR.2019.1-2.3;
22. Végvári Zsolt: A hidrogén lehetséges honvédelmi (katonai) alkalmazása - **Haditechnika** 55. évf. (2021) 1. szám 20-25o. (ISSN 0230-6891), DOI: 10.23713/HT/55.1.04;
23. Végvári Zsolt: A korszerű harcjárművek áramellátásának sajátosságai 1. rész – **Haditechnika** 56. évf. (2022) 2. szám 24-28o. (ISSN 0230-6891), DOI: 10.23713/HT/56.2.05;
24. Végvári Zsolt: A korszerű harcjárművek áramellátásának sajátosságai 2. rész – **Haditechnika** 56. évf. (2022) 3. szám 21-25o. (ISSN 0230-6891), DOI: 10.23713/HT/56.3.04;

25. Végvári Zsolt: A 3D nyomtatás felhasználási lehetőségei a műveleti logisztikában – **Katonai Logisztika** 33. évf. (2023) 1-2. szám 177-198o. (ISSN 1588-4228, on-line ISSN 1789-6398), DOI: 10.30583/2023-1-2-177;
26. Sebők István-Végvári Zsolt: A Lynx harcjármű fegyverzete és védelmi rendszerei- **Haditechnika** 57. évf. (2023) 4. szám 50-56o. (ISSN 0230-6891), DOI: 10.23713/HT/57.4.10;

Felhasznált irodalom

- [1] A. Konstandopoulos, „*Rational RES in Defence*”, Dublin, Croke Park, 2016. 08. 14.
- [2] „Key World Energy Statistics 2021”. *International Energy Agency*, 2021. szeptember. <https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2021> (elérés: 2021. december 26.).
- [3] „*World Population by Year - Worldometer*”. <https://www.worldometers.info/world-population/world-population-by-year/> (elérés: 2020. szeptember 3.).
- [4] G. Büki, *Erőművek: egyetemi tankönyv, szakkönyv*. Budapest: Műegyetemi K., 2004.
- [5] P. A. Breeze, *Power generation technologies*, 3. kiad. Elsevier, 2019.
- [6] E. Härö, S.-M. Järvensivu, J. Alilehto, és P. Haravuori, „*Electricity: How long could we survive without it?*”, *Urban Insight*, 2020. <https://www.swecourbaninsight.com/urban-energy/electricity-how-long-could-we-survive-without-it/> (elérés: 2020. szeptember 4.).
- [7] „*Definition of INFORMATION AGE*”. <https://www.merriam-webster.com/dictionary/Information+Age> (elérés: 2020. szeptember 4.).
- [8] Z. Haig, *Információs műveletek a kibertérben*. Budapest: Dialóg Campus Kiadó, 2018.
- [9] F. Hajdú, „90 éve alapították a Magyar Királyi Honvéd Haditechnikai Intézetet”, *Haditechnika*, köt. 45, sz. 1, febr. 2011.
- [10] „*STO Technical Panels*”. <https://www.sto.nato.int/Pages/sto-panels.aspx> (elérés: 2023. július 25.).
- [11] „*Capability Technology Areas (CapTechs)*”, *European Defence Agency*, [https://eda.europa.eu/what-we-do/research-technology/capability-technology-areas-\(captechs\)](https://eda.europa.eu/what-we-do/research-technology/capability-technology-areas-(captechs)) (elérés: 2023. július 31.).
- [12] „*EDA OSRA fact sheet*”, *European Defence Agency*, Brussels, 25 2019.
- [13] J. Woodman, „*Smart Energy Camp Final Report*”, BAE Systems, ESS086D020, máj. 2016.
- [14] M. Michaelis, „*CL15 SE report*”, NATO HQ, Brussels, 2016.
- [15] P. Tomcsányi, *Általános kutatómódszertan: az ismeretalkotás és -közlés tudományszaktól független elmélete és gyakorlata*. Gödöllő, Budapest: Szent István Egyetem Országos Mezőgazdasági Minősítő Intézet, 2000.

- [16] R. A. Huggins, *Energy storage: fundamentals, materials and applications*. New York, NY: Springer Science+Business Media, 2015.
- [17] International Conference on Electrochemical Materials and Technologies for Clean Sustainable Energy, *Electrochemical energy: advanced materials and technologies*. in Electrochemical energy storage and conversion. Boca Raton, Fla.: CRC Press, 2016.
- [18] G. Pistoia, Szerk., *Lithium-ion batteries: advances and applications*, First edition. Amsterdam: Elsevier, 2014.
- [19] R. P. O'Hayre, S.-W. Cha, W. G. Colella, és F. B. Prinz, *Fuel cell fundamentals*, Third edition. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2016.
- [20] A. Yu, V. Chabot, és J. Zhang, *Electrochemical supercapacitors for energy storage and delivery: fundamentals and applications*. in Electrochemical energy storage and conversion. Boca Raton, FL: CRC Press, 2013. Elérés: 2017. szeptember 5. [Online]. Elérhető: <http://www.crcnetbase.com/doi/book/10.1201/b14671>
- [21] „Introduction to electrical machines”, in *Electrical Machines*, New York, NY: Springer New York, 2013, o. 1–23. doi: 10.1007/978-1-4614-0400-2_1.
- [22] L. L. J. Mahon, *Diesel generator handbook*. Oxford ; Boston: Butterworth-Heinemann, 1992.
- [23] G. Alapi, Z. Asztalos, M. Bogdán, F. Hörcher, és I. Szita, *Villamos forgógépek*. Budapest: Műszaki Kiadó, 1969.
- [24] K. Mertens, *Photovoltaics: fundamentals, technology and practice*. Chichester, West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons Inc, 2014.
- [25] B. Sørensen, *Renewable energy conversion, transmission, and storage*. Amsterdam; Boston: Elsevier/Academic Press, 2007.
- [26] D. Bessarabov, H. Wang, H. Li, és N. Zhao, Szerk., *PEM electrolysis for hydrogen production: principles and applications*. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2016.
- [27] G. Conibeer és A. Willoughby, Szerk., *Solar cell materials: developing technologies*. in Wiley series in materials for electronic and optoelectronic applications. Chichester, West Sussex, United Kingdom: Wiley, 2014.
- [28] „STANAG 4133:2008”
- [29] Z. Gulyás, Szerk., „Allied Joint Doctrine for Logistics”. NATO NSO, 2018. 20.
- [30] „Chapter 8: Petroleum Support”, in *NATO Logistics Handbook*, Brussels: NATO HQ, 2012, o. 95–104.
- [31] „STANAG 4362: 2012 - Fuels for Future Ground Equipment using Compression Ignition or Turbine Engines”. NATO, 2012.
- [32] „MIL-STD-633G”. US DoD, 2013. május 30.
- [33] „ATP 3.34-45”. US DoD, 2018. július.
- [34] „ATP 3.37-10”. US DoD, 2017. január.
- [35] R. Bryce, „Gas Pains”, *The Atlantic*, 2005. május. <https://www.theatlantic.com/magazine/archive/2005/05/gas-pains/303897/> (elérés: 2017. augusztus 30.).

- [36] E. C. Shaffer, D. D. Massie, és J. B. Cross, „*Power and Energy Architecture for Army Advanced Energy Initiative*”, Army Research Laboratory, Adelphi, Maryland, DTIC_ADA481011, 2006.
- [37] „Key World Energy Statistics 2016”. *International Energy Agency*, 2016. <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2016.pdf> (elérés: 2017. szeptember 6.).
- [38] W. G. on Feb 12 és 2015, „Department of Defense Reducing Energy Consumption: Why This is a GREAT Thing”, *American Security Project*. <https://www.americansecurityproject.org/department-of-defense-reducing-energy-consumption-why-this-is-a-great-thing/> (elérés: 2022. január 3.).
- [39] L. Király és M. Medveczky, *Védelemgazdasági ismeretek önkormányzati válságmenedzserek (védelmi igazgatási referensek) számára*. Budapest: NKE, 2009.
- [40] F. Kovács, „The green barracks program”, *Hadtudomány*, köt. 2013, különszám, o. 67–82, 2013.
- [41] „Key World Energy Statistics 2017”. *International Energy Agency*, 2017. <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2017.pdf> (elérés: 2017. október 31.).
- [42] T. Durul, „Greece continues to militarize eastern Aegean islands in violation of international agreements”, 2022. május 30. <https://www.aa.com.tr/en/europe/greece-continues-to-militarize-eastern-aegean-islands-in-violation-of-international-agreements/2601390> (elérés: 2022. december 18.).
- [43] „FY20 Operational Energy Annual Report”, *DoD*, Washington, 1-09C141D, máj. 2021.
- [44] „Majorly Awesome Military Energy Savers - We Salute You!”, *Energy.gov*. <https://www.energy.gov/energysaver/articles/majorly-awesome-military-energy-savers-we-salute-you> (elérés: 2022. december 18.).
- [45] A. Preston, „Powering Future Operations: Net Zero Challenges & Opportunities”, Defence Suppliers Forum Research Technology & Innovation Group (RTIG), London, 2020.
- [46] dr P. L. (Sol Invictus), „Ennyi üzemanyagot füstölnek el a magyar autósok minden évben”, *Villanyautósok*, 2021. április 18. <https://villanyautosok.hu/2021/04/18/ennyi-uzemanyagot-fustolnek-el-a-magyar-autosok-minden-evben/> (elérés: 2022. december 18.).
- [47] „FGSZ - Statisztikai adatok”, *FGSZ*. <https://fgsz.hu/a-foldgazrol/a-foldgaz-szerepe/statisztikai-adatok> (elérés: 2022. december 18.).
- [48] „15.1.1.44. Villamosenergia-ellátás”, *Központi Statisztikai Hivatal*. https://www.ksh.hu/stadat_files/kor/hu/kor0044.html (elérés: 2022. december 18.).
- [49] „A Honvédség aktuális külföldi katonai missziói”. *Országgyűlés Hivatala*, 2020. október 2.
- [50] L. Király és Z. Végvári, „Energiahatékonyság a Magyar Honvédség béke időszaki működésében”, *Hadtudomány*, köt. 27, sz. 3–4, Art. sz. 3–4, nov. 2017, doi: DOI 10.17047/HADTUD.2017.27.3–4.54.
- [51] „FY15 Operational Energy Annual Report”, *DoD*, Washington, 2-7034F9F, aug. 2016.

- [52] M. Haddad és M. Hussein, „Infographic: History of US interventions in the past 70 years”, *Aljazeera*, 2021. szeptember 10. <https://www.aljazeera.com/news/2021/9/10/infographic-us-military-presence-around-the-world-interactive> (elérés: 2022. december 19.).
- [53] Z. Végvári, „A LED-ek alkalmazásának lehetőségei a Magyar Honvédségben”, *Katonai Logisztika*, köt. 23, sz. 1, 2015.
- [54] „Légkondicionáló klímaberendezés szezonális energiaosztály”, *SzegedKlima*. <https://www.szegedklima.hu/energiaosztaly/2013.php> (elérés: 2022. december 30.).
- [55] A. Rajh, „The versatile role of small hydro civilian and military - dual use”, előadás 3th CF-SEDSS, Dublin, Croke Park, 2016. június 9.
- [56] „Third Defence Energy Management course launched”. <https://eda.europa.eu/news-and-events/news/2019/05/24/third-defence-energy-management-course-launched> (elérés: 2022. december 21.).
- [57] I. Chatzalexandris, „Defence Energy manager Course Update”, előadás *EDA 16th E&E WG*, Brussels (online), 2020. szeptember 22.
- [58] „236 Defense Energy Certificate - Distance Learning - Naval Postgraduate School”. <https://nps.edu/web/dl/236-defense-energy-certificate> (elérés: 2022. december 21.).
- [59] „French Defence Energy Strategy”. *French MoD*, 2020.
- [60] „US Army Climate Strategy”. *US Army*, 2022. február.
- [61] „Nemzeti Energiastratégia 2030, kitekintéssel 2040-ig”. *ITM*, 2020. január.
- [62] „Magyarország Nemzeti- és Klímaterve”. *ITM*, 2020.
- [63] „Magyarország Nemzeti Biztonsági Stratégiája”. *Magyar Közlöny*, 2020.
- [64] „Magyarország Nemzeti Katonai Stratégiája”. *Magyar Közlöny*, 2021.
- [65] P. Barberini, „NATO Green Defence: From the 2014 Green Defence Framework to the 2021 Climate Change and Security Action Plan”, in *Innovative Technologies and Renewed Policies for Achieving a Greener Defence*, G. Iacovino és M. Wigell, Szerk., in NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security. Dordrecht: Springer Netherlands, 2022, o. 7–16. doi: 10.1007/978-94-024-2186-6_2.
- [66] NATO, „Madrid Summit Declaration issued by NATO Heads of State and Government (2022)”, *NATO*, 2022. https://www.nato.int/cps/en/natohq/official_texts_196951.htm (elérés: 2022. december 25.).
- [67] J. Padányi, *Kihívások, kockázatok, válaszok - Az éghajlatváltozás okozta kihívások és azok hatása a katonai erőre*. Budapest: Ludovika Kiadó, 2022.
- [68] C. Hadiisavvas, „OSRA status update”, előadás EDA 14th E&E WG, Brussels, EDA HQ, 2020. október 20.
- [69] Z. Szenes, „Az orosz-ukrán háború logisztikai vetületei”, előadás A logisztika időszerű kérdései, NKE, 2022. november 24.
- [70] I. Resperger, P. Kiss-Álmos, és B. Somkuti, *Aszimmetrikus hadviselés a modern korban*. in *Katonák békében és missziókban*. Budapest: Zrínyi Kiadó, 2014.
- [71] K. Lilley, „Hawaii NCO charged in Afghanistan FOB fuel-theft ring”, *Army Times*, 2015. május 26. <https://www.armytimes.com/news/your-army/2015/05/26/hawaii-nco-charged-in-afghanistan-fob-fuel-theft-ring/> (elérés: 2021. január 23.).

- [72] L. Hevesi, *Autóvillamosság 1.*, 2010. kiad. Budapest: Műszaki Könyvkiadó.
- [73] „A generátor felépítése és a generátor felújítás”, *www.evoauto.hu*.
<https://evoauto.hu/az-auto-reszei/elektromos-es-karosszeria-alkatreszek/a-generator-felepitesi-es-a-generator-felujitas> (elérés: 2022. december 31.).
- [74] Z. Végvári, „A katonai aggregátorfejlesztés- és gyártás történeti áttekintése, különös tekintettel a villamos forgógépek magyarországi gyártására 1927-1954 között”, *Katonai Logisztika*, köt. 24, sz. különszám, 2016.
- [75] M. E. Haskew, *Tank: 100 years of the world's most important armored military vehicle*. Minneapolis, MN: Zenith Press, an imprint of Quarto Publishing Group, 2015.
- [76] P. Óri, „100 éves a Bosch dinamó”, *autotechnika.hu*, 2013. április 3.
<https://autotechnika.hu/cikkek/egyeb/10178/100-eves-a-bosch-dinamo> (elérés: 2023. január 1.).
- [77] K. Turcsányi, *Nehéz harckocsik: összehasonlító értékelések, műveleti alkalmazások és a magyar TAS tervezése*. Nagykovácsi: Püldo Kiadó, 2008.
- [78] „Дизель-генератор 60 (кВт) военный АД-60 в г Москва | Объявления | Элек.ру”, 2022. december 20. <https://www.elec.ru/doska/dizel-generator-60-kvt-voennyj-ad-60-1238514689/> (elérés: 2023. január 1.).
- [79] Szabó Gyula, „A katonai szolgálatból származó fizikai terhelés értékelésének módszerei”, 2013, doi: 10.17625/NKE.2013.024.
- [80] F. Márkus, „A gyalogos lövészkatona egyéni harcászati felszerelésének modernizálási lehetőségei a Magyar Honvédségben”, *Seregszemle*, köt. 11, sz. 2–3, máj. 2013.
- [81] V. Mittal, „U.S. Soldiers’ Burden Of Power: More Electronics Means Lugging More Batteries”, *Forbes*, 2020. október 26.
<https://www.forbes.com/sites/vikrammittal/2020/10/26/energy-management-a-deciding-factor-of-future-battles/> (elérés: 2023. június 2.).
- [82] B. Diouf és R. Pode, „Potential of lithium-ion batteries in renewable energy”, *Renewable Energy*, köt. 76, o. 375–380, ápr. 2015, doi: 10.1016/j.renene.2014.11.058.
- [83] N. Katsuhiko és P. Simon, „New Materials and New Configurations for Advanced Electrochemical Capacitors”, *Interface*, köt. 17, sz. 1, 2008.
- [84] Z. Végvári, „Supercapacitors and their military applicability”, *Honvédségi Szemle*, köt. 147, sz. 1–2, jan. 2020, doi: 10.35926/HDR.2019.1-2.3.
- [85] Z. Végvári, „A korszerű harcjárművek áramellátásának sajátosságai 2. rész”, *Haditechnika*, köt. 56, sz. 3, o. 21–25, jún. 2022, doi: 10.23713/HT.56.3.04.
- [86] Z. Haig és I. Várhegyi, *Hadviselés az információs hadszíntéren*. Budapest: Zrínyi Kiadó, 2005.
- [87] NATO, „Warsaw Summit Communiqué - Issued by the Heads of State and Government participating in the meeting of the North Atlantic Council in Warsaw, 8-9 July 2016”, *NATO*, 2016. http://www.nato.int/cps/en/natohq/official_texts_133169.htm (elérés: 2021. március 8.).
- [88] D. Zikusoka és C. Rondeaux, „Satellite Wars over Ukraine”, *New America*, 2023. február 24. <http://newamerica.org/future-frontlines/blogs/satellite-wars-over-ukraine/> (elérés: 2023. június 24.).

- [89] T. Király, *Orosz-ukrán háború a színpalak mögött*. in Spirit könyvek. Budapest: Free Spirit Publishing, 2022.
- [90] „Információ”, *Teremtéstudomány*. <http://teremtéstudomány.hu/informacio/> (elérés: 2023. június 20.).
- [91] A. Metha, „DC/DC converter datasheets - Calculate system losses - Power management - Technical articles - TI E2E support forums”, 2016. május 2. https://e2e.ti.com/blogs_/b/powerhouse/posts/dc-dc-converter-datasheets-calculating-losses (elérés: 2023. június 20.).
- [92] „An Efficiency Primer for Switch-Mode, DC-DC Converter Power Supplies | Analog Devices”. <https://www.analog.com/en/technical-articles/an-efficiency-primer-for-switchmode-dcdc-converter-power-supplies.html> (elérés: 2023. június 20.).
- [93] H. Mellah és B. Sansò, „Review of Facts, Data and Proposals for a Greener Internet”, in *Proceedings of the 6th International ICST Conference on Broadband Communications, Networks, and Systems*, Madrid, Spain: IEEE, 2009. doi: 10.4108/ICST.BROADNETS2009.7269.
- [94] K. Rupp, „CPU, GPU and MIC Hardware Characteristics over Time”, *karlrupp*, 2013. június 21. <https://www.karlrupp.net/2013/06/cpu-gpu-and-mic-hardware-characteristics-over-time/> (elérés: 2023. április 23.).
- [95] N.-D. Au és C. Seo, „A Novel Design of an RF-DC Converter for a Low-Input Power Receiver”, *J Electromagn Eng Sci*, köt. 17, sz. 4, o. 191–196, okt. 2017, doi: 10.26866/jees.2017.17.4.191.
- [96] B. Witte, „How to calculate RF power amplifier efficiency”, *5G Technology World*, 2020. november 9. <https://www.5gtechnologyworld.com/how-to-calculate-rf-power-amplifier-efficiency/> (elérés: 2023. február 28.).
- [97] Z. B. Erdődi, „A tábori elhelyezési eszközrendszer modernizálásának lehetőségei”, *HSZ-HDR*, köt. 145, sz. 3, o. 98–118, 2017.
- [98] R. Wingfield-Hayes, „VJ Day: A WW2 hero and a reckoning with Japan’s past”, *BBC News*, 2020. augusztus 14. <https://www.bbc.com/news/world-asia-53763059> (elérés: 2023. június 20.).
- [99] „BB-2590/U material safety data sheet”. BrenTronics Inc., 2014.
- [100] „Mennyi villamos áramot fogyaszt egy háztartás egy hónapban és az a kWh energia mennyibe kerül?”, *ProfitLine.hu*, 2019. november 22. <https://profitline.hu/Mennyi-villamos-aramot-fogyaszt-egy-haztartas-egy-honapban-es-az-a-kWh-energia-mennyibe-kerul-400446> (elérés: 2023. május 1.).
- [101] „Daily Energy Needs | Energy Fundamentals”, *Leipzig University*. <https://home.uni-leipzig.de/energy/energy-fundamentals/04.htm> (elérés: 2023. május 1.).
- [102] „UKW-Funkgerät R-107 {P-107} Military B-8865 V8865 post | Radiomuseum”. https://www.radiomuseum.org/r/b_8865_r_107.html (elérés: 2023. május 16.).
- [103] „Az R-107 készülék kezelési utasítása”. Videoton, 1978.
- [104] „M16 Rifle vs M4 Carbine - Difference and Comparison”, *Diffen*, 2017. november 12. https://www.diffen.com/difference/M16_Rifle_vs_M4_Carbine (elérés: 2017. november 12.).

- [105] „AK-47”. <https://www.cs.mcgill.ca/~rwest/wikispeedia/wpcd/wp/a/AK-47.htm> (elérés: 2023. június 24.).
- [106] L. Szűcs, „»A Digitális Katona Program a Magyar Honvédség teljes gondolkodásmódját meg fogja változtatni«”, *honvedelem.hu*, 2021. február 15. <https://honvedelem.hu/hirek/a-digitalis-katona-program-a-magyar-honvedseg-teljes-gondolkodasmodjat-meg-fogja-valtoztatni.html> (elérés: 2023. május 16.).
- [107] C. Aten, A. Michalowski, M. Williams, C. Stamm, és P. Evangelista, „Soldier Power Operational Benefit Analysis”, *ISER*, köt. 3, sz. 2, o. 82–90, 2015.
- [108] R. K. Mazlan, R. M. Dan, M. Z. Zakaria, és A. H. A. Hamid, „Experimental study on the effect of alternator speed to the car charging system”, *MATEC Web Conf.*, köt. 90, o. 01076, 2017, doi: 10.1051/mateconf/20179001076.
- [109] A. Haynes, J. Spina, E. Schwartz, és G. Hamilton, „The Next Generation Combat Vehicle Electrical Power Architecture (NGCVEPA) - An overview”, előadás Ground Vehicle Systems Engineering and Technology Symposium (GVSETS), Novi, Michigan, 2018. 07.
- [110] C. Seabaugh, „How the Humvee Compares to the New Oshkosh JLTV”, *Motor Trend*, 2017. május 17. <http://www.motortrend.com/news/humvee-compares-to-new-oshkosh-jltv/> (elérés: 2017. november 12.).
- [111] „Oshkosh JLTV vs AM General Humvee | Tactical Experts”, *TacticalGear.com*. <https://tacticalgear.com/experts/oshkosh-jltv-vs-am-general-humvee> (elérés: 2022. január 15.).
- [112] M. Njuguna, „Humvee Vs Oshkosh JLTV: Here’s How The Military Vehicles Compare”, *HotCars*, 2021. január 25. <https://www.hotcars.com/humvee-vs-oshkosh-jltv-heres-how-the-military-vehicles-compare/> (elérés: 2022. január 16.).
- [113] „Integrated High Power Generation for the Joint Light Tactical Vehicle | SBIR.gov”, *SBIR*. <https://www.sbir.gov/node/2214285> (elérés: 2023. május 16.).
- [114] M. J. Ryan és M. R. Frater, *Tactical communications for the digitized battlefield*. in The Artech House information warfare library. Boston: Artech House, 2002.
- [115] J. Li, J. Jiang, K. Yang, és Y. Chen, „Research on Functional Robustness of Heterogeneous Combat Networks”, *IEEE Systems Journal*, köt. 13, sz. 2, o. 1487–1495, jún. 2019, doi: 10.1109/JSYST.2018.2828779.
- [116] Z. Végvári, „A Harekocsik védelmének fejlődése a páncélelhárítás fejlődésének tükrében és az aktív védelmi rendszerek (APS) megjelenése 1. rész”, *Haditechnika*, köt. 52, sz. 3, jún. 2018, doi: 10.23713/HT.52.3.05.
- [117] S. Ravindra Jape és A. Thosar, „Comparison of Electric Motors for Electric Vehicles Application”, *IJRET*, köt. 6, sz. 9, o. 12–17, szept. 2017.
- [118] M. Ehsani, Y. Gao, és A. Emadi, *Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: fundamentals, theory, and design*, 2nd ed. in Power electronics and applications series. Boca Raton: CRC Press, 2010.
- [119] J. Saballa, „UK Army Testing Electric Motorbikes for Military Airdrops”, *The Defense Post*, 2021. december 27. <https://www.thedefensepost.com/2021/12/27/british-army-electric-motorbikes/> (elérés: 2023. augusztus 1.).

- [120] RFL, „Ukraine’s Electric Cavalry: The E-Bikes Being Used In Battle”, *Radio Free Europe/Radio Liberty*, 2022. május 24. <https://www.rferl.org/a/ukraine-electric-bikes-war-russia-technology/31865559.html> (elérés: 2023. augusztus 1.).
- [121] V. Machi, „Vehicle makers court Europe’s militaries with hybrid, electric rides”, *DefenseNews*, 2022. június 25. <https://www.defensenews.com/global/europe/2022/06/25/vehicle-makers-court-europes-militaries-with-hybrid-electric-rides/> (elérés: 2023. május 24.).
- [122] K. Osborn, „New AbramsX -- AI-Enabled, Fuel-Efficient, Unmanned Turret & »Silent« Attack”, *Warrior Maven: Center for Military Modernization*, 2023. március 9. <https://warriormaven.com/land/-abramsx-ai-enabled-fuel-efficient-unmanned-turret-silent-attack> (elérés: 2023. május 24.).
- [123] B. Haskell, „Combating AI Energy Consumption through Renewable Sources”, *Spiceworks*. <https://www.spiceworks.com/tech/artificial-intelligence/guest-article/combating-ai-energy-consumption-through-renewable-sources/> (elérés: 2023. június 20.).
- [124] P. L. Vicente, „Additive Manufacturing Feasibility Study & Technology Demonstration EDA AM State of the Art & Strategic Report”, *European Defence Agency*, Brussels, megvalósíthatósági tanulmány, 2018.
- [125] „Metal 3D printer | EOS Metal Systems”. <https://www.eos.info/en/additive-manufacturing/3d-printing-metal/eos-metal-systems> (elérés: 2022. november 5.).
- [126] „A PK-4 pc. kódú készlet beépítési és rendszertechnikai terve”. ArmCom Zrt., 2007.
- [127] „Reducing the Battery Burden on the Dismounted Soldier”, *Thales Group*, 2016. szeptember. <https://www.thalesgroup.com/en/global/presence/europe/united-kingdom/defence/land-systems/soldier-systems/squadnet/reducing-battery> (elérés: 2023. június 2.).
- [128] D. Lanna, „How soldiers power their military devices”, *Electronic Specifier*, 2018. április 25. <https://www.electronicspecifier.com/news/analysis/how-soldiers-power-their-military-devices> (elérés: 2023. június 2.).
- [129] D. Kunertova, „The war in Ukraine shows the game-changing effect of drones depends on the game”, *Bulletin of the Atomic Scientists*, köt. 79, sz. 2, o. 95–102, márc. 2023, doi: 10.1080/00963402.2023.2178180.
- [130] E. Hecht, „Drones in the Nagorno-Karabakh War: Analyzing the Data”, *Military Strategy Magazine*. <https://www.militarystrategymagazine.com/article/drones-in-the-nagorno-karabakh-war-analyzing-the-data/> (elérés: 2022. október 22.).
- [131] J. Gyarmati és R. Simó, „Autonóm terepjáró járművek katonai felhasználásának lehetőségei II. rész”, *Haditechnika*, köt. 55, sz. 1, o. 8–14, 2021, doi: 10.23713/HT.55.1.02.
- [132] „22 NATO supply trucks destroyed in Afghanistan”, *Tampa Bay Times*, 2012. július 19. <https://www.tampabay.com/incoming/22-nato-supply-trucks-destroyed-in-afghanistan/1241043/> (elérés: 2023. május 29.).
- [133] M. Abdelbaky, J. R. Peeters, és W. Dewulf, „On the influence of second use, future battery technologies, and battery lifetime on the maximum recycled content of future electric vehicle batteries in Europe”, *Waste Management*, köt. 125, o. 1–9, ápr. 2021, doi: 10.1016/j.wasman.2021.02.032.

- [134] K. Gerse, *Energiatárolók*. Budapest: Akadémiai Kiadó, 2020.
- [135] J. Castro-Gutiérrez, A. Celzard, és V. Fierro, „Energy Storage in Supercapacitors: Focus on Tannin-Derived Carbon Electrodes”, *Front. Mater.*, köt. 7, o. 217, júl. 2020, doi: 10.3389/fmats.2020.00217.
- [136] V. Spasić, „Energy Vault - energy storage made of concrete blocks and cranes”, *Balkan Green Energy News*, 2019. szeptember 12. <https://balkangreenenergynews.com/energy-vault-energy-storage-made-of-concrete-blocks-and-cranes/> (elérés: 2023. május 29.).
- [137] G. P. Izquierdo, „El Hierro Projekt”, előadás CF-SEDSS, Chania, Crete, 2023. 26.
- [138] „CNESA Global Energy Storage Market Analysis – 2020.Q1 (Summary)”, *China Energy Storage Alliance*, 2020. május 8. <http://en.cnesa.org/latest-news/2020/5/28/cnesa-global-energy-storage-market-analysis-2020q1-summary> (elérés: 2023. június 2.).
- [139] „EMALS”. General Atomics.
- [140] P. Tseng, J. Lee, és P. Friley, „A hydrogen economy: opportunities and challenges”, *Energy*, köt. 30, sz. 14, o. 2703–2720, nov. 2005, doi: 10.1016/j.energy.2004.07.015.
- [141] M. Hadad, I. Richard, D. Kónya, és A. Tompos, „FUSS project Technology proposition”, *Inergio*, Lausanne, 2023.
- [142] D. Yu és mtsai., „Failure mechanism and predictive model of lithium-ion batteries under extremely high transient impact”, *Journal of Energy Storage*, köt. 43, o. 103191, nov. 2021, doi: 10.1016/j.est.2021.103191.
- [143] J. Domecq, „Acceptance of a new R&T ad hoc project (category B) in the EDA: »Development of an innovative auxiliary power unit for military purposes based on high temperature PEM fuel cell and reforming technology for military logistic fuels«”. EDA, 2017.
- [144] M.-K. Song, Y. Zhang, és E. J. Cairns, „A Long-Life, High-Rate Lithium/Sulfur Cell: A Multifaceted Approach to Enhancing Cell Performance”, *Nano Letters*, köt. 13, sz. 12, Art. sz. 12, dec. 2013, doi: 10.1021/nl402793z.
- [145] V. Neburchilov és J. Zhang, Szerk., *Metal-air and metal-sulfur batteries: fundamentals and applications*. in Electrochemical energy storage and conversion. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2017.
- [146] „CATL launches “condensed battery” with an energy density of up to 500 Wh/kg for aircraft; automotive version this year”, *Green Car Congress*. <https://www.greencarcongress.com/2023/04/20230420-catl.html> (elérés: 2023. június 3.).
- [147] Marc S. Reisch, „Solid-state batteries inch their way to market”, *C&EN Global Enterp*, köt. 95, sz. 46, o. 19–21, nov. 2017, doi: 10.1021/cen-09546-bus.
- [148] M. Gockeln, J. Glenneberg, M. Busse, S. Pokhrel, L. Mädler, és R. Kun, „Flame aerosol deposited Li₄Ti₅O₁₂ layers for flexible, thin film all-solid-state Li-ion batteries”, *Nano Energy*, köt. 49, o. 564–573, júl. 2018, doi: 10.1016/j.nanoen.2018.05.007.
- [149] R. C. Agrawal és G. P. Pandey, „Solid polymer electrolytes: materials designing and all-solid-state battery applications: an overview”, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, köt. 41, sz. 22, o. 223001, nov. 2008, doi: 10.1088/0022-3727/41/22/223001.

- [150] H. Desa és Z. Shaiful, „Study of Integration 2.4GHz and 5.8GHz in RFID Tag”, előadás International Conference on Man-Machine Systems, Peneng, 2009. 07.
- [151] „Rézvezetékek terhelhetősége”, *Oktel Kft.* <https://oktel.hu/tamogatas/muszaki-segedletek/rezvezeteketek-terhelhetosege/> (elérés: 2023. június 4.).
- [152] I. Emőd, L. Finichiu, és G. Dezsényi, *Belsőégésű motorok tervezése és vizsgálata.* Budapest: Tankönyvkiadó, 1992.
- [153] „BorgWarner Exhaust Heat Recovery System for hybrids can improve fuel economy by up to 8.5%”, *Green Car Congress.* <https://www.greencarcongress.com/2018/07/20180731-ehrs.html> (elérés: 2023. június 6.).
- [154] M. Jiang, „An Overview of Radioisotope Thermoelectric Generators”, *Stanford University*, 2013. 15. <http://large.stanford.edu/courses/2013/ph241/jiang1/> (elérés: 2018. október 23.).
- [155] L. Mason, „NASA Kilopower overview and mission applications”. NASA, 2018. május 2. <https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/kilopower-media-event-charts-final-011618.pdf> (elérés: 2018. szeptember 16.).
- [156] L. S. Langston, „Aspects of Gas Turbine Thermal Efficiency”, *Mechanical Engineering*, köt. 142, sz. 09, o. 54–55, szept. 2020, doi: 10.1115/1.2020-SEP4.
- [157] R. Decuypere és D. Verstraete, „Micro Turbines from the Standpoint of Potential Users”, NATO RTO, Brussels, RTO-EN-AVT-131, 2014.
- [158] A. Yeong, „The T-80 Is Russia’s Most Overrated Tank”, 2015. augusztus 10. <https://warisboring.com/the-t-80-is-russia-s-most-overrated-tank-798b5ba54ff9> (elérés: 2023. június 17.).
- [159] Oryx, „Attack On Europe: Documenting Russian Equipment Losses During The Russian Invasion Of Ukraine”, *Oryx.* <https://www.oryxspioenkop.com/2022/02/attack-on-europe-documenting-equipment.html> (elérés: 2023. június 17.).
- [160] „M1 Abrams Main battle tank | Specifications, production, cost”, *ArmedForces.* https://armedforces.eu/land_forces/tanks/M1_Abrams (elérés: 2023. június 17.).
- [161] R. Adams, „ML-1 Mobile Power System: Reactor in a Box - Atomic Insights”, 2019. február 1. <https://atomicinsights.com/ml1-mobile-power-system-reactor-box/> (elérés: 2023. június 6.).
- [162] C. Digges, „Russian Defense Ministry confirms portable nuclear reactor development”, *Bellona.org*, 2015. november 5. <https://bellona.org/news/nuclear-issues/2015-11-russian-defense-ministry-confirms-portable-nuclear-reactor-development> (elérés: 2023. június 6.).
- [163] „Build Small Nuclear Reactors for Battlefield Power”, *Defense One*, 2018. szeptember 20. <https://www.defenseone.com/ideas/2018/09/build-small-nuclear-reactors-battlefield-power/151434/> (elérés: 2023. június 6.).
- [164] D. Sziroczak és H. Smith, „A review of design issues specific to hypersonic flight vehicles”, *Progress in Aerospace Sciences*, köt. 84, o. 1–28, júl. 2016, doi: 10.1016/j.paerosci.2016.04.001.
- [165] „Electromagnetic (EM) Railgun”, *BAE Systems*, 2017. szeptember 3. <http://www.baesystems.com/en/product/electromagnetic--em--railgun> (elérés: 2017. szeptember 3.).

- [166] Y. Gao, C. Gregor, Y. Liang, D. Tang, és C. Tweed, „Algae biodiesel - a feasibility report”, *Chemistry Central Journal*, köt. 6, sz. S1, o. S1, febr. 2012, doi: 10.1186/1752-153X-6-S1-S1.
- [167] „Comandante Foscari - Marina Militare”.
<http://www.marina.difesa.it/EN/thefleet/home/Pagine/ComandanteFoscari.aspx> (elérés: 2023. június 7.).
- [168] T. G. Puzder, „Alternatív tüzelőanyagok, energetikai hasznosításuk, erőművi együttétetés”, előadás Műegyetemi Energia Klub, Budapest, 2016. 20.
www.eszk.org/attachments/1321/ea/szilard_hulladekok_eloadas_eszk.pdf (elérés: 2020. október 10.).
- [169] „Military waste - Sinai Peninsula”, *INCINER8*. <https://www.inciner8.com/case-studies/www.inciner8.com-sinai-peninsula> (elérés: 2023. június 7.).
- [170] S. Michaelis, „CL15 SMART ENERGY Introduction for SE Players”, előadás CL15 preparatory meeting, Székesfehérvár, 2015. január 27.
- [171] A. Fischer, M. Hlatki, A. Mezősi, és Z. Pető, „Geotermikus villamosenergia-termelés lehetőségei Magyarországon”, Budapesti Corvinus Egyetem, febr. 2009, o. 66.
http://unipub.lib.uni-corvinus.hu/124/1/wp2009_2.pdf (elérés: 2015. november 23.).
- [172] I. Szeredi, „Kis- és törpe vízerőművek”, előadás Vízépítő Kar, 2006. február.
- [173] I. Mayer, „Vízenergia hasznosítás Magyarországon”. Magyar Tudományos Akadémia, 2009. június 18.
http://netrix.mta.nsd.sztaki.hu/data/cikk/12/90/28/cikk_129028/89MayerViz.pdf (elérés: 2015. november 1.).
- [174] E. Cogliani, „The Gansu Wind farm in China is the largest wind farm in the entire world.”, *Emilio Cogliani*, 2014. június 17.
<https://emiliocogliani.wordpress.com/2014/06/17/the-gansu-wind-farm-in-china-is-the-largest-wind-farm-in-the-entire-world/> (elérés: 2017. szeptember 2.).
- [175] A. Kasza, „A napenergia és szélenergia alkalmazási lehetőségeinek vizsgálata hazánkban”, *Hadmérnök*, köt. 4, sz. 2, Art. sz. 2, jún. 2009.
- [176] M. Suzanne, „CL15 SE report”, NATO HQ, Brussels, 2016.
- [177] M. Pálffy, „A napenergia fotovillamos hasznosításának potenciálja Magyarországon”, *Elektrotechnika*, köt. 98, sz. 11, 2005.
- [178] C. Kovács, „Napkollektorok működése és alkalmazása”, *Óbudai Egyetem Kandó Kar*, 2008. december 11. <http://ekh.kvk.uni-obuda.hu/napkollektorok/6-napkollektorok-mukodese-esalkalmazasa.html> (elérés: 2017. szeptember 2.).
- [179] „Ivanpah Solar Electric Generating System”. BrightSource, 2017. szeptember 2.
http://www.brightsourceenergy.com/stuff/contentmgr/files/0/3eac1a9fed7f13fe4006aaa_b8c088277/attachment/ivanpah_white_paper_0414.pdf (elérés: 2020. október 10.).
- [180] C. J. Chen, *Physics of solar energy*. Hoboken, N.J: John Wiley & Sons, 2011.
- [181] A. Stapleton, „How solar cells turn sunlight into electricity”, *Cosmos Magazine*, 2017. január 25. <https://cosmosmagazine.com/technology/how-solar-cells-turn-sunlight-into-electricity/> (elérés: 2023. június 8.).

- [182] J. Good és J. X. Johnson, „Impact of inverter loading ratio on solar photovoltaic system performance”, *Applied Energy*, köt. 177, o. 475–486, szept. 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.05.134.
- [183] G. Conibeer és A. Willoughby, Szerk., *Solar cell materials: developing technologies*. in Wiley series in materials for electronic and optoelectronic applications. Chichester, West Sussex, United Kingdom: Wiley, 2014.
- [184] A. Colthorpe, „Soitec-Fraunhofer ISE multi-junction CPV cell hits world record 46% conversion efficiency”, *PV Tech*, 2014. december 2. https://www.pv-tech.org/news/soitec_fraunhofer_ise_multi_junction_cpv_cell_hits_world_record_46_conversion (elérés: 2017. szeptember 2.).
- [185] I. Farkas, „A napenergia hasznosításának hazai lehetőségei”, *Magyar Tudomány*, köt. 169, sz. 8, Art. sz. 8, aug. 2010, <http://www.matud.iif.hu/2010/08/05.htm> (elérés: 2017. szeptember 2.).
- [186] M. Meliani, A. E. Barkany, I. E. Abbassi, A. M. Darcherif, és M. Mahmoudi, „Energy management in the smart grid: State-of-the-art and future trends”, *International Journal of Engineering Business Management*, köt. 13, o. 184797902110329, jan. 2021, doi: 10.1177/18479790211032920.
- [187] M. Meliani, A. El Barkany, I. El Abbassi, A. M. Darcherif, és M. Mahmoudi, „Control system in the smart grid: State of the art and opportunities”, in *2020 IEEE 13th International Colloquium of Logistics and Supply Chain Management (LOGISTIQUA)*, Fez, Morocco: IEEE, dec. 2020, o. 1–6. doi: 10.1109/LOGISTIQUA49782.2020.9353878.
- [188] „Protonex – SPM-622 Special Forces Roll Kit - Soldier Systems Daily”, 2017. június 30. <https://soldiersystems.net/2017/06/30/protonex-spm-622-special-forces-roll-kit/> (elérés: 2023. június 13.).
- [189] „ATP 3.34-45”. US DoD, 2018. július.
- [190] „EDF NOMAD - NOvel energy storage technologies usable Military Deployments in forward operating bases (FOBs)”. European Defence Fund, 2023. https://defence-industry-space.ec.europa.eu/funding-and-grants/calls-proposals/european-defence-fund-2021-calls-proposals-results_en (elérés: 2023. január 10.).
- [191] V. A. Kaptsov és V. N. Deinego, „Blue LED light as a new hygienic problem”, *Health Risk Analysis*, sz. 1, o. 15–25, 2016, doi: 10.21668/health.risk/2016.1.02.
- [192] „ALDEBARAN® DUO-COLOR – EN – SETOLITE Lichttechnik GmbH”. <https://www.setolite.com/en/products/aldebaran-smartline-duo-color-2/> (elérés: 2020. október 10.).
- [193] A. Kumar, M. Alaraj, M. Rizwan, és U. Nangia, „Novel AI Based Energy Management System for Smart Grid With RES Integration”, *IEEE Access*, köt. 9, o. 162530–162542, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3131502.
- [194] K. Turcsányi, „Minőségszabályozásra alkalmas módszerek”, in *Minőségelmélet és -módszertan*, Budapest: NKE, 2014, o. 229–243.
- [195] H. G. Bence, „A zöld hidrogén a jövő, de az árával még baj van”, *Greendex*, 2023. március 27. <https://greendex.hu/zold-hidrogen-hidrogen-ara/> (elérés: 2023. augusztus 3.).
- [196] „BB-2950/U lithium ion rechargeable battery technical data sheet”. Petco, 2013.

- [197] „H3 Dynamics hydrogen-electric UAS Power Solutions & Accessories”. H3 Dynamics, 2023.
- [198] „AEM Electrolyser EL 4.0 datasheet”. Enapter, 2016.
- [199] „Huawei Smart Energy Storage System”. Huawei, 2021.
- [200] B. Vehovszky, „Hidrogén abszorpció által okozott felületi és térfogati változások vizsgálata nemegyensúlyi ötvözetekben”, PhD, BME, Budapest, 2012.
- [201] Y. Tadijeh, „Army Investing in Hybrid Power Microgrids”, 2021. május 10. <https://www.nationaldefensemagazine.org/articles/2021/10/5/army-investing-in-hybrid-power-microgrids> (elérés: 2023. június 17.).
- [202] A. Zotos, „Renewable Energy Sourced camp Smart Microgrid”, előadás EDA Energy and Environment WG, Brussels, 2017. február 22.
- [203] M. Nour és G. Rohani, „Prospect of stand-alone PV-diesel hybrid power system for rural electrification in UAE”, *International Journal of Renewable Energy Research*, köt. 4, sz. 3, szept. 2014.
- [204] M. J. Gilmore, „Nett Warrior Initial Operational Test and Evaluation (IOT&E) Report”, Operational Test and Evaluation Director, Port Folk, 16F-0250, 0 2015.
- [205] „Modular universal battery charger”, *Thales Group*. <https://www.thalesgroup.com/en/markets/defence-and-security/radio-communications/land-communications/tactical-radios/modular> (elérés: 2023. június 14.).
- [206] L. Gray, A. Pouring, S. Quigley, és N. Longo, „Development of a lightweight, man-portable, heavy-fuel Generator”. QinetiQ, 2010.
- [207] „Fuel Cell RFI W91CRB-21-T-FUELCELL”. <https://www.highergov.com/contract-opportunity/fuel-cell-rfi-w91crb-21-t-fuelcell-r-f70c6/> (elérés: 2023. június 14.).
- [208] „G-HFCS-5kW72V (5kW Hydrogen Fuel Cell Power Generator)”. <https://www.fuelcellstore.com/g-hfcs-5kw72v-5000w-hydrogen-fuel-cell-power-generator> (elérés: 2023. június 14.).
- [209] R. M. Ogorkiewicz, *Technology of tanks*. Coulsdon, Surrey: Jane’s Information Group, 1991.
- [210] „Abrams M1A2 SEPV3 Main Battle Tank”, *Army Technology*, 2023. június 28. <https://www.army-technology.com/projects/abrams-m1a2-sepv3-main-battle-tank/> (elérés: 2023. június 30.).
- [211] „Totalcar - Magazin - Ezt tudja a Suzuki-féle lágú hibrid”, 2020. december 19. https://totalcar.hu/magazin/technika/2020/12/19/ezt_tudja_a_suzuki-fele_lagu_hibrid/ (elérés: 2023. június 17.).
- [212] S. Vágner, „Terepjáró képesség fejlesztése a Magyar Honvédségben”, *Katonai Logisztika*, köt. 26, sz. 1–2, o. 194–227, 2018, doi: 10.30583/2018/1-2/194.
- [213] G. Kálmánfy, „Átadták a századik honvédségi Currus Aries buszt”, 2019. november 28. <https://honvedelem.hu/galeriak/atadtak-a-szazadik-honvedsegi-currus-aries-buszt.html> (elérés: 2023. június 17.).
- [214] „Rheinmetall”, *Rheinmetall*. <https://www.rheinmetall.com/en/company/subsidiaries/hu-rheinmetall-hungary-zrt> (elérés: 2023. június 17.).

[215] „European Comission - Hydrogen Strategy”. https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-systems-integration/hydrogen_en (elérés: 2023. augusztus 9.).

Mellékletek

1. melléklet: A Magyar Honvédség energia-felhasználása 2015 és 2020 között (saját szerkesztés a HM VGH és az MH ARB által szolgáltatott adatok alapján)

év	Összes üzemanyag		Földgáz		Elektromosság		Egyéb energia	Energia mindösszesen
	felh. mennyiség	energiatartalom	felh. mennyiség	energiatartalom	felh. mennyiség	energiatartalom		
2016	13 248 790 liter	585 480 GJ	20 189 573 m ³	726 823 GJ	74 145 214 kWh	264 861 GJ	140 703 GJ	1 717 866 GJ
2017	13 878 959 liter	612 813 GJ	19 146 919 m ³	689 287 GJ	75 268 374 kWh	268 683 GJ	135 595 GJ	1 706 378 GJ
2018	14 461 051 liter	635 294 GJ	19 526 066 m ³	702 936 GJ	74 064 060 kWh	263 815 GJ	130 587 GJ	1 732 633 GJ
2019	14 306 078 liter	628 213 GJ	19 336 492 m ³	696 112 GJ	75 568 000 kWh	268 322 GJ	133 553 GJ	1 726 200 GJ
2020	16 858 686 liter	738 839 GJ	18 042 654 m ³	649 534 GJ	96 924 478 kWh	345 201 GJ	142 283 GJ	1 875 857 GJ
összesen:	72 753 564 liter	3 200 638 GJ	96 241 704 m ³	3 464 692 GJ	395 970 126 kWh	1 410 883 GJ	682 721 GJ	8 758 934 GJ
átlag:	14 550 713 liter	640 128 GJ	19 248 341 m ³	692 938 GJ	79 194 025 kWh	282 177 GJ	136 544 GJ	1 751 787 GJ

év	Távhő		Szén		LPG		fűtőolaj	
	felh. mennyiség	energiatartalom	felh. mennyiség	energiatartalom	felh. mennyiség	energiatartalom	felh. mennyiség	energiatartalom
2016	29 722 460 kWh	107 001 GJ	584 tonna	17 111 GJ	2 051 128 kWh	7 384 GJ	336 000 liter	9 206 GJ
2017	29 166 900 kWh	105 001 GJ	500 tonna	14 650 GJ	1 993 349 kWh	7 176 GJ	320 000 liter	8 768 GJ
2018	28 055 780 kWh	101 001 GJ	480 tonna	14 064 GJ	1 906 682 kWh	6 864 GJ	316 000 liter	8 658 GJ
2019	28 611 340 kWh	103 001 GJ	504 tonna	14 767 GJ	1 964 460 kWh	7 072 GJ	318 000 liter	8 713 GJ
2020	31 111 360 kWh	112 001 GJ	500 tonna	14 650 GJ	1 906 682 kWh	6 864 GJ	320 000 liter	8 768 GJ
összesen:	146 667 840 kWh	528 004 GJ	2 568 tonna	75 242 GJ	9 822 301 kWh	35 360 GJ	1 610 000 liter	44 114 GJ
átlag:	29 333 568 kWh	105 601 GJ	514 tonna	15 048 GJ	1 964 460 kWh	7 072 GJ	322 000 liter	8 822 800 GJ

év	Gázolaj		Benzin		Kerozin		Üzemanyag összesen	
	felh. mennyiség	energiatartalom	felh. mennyiség	energiatartalom	felh. mennyiség	energiatartalom	felh. mennyiség	energiatartalom
2016	5 021 333 liter	228 973 GJ	801 889 liter	37 208 GJ	7 425 568 liter	319 299 GJ	13 248 790 liter	585 480 GJ
2017	5 134 165 liter	234 118 GJ	784 961 liter	36 422 GJ	7 959 833 liter	342 273 GJ	13 878 959 liter	612 813 GJ
2018	3 988 240 liter	181 864 GJ	911 507 liter	42 294 GJ	9 561 304 liter	411 136 GJ	14 461 051 liter	635 294 GJ
2019	3 846 599 liter	175 405 GJ	897 165 liter	41 628 GJ	9 562 314 liter	411 180 GJ	14 306 078 liter	628 213 GJ
2020	4 007 968 liter	182 763 GJ	1 027 796 liter	47 690 GJ	11 822 922 liter	508 386 GJ	16 858 686 liter	738 839 GJ
összesen:	21 998 305 liter	1 003 123 GJ	4 423 318 liter	205 242 GJ	46 331 941 liter	1 992 273 GJ	72 753 564 liter	3 200 638 GJ
átlag:	4 399 661 liter	200 625 GJ	884 664 liter	41 048 GJ	9 266 388 liter	398 455 GJ	14 550 713 liter	615 450 GJ

év	Villamosság		
	vásárolt mennyiség	saját termelés	összesen
2016	73 572 607 kWh	572 607 kWh	74 145 214 kWh
2017	74 634 187 kWh	634 187 kWh	75 268 374 kWh
2018	73 282 030 kWh	782 030 kWh	74 064 060 kWh
2019	74 534 000 kWh	1 034 000 kWh	75 568 000 kWh
2020	95 889 239 kWh	1 035 239 kWh	96 924 478 kWh
összesen:	391 912 063 kWh	17 871 190 kWh	409 783 253 kWh
átlag:	78 382 413 kWh	3 574 238 kWh	81 956 651 kWh

üza.	gáz	áram	egyéb
34,08 %	42,31 %	15,42 %	8,19 %
35,91 %	40,39 %	15,75 %	7,95 %
36,67 %	40,57 %	15,23 %	7,54 %
36,39 %	40,33 %	15,54 %	7,74 %
39,39 %	34,63 %	18,40 %	7,58 %
36,54 %	39,56 %	16,11 %	7,79 %
36,54 %	39,56 %	16,11 %	7,79 %

	év	2015		2016		2017		2018		2019		2020	
energia-hordozó	elszámolás egység	fogyasztott mennyiség	ekvivalens energia (GJ)	fogyasztott mennyiség	ekvivalens energia (GJ)	fogyasztott mennyiség	ekvivalens energia (GJ)	fogyasztott mennyiség	ekvivalens energia (GJ)	fogyasztott mennyiség	ekvivalens energia (GJ)	fogyasztott mennyiség	ekvivalens energia (GJ)
motor hajtóanyag	liter	5 053 202	186 630	5 823 222	215 069	5 919 126	218 611	4 899 747	180 962	5 919 126	218 611	4 899 747	180 962
földgáz	m ³	18 514 013	666 503	20 189 573	726 823	19 146 919	689 287	19 526 066	702 936	19 336 492	696 112	18 042 654	649 534
villamos energia	kWh	80 413 775	289 490	73 572 607	264 861	74 634 187	268 683	73 282 030	263 815	74 534 000	268 322	95 889 239	345 201
összesen	-	-	1 142 622	-	1 206 753	-	1 176 581	-	1 147 714	-	1 183 045	-	1 175 697
áram %			25,34		21,95		22,84		22,99		22,68		29,36

2. melléklet: Energetikai módszerek összehasonlítása (saját szerkesztés)

módszer	technika/eljárás		alkalmazása lehetséges	hatékonyság javulás szintje	katonai alkalmazás készültségi szintje	alkalmazás /infrastruktúra költsége	mobilitás/ skálázhatóság	átlag eredmény
villamosenergia-tárolás energia-sűrűségének javítása	natív elektromos	szuperkondenzátor	EDCL	1	1	-	-	-
			hibrid/egyéb	1	1	-	-	-
		szupravezető tekercs		1	1	-	-	-
	mechanikus	gravitációs	vizes	0	-	-	-	-
			darus	1	1	-	-	-
		lendkerék		1	1	-	-	-
		sűrített levegő		1	1	-	-	-
	termikus			0	-	-	-	-
	kémiai	alternatív üzemanyag		0	-	-	-	-
		üzemanyagcella	direkt metanol	0	-	-	-	-
			szilárd oxid	0	-	-	-	-
			folyékony karbonát	0	-	-	-	-
			foszforsav	0	-	-	-	-
			alkáli	0	-	-	-	-
	PEM		1	5	3	3	4	3,75
	elektrokémiai	elem	alkálielem	1	1	-	-	-
			egyéb	1	1	-	-	-
		akkumulátor	ólomsavas	1	1	-	-	-
			nikkel-alapú	1	1	-	-	-
			NaS	0	-	-	-	-
			redox folyadékkáram	0	-	-	-	-
egyéb			1	1	-	-	-	
lítium-ion	1	3	5	4	4	4		

			szilárdtest	1	5	1	-	-	-
energiatárolás szabványosítása				1	2	3	4	2	2,75
fogyasztók energiahatékonyságának növelése	infokommunikáció			1	2	5	2	2	2,75
	világítás			1	5	5	4	3	4,25
	forgógépek			1	1	-	-	-	-
	elosztó hálózat			1	2	5	4	2	3,25
aggregátorok hatékonyságának javítása	a dízelmotor hatásfokának javítása			1	1	-	-	-	-
	a generátor hatásfokának javítása			1	1	-	-	-	-
	csatolt hővesztés hasznosítás	Peltier-elem		1	2	2	3	4	2,75
		Stirling-motor		1	3	2	4	3	3
alternatív üzemanyagú termelés	nukleáris	nyomottvízes reaktor		1	5	3	1	-	-
		RTG		1	4	2	1	-	-
	megújuló	bioenergia	agrár	0	-	-	-	-	-
			hulladék	1	3	3	3	1	2,5
		geotermikus		0	-	-	-	-	-
		víz	tározós	0	-	-	-	-	-
			hullám	0	-	-	-	-	-
			árapály	0	-	-	-	-	-
		szél		1	5	4	3	3	3,75
		nap	kollektor	1	4	4	3	4	3,75
	tükrös		0	-	-	-	-	-	
PV	1		5	5	4	5	4,75		
energia-menedzsment	adminisztratív			1	1	-	-	-	-
	automatikus			1	3	4	4	3	3,5

3. melléklet: A CL15 gyakorlat Smart Energy szekciójában szereplő eszközök termelési és fogyasztási adatai (saját gyűjtés)

dátum (2015 június)	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
napi átlaghőmérséklet (°C)	24,2	22	20,7	22,3	23,5	24,1	21,5	20,4	22,2	24,9	26	24,8	21,3	19,2	15,8	17,6	18,5	16	18	19,2	14
napi átlagos szélerősség (m/s)	8	19	4	11	7	5	18	11	14	16	14	10	21	19	20	12	25	20	16	13	10
alkalmazott eszköz	napi energia-termelés (kWh)																				
1	21,1	26,9	24,3	24,8	19,8	21	17,6	19,6	22,4	24,9	26,7	24,3	15,6	20,5	21,9	21,7	20,1	22,3	11,4	22,9	14,6
2	8,7	10,3	9,4	9,5	7,7	8,5	6,8	7,7	8,7	9,1	9,6	9	6,1	7,9	8,6	8,6	8	8,9	5,6	9	5,7
3	72,9	80,1	80,3	80,7	71,2	72,4	67,5	71,8	73	80,9	81,6	78,9	62,6	78,3	78,8	78,8	74,1	72,7	57,6	75,1	63,4
4	71,9	82,3	81,6	82,4	76,5	78,4	71,4	72,3	76,5	84,7	86,2	78	67,4	82,3	84,2	83,9	77,9	75,2	59,6	78,7	68,6
5	-	-	-	-	-	8,2	6,3	7,4	8,4	9,8	10,8	10,1	6,6	8,7	9,1	9,3	8,2	-	-	-	-
6	21,7	34,2	16,2	19,8	17,2	21	38,9	29,4	20,1	20,8	28,9	13,3	45,6	51,6	42,4	31,2	37,8	33,6	28,1	26,7	19,8
összesen	196	234	212	217	192	210	209	208	209	230	244	214	204	250	245	234	226	213	162	212	172
felhasználás	(kWh)																				
vezető erők sátrai	54,1	78,1	66,7	69,2	74,5	92,1	88,3	83	84,5	89,7	93,4	87,6	81,2	78,4	67,5	69,9	76,5	56,7	58,9	52,1	40,9

eszköz					
száma	jellege	gyártója	napelem felülete (m ²)	névleges teljesítménye (kW)	akkumulátor kapacitása (kWh)
1	nehéz szolár utánfutó	Multicon	29	6	15
2	mobil szolár	Smartflower	11	2	-
3	konténerre telepített szolár	Multicon	100	18	45
4	földre telepített szolár	EST	120	20	130
5	árbocra rögzített szél-turbina	Pfisterer	rotorátmérő: 5 méter	5	-
6	mobil szolár	IDE	19	3	18
*	mobil szolár	Renowagen	120	10	20

(1) A Multicon cég utánfutója beépített akkumulátorai lítium-ferrofoszfát technológiát használnak így azok jól tolerálják a szélsőséges hőmérséklet-változásokat is. Ezekkel és a beépített inverterével az eszköz jó alapja lehet egy mobil mikrogridnek is. A gyakorlat során a német Pfisterer cég konténeres menedzsment rendszeréhez csatlakozott.

(2) Az osztrák Remules cég Smartflower-e (okos virág) nevében hordozza a lényegét. A négy ember által mozgatható szerkezet alaphelyzetben csak egy doboz. Ebből nyílik ki a napelemes virág. Az eszköz a beépített GPS segítségével folyamatosan követi a nap mozgását, így a fix telepítésű rendszerekkel ellentétben a nap sugárzása mindig optimális szögben éri. Ennek segítségével a 2 kW-os rendszer valós termelési értékei nagyjából megegyeznek egy 3 kW-os fix rendszerrel. A Smartflower szélérősség érzékelővel is rendelkezik, egy bizonyos érték felett automatikusan összecsárja a szirmait. Opcionálisan akkumulátorral és inverterrel is bővíthető, de a gyakorlaton részt vevő darab ezek nélkül, a német Pfisterer cég konténeres menedzsment rendszeréhez csatlakoztatva működött.



55. ábra: A Multicon szolár-utánfutója telepített állapotban (saját felvétel)



54. ábra: Az okos virág mindig a nap felé fordul (saját felvétel)

- (3) A német Multicon cég rendszerének az a különlegessége, hogy a napelemeit a hordozó konténerből hajtogatják ki. Ehhez a cég állítása szerint egy origami művész segítségét is kikérték. A telepítés és bontás látványosan gyorsabb volt, mint egy hagyományos rendszeré. A gyakorlat alatt a rendszer a cseh nemzetiségű katonai rendész zászlóalj műveleti helyiségeit (sátrait) látta el energiával. Mivel itt éjszaka csak ügyelet működött, a gyakorlat teljes időtartama alatt (viszonylag sok napsütéses óra volt) elégséges volt a napelemes rendszer és az akkumulátorcsoport által szolgáltatott energia. Aggregátor indítására egyszer sem volt szükség.



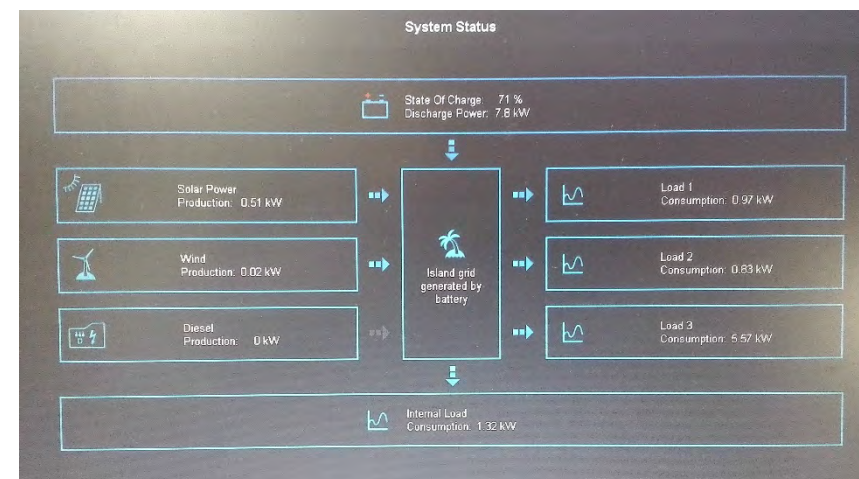
56. ábra: A Multicon konténeres rendszerén a gyártó német és felhasználó cseh alakulat zászlója lobog (saját felvétel)

- (4) A holland EST cég rendszere egy teljesen „hagyományosnak” mondható hibrid rendszer, napelemes és aggregátoros termeléssel, valamint akkumulátoros tárolással. Az aggregátor és az akkumulátorokat tartalmazó, illetve a napelemeket tartalmazó konténert daruval kellett leemelni a szállítójárműről. A napelemeket kézzel, három ember csaknem egy nap alatt szerelte össze, így inkább tartós települési idejű táborokhoz alkalmas. Ugyanakkor a gyakorlat alatt megbízhatóan látta el energiával a művelet-irányítás konténerét és néhány kommunális konténert.



57. ábra: Az EST napelemei telepítve (saját felvétel)

- (5) A német Pfisterer cég egy konténeres 50 kWh-ás tároló és menedzsment rendszert, egy teoretikus grid gerincét hozta a gyakorlatra. Saját termelő egységét a 2 db 10 kW-os aggregátoron kívül a kísérleti jelleggel felszerelt 5 kW-os szélkerék alkotta csupán, így két mobil szolár rendszerrel (1) és (2) került megerősítésre. Az alkalmazott akkumulátorok hagyományos lítium-ion típusok voltak, a hőmérsékletfüggőségük mérséklésére a konténer temperálta a saját belső terét. A gyakorlat alatt a vezető szervek irodasárait és néhány lakósátrat látott el energiával.



58. ábra: A Pfisterer cég konténerre kívülről nem túl mutatós, ezért itt a kezelőfelület egy részlete látható a pillanatnyi termelési és felhasználási adatokkal (saját felvétel)

- (6) A görög IDE rendszere egy teljes értékű mikrogrid, az aggregátorral egybe vannak építve az akkumulátorok, a vezérlés és az inverter, csak a napelemeket kell külön telepíteni. A teljes rendszer mindössze 1200 kg, így helikopterrel is szállítható, ami a görög tervezők szerint a Égei-tengeri sziklás környezetben különösen előnyös. A gyakorlat során csak a közönség által is látogatható Livex ideje alatt működött és a VIP vendég-sátrat látta el energiával.



59. ábra: Az IDE napelemei mögött alig látható (bal oldalon) az aggregátort és az akkumulátorokat is tartalmazó központi egység (saját felvétel)

- (7) A brit Renowagen szolár szőnyegének teljesítménye az alkalmazott vékonyréteg-technológia miatt csak fele volt a hagyományos „üveg” típusoknak, viszont a telepítése és bontása igen gyors. A szolár szőnyeget a hordozó utánfutóból a vontató terepjáró személygépkocsi húzta ki alig egy perc alatt. A visszacsévézésre egy beépített csörlő szolgált, ez már 10 percet is igénybe vett. A gyakorlat alatt nem került fix alkalmazásra, de a több alkalommal is megrendezett telepítése mindig nagy sikert aratott.



60. ábra: A brit Renowagen szolár-utánfutójának telepítése látványosan gyors (saját felvételek)